

**ПРИРОДНО - МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ  
УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ,  
КОСОВСКА МИТРОВИЦА**

**мр Биљана Вучковић**

***ИСТРАЖИВАЊЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ АКТИВНОСТИ  
РАДОНА У МИНЕРАЛНИМ И ТЕРМОМИНЕРАЛНИМ  
ВОДАМА СРБИЈЕ***

***- Докторска дисертација -***

**МЕНТОР: Проф. др Фериз Адровић**

**Косовска Митровица, 2012**

*Дугујем посебну захвалност:*

*Проф. др Феризу Адровићу на драгоценим стручним саветима и несебичној помоћи у реализацији ових истраживања.*

*Својим драгим пријатељима, доц. др Гордани Милић и Љиљани Гулан на значајним сугестијама које сам користила у свом раду.*

*Својој породици на великој подршци и разумевању.*

# САДРЖАЈ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>УВОД</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>1.РАДИЈАЦИЈА НА ЗЕМЉИ</b> .....                                     | <b>7</b>  |
| 1.1.Изложеност човека природној радијацији .....                       | 8         |
| 1.2.Утицај радона и његових потомака на човека .....                   | 10        |
| 1.3.Терапијско деловање радона .....                                   | 16        |
| <b>2.РАДОН (<math>^{222}\text{Rn}_{86}</math>)</b> .....               | <b>18</b> |
| 2.1.Физичко-хемијске карактеристике радона .....                       | 18        |
| 2.2.Извори радона .....  | 22        |
| 2.3.Еманација радона .....   | 23        |
| 2.4.Транспорт радона .....   | 26        |
| <b>3.РАДОН У ЗЕМЉИШТУ</b> .....  | <b>30</b> |
| <b>4.РАДОН У ВОДИ</b> .....  | <b>32</b> |
| 4.1.Радон у подземној води .....                                       | 32        |
| 4.2.Радон у води за пиће .....   | 34        |
| 4.3.Процес преласка радона из воде у затворен простор .....            | 36        |
| <b>5.РАДОН У ВАЗДУХУ</b> .....   | <b>39</b> |
| 5.1.Радон у атмосфери .....  | 39        |
| 5.2.Радон у затвореном простору .....                                  | 42        |
| 5.2.1.Земља и стеновито тло испод зграде као главни извор радона ..... | 44        |
| 5.2.2.Грађевински материјали као извори радона .....                   | 44        |
| 5.2.3.Вода као извор радона у кући .....                               | 45        |
| 5.3.Дистрибуција радона унутар куће .....                              | 46        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6.МИНЕРАЛНЕ И ТЕРМОМИНЕРАЛНЕ ВОДЕ</b> .....   | <b>48</b> |
| 6.1.Класификација минералних вода .....  | 49        |
| 6.2.Радиоактивност минералних вода .....   | 51        |
| 6.3.Радонске воде .....  | 52        |
| <br>   |           |
| <b>7.БАЊЕ СРБИЈЕ</b> .....   | <b>55</b> |
| 7.1.Реон Карпато-балканоида .....  | 56        |
| 7.2.Реон Српског кристаластог језера .....   | 57        |
| 7.3.Шумадијско-копаониочко-косовски реон .....   | 59        |
| 7.4.Реон Динарида .....  | 61        |
| 7.5.Реон Панонског басена .....  | 63        |
| <br>   |           |
| <b>8.ГЕОТЕРМАЛНА ЕНЕРГИЈА ПОДЗЕМНИХ ВОДА</b> .....   | <b>65</b> |
| 8.1.Улога радона у геотермалним прегледима .....   | 66        |
| 8.2.Геотермална енергија у Србији .....  | 67        |
| <br>   |           |
| <b>9.МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА РАДОНА</b> .....   | <b>68</b> |
| 9.1.AlphaGUARD мерни уређај .....  | 68        |
| 9.1.1.Мерење радона у ваздуху помоћу AlphaGUARD уређаја .....  | 71        |
| 9.1.2.Мерење радона у води помоћу AquaKIT система .....  | 71        |
| 9.2.Гамма TRACER .....   | 75        |
| 9.2.1.Основне карактеристике мерног система Гамма TRACER-а .....   | 76        |
| 9.2.2.Основни технички подаци система ADL-Гамма TRACER-а .....   | 76        |
| 9.3.Чврсти траг-детектори .....  | 77        |
| <br>   |           |
| <b>10.РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА</b> .....  | <b>84</b> |
| 10.1.Реон Карпато-балканоида .....   | 87        |
| 10.1.1.Концентрације активности радона у води и ваздуху<br>мерене AlphaGUARD мерним системом .....         | 87        |
| 10.1.2.Јачине доза гама зрачења очитане Гамма TRACER-ом .....  | 93        |
| 10.1.3.Континуирано праћење концентрације активности радона у<br>ваздуху помоћу CR-39 траг детектора ..... | 97        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>10.2.Реон Српског кристаластог језера .....</b>                   | <b>99</b>  |
| <b>10.2.1.Концентрације активности радона у води и ваздуху</b>       |            |
| <b>    мерене AlphaGUARD мерним системом .....</b>                   | <b>99</b>  |
| <b>10.2.2.Јачине доза гама зрачења очитане Gamma TRACER-ом .....</b> | <b>103</b> |
| <b>10.3.Шумадијско-копаоничко-косовски реон .....</b>                | <b>109</b> |
| <b>10.3.1.Концентрације активности радона у води и ваздуху</b>       |            |
| <b>    мерене AlphaGUARD мерним системом .....</b>                   | <b>109</b> |
| <b>10.3.2.Јачине доза гама зрачења очитане Gamma TRACER-ом .....</b> | <b>119</b> |
| <b>10.4.Статистичка анализа експерименталних резултата .....</b>     | <b>123</b> |
| <br>   |            |
| <b>ЗАКЉУЧАК .....</b>  | <b>127</b> |
| <br>   |            |
| <b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>  | <b>132</b> |

## УВОД

*-Вода игра важну улогу у животној човјека. У нашим народним Пјесмама и Приповјеткама вода се чешће спомиње него хлеб, или одећа и обућа, него кућа или њива...Око ње се створио ореол мистике. Она долази одмах после Сунца, или у поредо са њим.-*

*Иво Андрић*

Живи организми на површини Земље стално су изложени радијацији, која потиче од природних извора, стена и минерала Земље. Људи могу бити озрачени на два начина: екстерно, када радиоактивне супстанце озрачују организам споља, и интерно, када се радиоактивне супстанце унесу удисањем или путем хране и воде у организам. Доза озрачења у животној средини зависи од три фактора: нивоа контаминације терена, миграције радионуклида у екосистему и ланцу исхране, као и од животних навика и понашања угрожене популације. Просечна годишња доза за становништво на светском нивоу процењена је на 2,4mSv у распону 1-10mSv.

Према мишљењу Научног комитета за ефекте атомског зрачења (UNSCEAR), радон и његови краткоживећи производи доприносе више од 50% укупном озрачивању људи. Сматра се да радон после пушења је највећи узрочник канцера плућа. Зато се и истражују и испитују концентрације активности радона у ваздуху, што се у првом реду односи на инхалацију радона и његових потомака.

Радон ( $^{222}\text{Rn}$ ) је једини гасовити радиоактивни производ урановог низа и директан потомак радијума ( $^{226}\text{Ra}$ ). Време полураспада радона је 3,82 дана, и његов распад у

низу прате четири потомка:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{214}\text{Po}$ . Оба полонијума су  $\alpha$ -радиоактивна, док су бизмут и олово  $\gamma$ -радиоактивни. Њихови  $\gamma$ -зраци су далеко највећа компонента и највећи енергетик урановог низа што их чини значајним у поређењу са спољашњом радијацијом.

Растворљивост радијума у води и транспорт на велика растојања, омогућава нагомилавање радона у њој, посебно ако раствара стене богате ураном. Настали радон може ефектом узмака да буде убачен у воду и подземном проточном водом може да се транспортује на већа растојања. У свету половина од укупне коришћене воде за пиће долази из подземних вода, зато није занемарљив допринос изложености радона унетог ингестијом у организам. Радијум се често замењује калцијумом због хемијске сличности и следи га у околини. У киселој средини или водама богатим хлором радијум је веома мобилан, док у алкалним или сулфатним водама његова активност је знатно смањена, јер гради са анјонима  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  лако растворљиве соли у води, а са анјонима  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_3^{3-}$  тешко растворљиве соли.

Присуство радионуклида у води за пиће, али и води која се користи у друге сврхе игра значајну улогу у озрачивању становништва. То се првенствено односи на воду која се користи у базенима за купање, као и кадама и купатилима за инхалацију у бањама. Бање су кроз историју заузимале значајно место у лечењу многих болести, а савремени начин и брз темпо живота све више људе враћају природи и природним лечилиштима. Бањски локалитети Србије захваљујући географском положају, геолошкој структури, сложености и расчлањености рељефа, клими, богате су минералним и термоминералним водама најразноврснијег састава. Концентрација активности радона у природним водама различита је и варира у широким границама. У обичним питким и речним водама је око  $3,7 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , у подземним водама од  $3,7 - 370 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . У неким минералним и термоминералним водама концентрација активности радона може бити висока ( $180 - 380 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ ), и врло висока чак до  $4500 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . То су тзв. високорадонске воде.

Дозе озрачивања организама радионуклидима унетим питком водом зависе од њихове количине у води, метаболизма и кинетике у организму. Када се ради о води

која се користи за купање и терапију, највећи допринос долази од инхалације радона.

Ова теза се бави детекцијом радона и његових потомака у минералним водама и ваздуху бања Србије. Мерења концентрације активности радона и његових потомака у води и ваздуху обављена су помоћу AlphaGUARD-а, Gamma TRACER-а и уз помоћ чврстих CR-39 траг детектора.

AlphaGUARD PQ 2000/MC50 multiparameter Radon Monitoring System је апарат за детекцију радона, односно мерење концентрације радона и његових потомака у ваздуху, води и земљишту, као и грађевинском материјалу. Његов рад се заснива на принципу јонизације. Јонизациона комора овог система је оптимизираних пулса у комбинацији са DSP - Radon WL System. Резултати мерења презентују се на дигиталном дисплеју.

Gamma TRACER је мерни систем широке примене, велике прецизности и користи се за: документацију радијација природног фона, евиденцију њихових временских варијација и њихову презентацију, као и перманентно праћење емисије гама зрачења у околини. Уређај омогућује индиректно праћење концентрације радона мерењем  $\gamma$ -зрачења његових потомака.

Чврстим траг-детекторима  $\alpha$ -честица, CR-39, мерена је концентрација активности радона у ваздуху у дужем временском интервалу. Детектори су пластични материјали у којима  $\alpha$ -честице из распада радона остављају трагове. Трагови  $\alpha$ -честица на детекторима су изазивани методом хемијског нагризања у 6,25% нормалном раствору NaOH, при температури од 90°C у трајању од 4,5h.



## 1. РАДИЈАЦИЈА НА ЗЕМЉИ

У животној средини присутно је преко 60 радионуклида, и према пореклу се могу поделити у три категорије /1/:

-терестријални, природни, присутни у саставу планете

-космогени, природни, настали под дејством космичког зрачења

-вештачки, настали као резултат људске делатности

Терестријални радионуклиди су настали у процесима који су пратили настанак универзума. Представљају најзначајнији извор јонизујућег зрачења у животној средини, како у погледу укупног озрачивања становништва тако и у погледу локално високих доза зрачења /2-4/. Карактерише их довољно дуго време полураспада у односу на старост Земље, реда  $10^9$  до  $10^{10}$  година. Представници ових радионуклида су:  $^{40}\text{K}$  и изотопи настали као продукти распада  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{235}\text{U}$ . У земљишту доминирају  $^{40}\text{K}$  и потомци  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Међусобно се разликују по својим физичким и геохемијским особинама, као и у погледу потенцијалних ризика за становништво.  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  и њихови потомци су извори који претежно емитују  $\alpha$ -честице малог домета али велике јонизујуће моћи. У природи се срећу у виду минерала и руда у неким областима.

Космогени радионуклиди настају приликом интеракције горњих слојева атмосфере и космичког зрачења /1/. Средњег су или малог атомског броја, са временом полураспада од неколико секунди до  $5,7 \times 10^3$  година. Ови нуклиди су  $\beta$ - и  $\gamma$ -емитери, као и емитери X-зрака. Најпознатији су :  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{22}\text{Na}$ /5/.

Природни радионуклиди се углавном акумулирају у површинском слоју земљишта, па се највећи део радиоактивних честица налази на дубини од 0,05m. На покретљивост сваког радионуклида и његово кретање кроз екосистем у првом реду

утиче његова могућа интеракција са компонентама земљишта. А ту су још и: падавине, процеси трансформације терена, реактивност нуклида и његова валенца, тип земљишта и концентрација стабилних изотопа у њему /6/. Истраживања активности природних радионуклида су неопходна за примену одређених мера у случајевима њихове појачане радијације у односу на препоручену /3/.

Вештачки (антропогени) извори зрачења највећим делом представљају радионуклиде пореклом од атомског оружја, муниције са осиромашеним уранијумом, депоновања радиоактивног отпада, акцидентата у нуклеарним централама /7/. Основна карактеристика ових радионуклида су кратка времена полураспада. Количине вештачких радиоактивних материјала су на Земљи мале у односу на природне.

### 1.1.Изложеност човека природној радијацији

Опште је познато да и човеково тело садржи одређене количине радиоактивних елемената, јер сви радионуклиди који се налазе у човековом окружењу наћи ће се и у телу, у одређеним количинама, табела 1.1.1.

Табела 1.1.1. Радионуклиди у телу човека /1/

| Изотоп     | Укупна маса изотопа у телу ( $\times 10^{-6}$ kg) | Укупна активност изотопа у телу (Bq) | Процена дневног уноса изотопа ( $\times 10^{-6}$ kg) |
|------------|---|--------------------------------------|--|
| Уран       | 90  | 1,1                                  | 1,9  |
| Торијум    | 30  | 0,11                                 | 3  |
| Калијум 40 | $17 \times 10^3$                                  | $4,4 \times 10^3$                    | $0,39 \times 10^3$                                   |
| Радијум    | $31 \times 10^{-6}$                               | 1,1                                  | $2,3 \times 10^{-6}$                                 |
| Угљеник 14 | 95  | $15 \times 10^3$                     | 1,8  |
| Трицијум   | $0,06 \times 10^{-6}$                             | 23                                   | $0,003 \times 10^{-6}$                               |
| Полонијум  | $0,2 \times 10^{-6}$                              | 37                                   | 0,6  |

Процена концентрације радионуклида односи се на тело одраслог човека масе 70 kg /1/.

У табели 1.1.2. наведени су најзначајнији природни извори зрачења /8/:

Табела 1.1.2. Просечно годишње излагање становништва природним изворима /8/

| Извор излагања                 | Спољашње излагање( $\times 10^{-3}$ Sv) | Унутрашње излагање( $\times 10^{-3}$ Sv) | Укупно излагање ( $\times 10^{-3}$ Sv) |
|--------------------------------|---|--|--|
| Космички зраци                 | 0,30                                    | –  | 0,30                                   |
| $^{40}\text{K}$                | 0,12                                    | 0,18                                     | 0,30                                   |
| $^{238}\text{U}$ са потомцима  | 0,09                                    | 0,91                                     | 1,00                                   |
| $^{232}\text{Th}$ са потомцима | 0,14                                    | 0,19                                     | 0,33                                   |

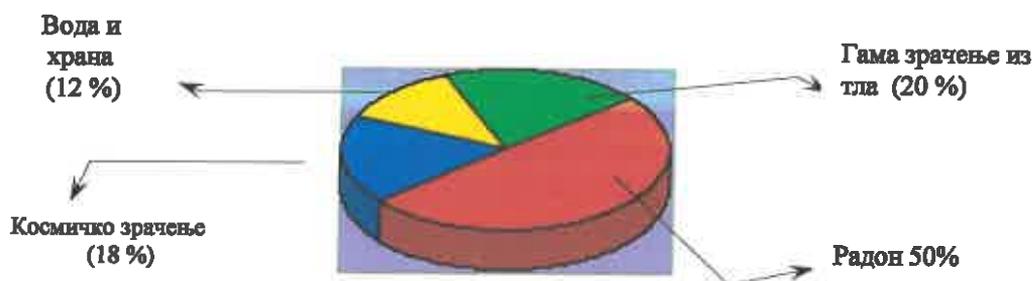
Концентрације радиоактивних изотопа и његових продуката распада у човековом окружењу варирају у складу са географским, геолошким и климатским променама /5,9/. Поједини географски региони имају повишене нивое радиоактивности због присуства природних и вештачких извора зрачења. Пораст величине дозе је много већи изнад полова него на екватору, због утицаја Земљиног магнетног поља. Према извештају UNSCEAR-а годишња ефективна доза по глави становника је процењена на 0,27mSv/g у областима мале надморске висине, нпр. у европским земљама испод нивоа мора. Насупрот томе, у областима са великом надморском висином, као што су Богота, Ласа или Кјото, достиже вредност већу од 1mSv/g /10/.

Када се процењује просечна годишња изложеност радијацији такође треба размотрити живот у кућама, јер је виши степен дозе унутар кућа него ван ње, јер и сами зидови могу садржати и емитовати радионуклиде. Зависно од врсте грађевинског материјала и ефикасности вентилације, може бити и до хиљаду пута већа него на отвореном простору /4,5,9/. Са друге стране, геолошки (састав, време, порозност и влажност) и метеоролошки (атмосферски притисак, влажност ваздуха, ветар) услови имају утицај на висину дозе. Просечна јачина дозе у ваздуху у нормалним околностима иде и до 44nGy/h /10/.

## 1.2. Утицај радона и његових потомака на човека

Један потмак у уранијумовом низу заслужује посебну пажњу. То је природни радиоактивни гас радон.  $^{222}\text{Rn}_{86}$  је  $\alpha$ -емитер са временом полураспада од 3,82 дана. Након емисије из земљишта и других материјала производи велику количину потомака у атмосфери. Као гас продире кроз стене и земљиште и акумулира се у затвореним просторима, а у организам се уноси у првом реду инхалацијом /7,10, 11-13/.

На основу бројних националних и регионалних истраживања у свету, процењена доза зрачења радона је око 1,2mSv за годину, у односу на 1,1mSv од свих других природних извора. Радон и његови краткоживећи производи највише доприносе укупном озрачивању људи од природних извора (преко 40%) /14/, док 20% изложености долази од гама зрачења из земље, 12% из воде и хране, а 18% од космичког зрачења (UNSCEAR 2000), /9,15/. А то се може видети на дијаграму-слици 1.2.1.



Слика 1.2.1. Извори и просечна дистрибуција основног природног зрачења за светску популацију /5/

Сагласно UNSCEAR-у (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) из 1993.године, просечна концентрација радона је  $40\text{Bq}/\text{m}^3$  у затвореном простору, 'indoors radon', и  $10\text{Bq}/\text{m}^3$  у отвореном простору, 'outdoors radon'. Коришћењем одговарајућих еквивалентних фактора од 0,4 за 'indoors' и 0,8 за 'outdoors' радон, добија се да је просечна ефективна еквивалентна концентрација (ЕЕС)  $16\text{Bq}/\text{m}^3$  у домовима, и  $8\text{Bq}/\text{m}^3$  у спољашњој средини. На основу фактора

конверзије, сагласно UNSCEAR-у, ефективна еквивалентна доза (E) је  $9 \times 10^{-6}$  mSv/h од  $1 \text{ Bq/m}^3$  ефективне еквивалентне концентрације (EEC) радона у спољашњем и унутрашњем простору, и  $1,5 \times 10^{-3}$  mSv/god за удахнути радон од  $1 \text{ Bq/m}^3$  раствореног у ткивима. Доза од 1,2 mSv/god. постулира се следећи начин /9/:

-за продукте распада радона у спољашњој средини:

$$E_{\text{out}} = 8 \text{ Bq/m}^3 \times 9 \times 10^{-6} \text{ mSvh}^{-1} / \text{Bqm}^{-3} \times 0,2 \times 8760 \text{ hgod}^{-1}$$

$$E_{\text{out}} = 0,13 \text{ mSv/god.} \quad (1.2.1)$$

-за продукте распада у згради:

$$E_{\text{in}} = 16 \text{ Bq/m}^3 \times 9 \times 10^{-6} \text{ mSvh}^{-1} / \text{Bqm}^{-3} \times 0,8 \times 8760 \text{ hgod}^{-1}$$

$$E_{\text{in}} = 1,0 \text{ mSv/god.} \quad (1.2.2)$$

-за радон удахнут у унутрашњој и спољашњој средини:

$$E_{\text{in\&out}} = [(10 \text{ Bq/m}^3 \times 0,2) + (40 \text{ Bq/m}^3 \times 0,8)] \times 1,5 \times 10^{-3} \text{ mSv god}^{-1} / \text{Bqm}^{-3}$$

$$E_{\text{in\&out}} = 0,051 \text{ mSv/god} \quad (1.2.3)$$

Па је ефективна еквивалентна доза E је:

$$E = E_{\text{out}} + E_{\text{in}} + E_{\text{in\&out}} = (0,13 + 1,0 + 0,051) \text{ mSv/god.}$$

$$E = 1,18 \text{ mSv/god.} \quad (1.2.4)$$

У радном и стамбеном простору човек проведе просечно 80% свог времена, а 20% ван, па зато у рачуну фигуришу параметри  $0,8 \times 8760 \text{ h/god}$  и  $0,2 \times 8760 \text{ h/god}$ .

Радон се у литератури појављује као значајан фактор ризика за настанак рака плућа, посебно код пушача и рудара у подземним уранским и другим рудницима /14,15/. Треба нагласити да доза у плућима потиче углавном од краткоживећих радонових потомака полонијума-218 и полонијума-214, наталожених на површинама бронхија, а не од самог радона /16/. Захваљујући својим физичким особинама, пошто су јони метала, вежу се за аеросоле у ваздуху стварајући радиоактивне

аеросоле, и својим распадом јонизују ћелије и подстичу на неконтролисано дељење. Радон се највећим делом враћа натраг са издахнутим ваздухом.

Присуство и деловање потомака се мери и истражује у групи. Тако да се не говори о њиховим појединачним концентрацијама, већ о концентрацији потенцијалне енергије  $\alpha$ -честица које се емитују при распаду (РАЕС). Однос РАЕС-а и концентрације радона у затвореном простору се дефинише равнотежним фактором  $F$ , који је у интервалу 0,3-0,7 у природном окружењу, а у случају озрачивања је 0,4 /17/. Продукти распада су у ваздуху плућа на удаљености око 20-30 $\mu$ m од ћелија и на тај начин имају већу вероватноћу да погоде језгро ћелије-мете. Радон се полако раствара у ткивима и транспортује путем крви у друге органе, где заједно са продуктима распада појачава испоручену дозу радијације ткиву. Брзина дисања, величина аеросола, као и величина ћелије-мете, су битни параметри који утичу на испоручену дозу  $\alpha$ -честица ћелијском језгру у бронхијама.

Деведесет и пет процената (95%) излагања радону је од ваздуха у унутрашњости просторија, око 1% је из извора питке воде. Већина од ових 1% излагања кроз питку воду је од инхалације гаса радона који се ослобађа приликом уобичајеног начина коришћења воде. Само 0,1% излагања је услед уношења питке воде контаминиране радоном. Радон унесен у организам на овај начин има већи утицај него инхалирани ослобођени радон из исте воде /18/.

Годишња ефективна доза коју прими становништво услед ингестије радона, рачуна се по формули /19,20/:

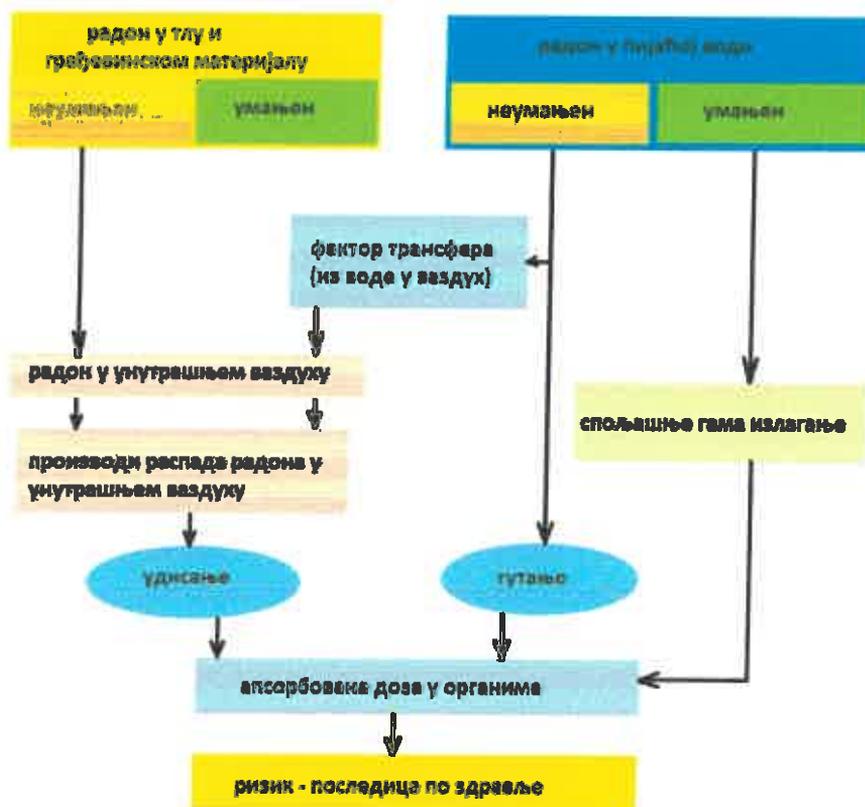
$$E = K \cdot C \cdot G \cdot t \quad (1.2.5)$$

где је  $E$  ефективна годишња доза услед ингестије радона (Sv),  $K$  ингестиони дозни конверзиони фактор за радон- $8,4 \times 10^{-8}$  Sv/Bq /21/,  $C$  концентрација радона у води у Bq/l =  $10^3$  Bq/m<sup>3</sup>,  $G$  дневна запремина воде која се попије по становнику (l/dan) и  $t$  време трајања конзумације воде (365 дана).

Најважнији извор краткотрајног излагања је ослобађање радона из воде током туширања и удисање његових продуката распада. Тада се радон преноси из воде у ваздух и тако повећава своју концентрацију у просторији. Са друге стране, концентрација ослобођених потомака радона из воде је мала, па је излагање зрачењу од продуката распада радона много мање него од самог радона /22-25/. Зато ће се пораст активности јавити са ефективним временом полураспада од тридесет минута. А то је време потребно да се на површини просторије наталоже честице радона, а самим тим и повећа концентрација продуката распада радона. На тај начин се повећава унета дозе радијације плућа.

Истраживања изложености радијацији које су произвели продукти распада радона у кућама, показала су да узрок појачаног озрачивања може бити грађевински материјал објекта, земљиште на којем се кућа налази /26-29/. Референтне вредности за присутну концентрацију активности радона у затвореном простору већином су између 200 и 400, а у неким земљама  $600\text{Bq/m}^3$ . У неким земљама концентрација радона у затвореном простору износи и  $10000\text{Bq/m}^3$ , што је последица геолошке структуре тла. Механизми продирања радона у затворене просторије су многобројни, али су свакако најзначајнији дифузија и разлика у притисцима. Места на којима радон продира су најчешће пукотине и рупе у поду и зидовима, као и шупљине око цеви и каблова. Допринос концентрацији радона у затвореним просторијама од воде и гаса је од секундарног значаја, јер зависи у првом реду од концентрације радона у њима, али и начина и обима коришћења /9/. У случају слабе вентилације просторије активност радона експоненцијално опада са растојањем од зида који се може представити као извор. Повећана вентилација квари експоненцијалну расподелу радона у просторији услед турбуленције /26/.

Процеси изложености човека радону приказани су на дијаграм-слици 1.2.2., /23/.



Слика 1.2.2. Извори радона и процеси који утичу на укупну дозу зрачења и процену ризика на здравље људи /23/

Уношење природних радионуклида храном и водом у организам води ка унутрашњој изложености радијацији. Вода, и храна, богата радоном, иду директно у желудац одакле радон потом може продрети у организам и кроз зидове трбуха, као што је приказано на слици 1.2.3 /28/.





Слика 1.2.3. Путеви уноса радона ингестијом /25/

Део унетих радионуклида може остати на истим местима дуг временски период, а неки опет, могу бити апсорбовани од стране макрофага (покретних ћелија) и бити пренети обично до лимфних чворића. Ове ћелије могу примити дозу зрачења  $\alpha$ -честица емитованих од радона и његових краткоживећих потомака насталих у трбушној дупљи. Домет  $\alpha$ -честице је 50-60 $\mu$ m у ткиву. Критични органи у којима се депонују и задржавају су у првом реду кости, јер унети радионуклиди прате метаболичке путеве калцијума. Органи који су јако осетљиви на радионуклиде унете ингестијом су поред желуца и јетра, бубрези и друга мека ткива /15,23-25/. Доза коју поједини органи, односно организам у целини прими од радона и његових потомака могу се прерачунати у одговарајући ризик настанка карцинома, па и ризик смртности. У земљама Европе са дозом озрачења од 50Bq/m<sup>3</sup>, проценат оболелих од карцинома је 1,5-3x10<sup>-3</sup>. У Шведској је проценат оболелих је 3%. Процент оболелих као и ризик од озрачења се може редуковати одговарајућим техничким контролама изложености становнишва.

### 1.3.Терапијско деловање радона

Радиоактивни гас радон поред тога што је узрочник многих болести, може и позитивно деловати на организам. Огромна енергија коју радон поседује условљава бржи опоравак организма, јер утиче директно на ћелијски метаболизам. Лечење радоном је једна од најстаријих терапија којом се људи користе. Постоји неколико етапа у развоју ове терапије, укључујући и време када је ова терапија била само индиректно позната по својим позитивним ефектима тј., од око пре једног миленијума па све до првих деценија научног истраживања његових особина и нивоа концентрације у различитим минералним водама непосредно након његовог открића, па до његовог коришћења у старим и новим терапеутским установама /30,31/. Терапија радоном је посебно била развијена и изучавана у бившем Совјетском Савезу и Јапану, где је годишње било и преко милион третмана. Први третмани радонским водама изведени су још 1906. године, водом велике концентрације која истиче из рудника. У модерним радонским бањама Европе пацијенти остају и до три недеље, где поред лековите воде имају нормалну и здравију средину, и наравно имају приступ стручној медицинској помоћи. Све ово утиче на боље здравље пацијента.

Спектар индикација које указују на лечење које може бити мање или више успешно укључује:

- срчане и проблеме са циркулацијом(хипертонија),
- проблеми са циркулацијом крви,
- плућни проблеми,
- болести скелета,
- болести нервног система,
- климатски проблеми, стерилитет, гинеколошки проблеми,
- проблеми са кожом,
- гастритис и сл.

Најбољи резултати су остварени у лечењу реуматских, гинеколошких, кожных болести и хипертоније. Лечење радоном обухвата и инхалацију из природних извора или купање у води богатој радоном, испирање носа и уста, или ваздушно

излагање тела, док је све мање коришћен начин ингестије воде богате радоном /25,31-33/. Годишња ефективна еквивалентна доза за пацијенте (укључујући једну секвенцу третмана радоном), је од 0.1 до 3mSv. У зависности од стања пацијента радон се може користити и у комбинацији са другим гасовима. Према истраживањима вршеним у Русији, радон у води за купање продире у кожу и апсорбује се у ткиву, а потомци у бубрезима. Органска доза за 15 минута купања у води, концентрације око  $15 \times 10^5 \text{Bq/m}^3$ , је 0,09mSv за кожу, 0,03mSv за бубрег. Два сата након купања само 10% унетог радона остаје у телу. Његови краткоживећи потомци доприносе око 70% укупној апсорбованој дози. Медицинско особље (доктори, сестре), као и друга стручна лица могу примити дозу око 100 mSv.

## 2. РАДОН ( $^{222}\text{Rn}_{86}$ )

Радон је 1900.године открио немачки научник Фридрих Ернст Дорн. То је радиоактивни племениги гас без боје и мириса, хемијски је инертан и зато покретан на нормалној температури. Својство радиоактивности му омогућава да се лако детектује /34/. Ретко ступа у хемијске реакције са другим елементима, изузев са флуором стварајући нестабилне флуориде. Та хемијска инертност чини га корисним трасером геофизичких процеса који доводе до кретања гаса кроз земљу. Генетска веза са ураном чини га корисним у трагању за рудом урана.

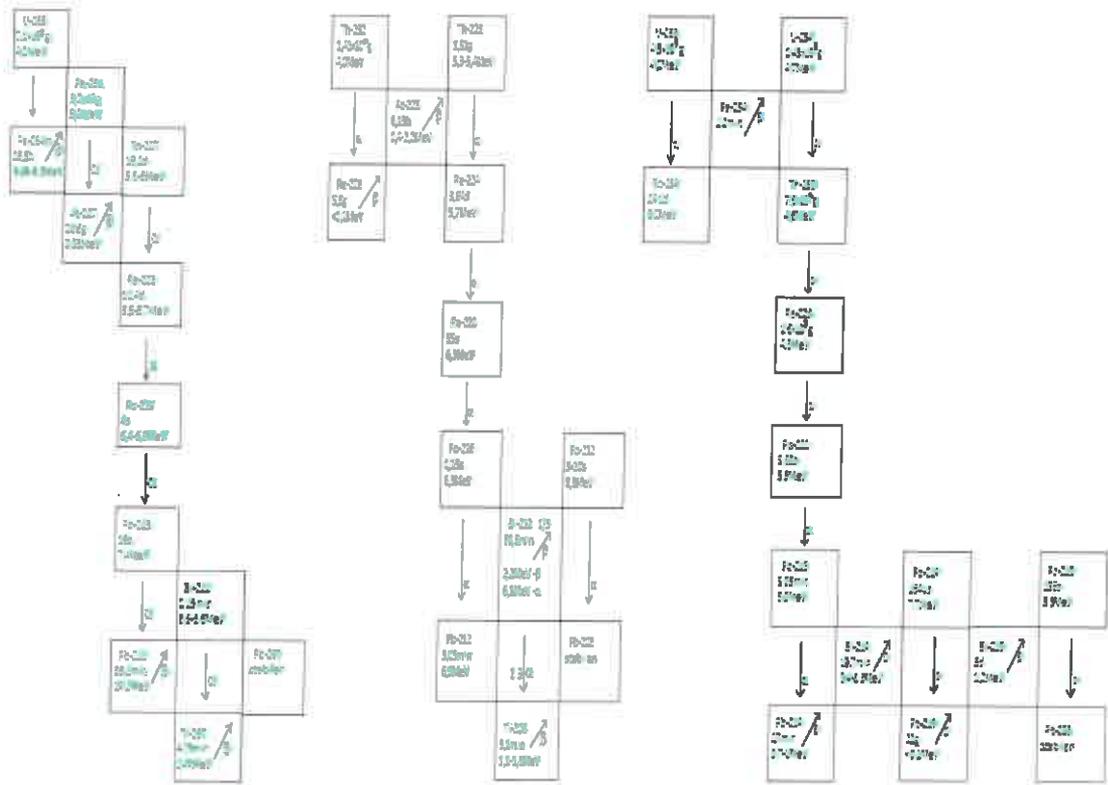
### 2.1. Физичко-хемијске карактеристике радона

Шеме радиоактивних распада  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{235}\text{U}$  дате су на слици 2.1.1., /35/. Сви чланови низа генетски су повезани и настају сукцесивним распадом првог члана, све док се не добије стабилан изотоп олова,  $^{206}\text{Pb}$ . Првих 14 чланова ове серије колективно емитују  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  радијацију. Продукти распада имају различита хемијска својства и времена полураспада довољно дуга да дозвољавају значајну сепарацију његових чланова. Степен раздвајања не зависи само од релативне временске скале радиоактивних распада, већ и од геолошких, метеоролошких, хемијских и биолошких процеса.

Радон настаје директним распадом радијума уз емисију  $\alpha$ -честице. У природи постоје три изотопа радона:  $^{219}\text{Rn}$  (актинон),  $^{220}\text{Rn}$  (торон) и  $^{222}\text{Rn}$  (радон).

Актинон ( $^{219}\text{Rn}$ ) има најкраће време полураспада од 3,9s, чиме му је одређено средње време живота на  $\tau=5,7s$ . У природи је јако слабо заступљен па зато нема значајнијег утицаја на околину.

Торон ( $^{220}\text{Rn}$ ) има време полураспада од 55,6s и средње време живота од 80,2s. Његовим распадом настају четири краткоживећа потомка:  $^{216}\text{Po}$  и  $^{212}\text{Po}$ , као  $\alpha$ -емитери и  $^{212}\text{Pb}$  и  $^{212}\text{Bi}$  који су  $\beta$  и  $\gamma$  радиоактивни. Мало време живота торона указује на краће удаљености које прелази од места настанка. Зато, у односу на радон, даје незанимљив локални допринос у укупној радијацији приликом геофизичких истраживања /34-37/.



Слика 2.1.1. Основне шеме распада радиоактивних низова /35/

Радон ( $^{222}\text{Rn}$ ) је најзначајнији изотоп. Време полураспада је 3,82дана, а средње време живота 5,51d. Гас је без боје, мириса и укуса, густине  $9,73\text{kg/m}^3$  на  $0^\circ\text{C}$  и на нормалном притиску. Температура топљења је  $-71^\circ\text{C}$ , а тачка кључања је  $-61,8^\circ\text{C}$ . Критична температура је  $104,4^\circ\text{C}$  и критични притисак износи  $63,2 \times 10^5\text{Pa}$  /38/. Има четири краткоживећа потомка:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{214}\text{Po}$ . Оба полонијума су  $\alpha$  радиоактивна, док су бизмут и олово  $\beta$  и  $\gamma$  радиоактивни, па се зато називају и 'активни талог' /9/. Гама зраци  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{214}\text{Po}$  су далеко највећа компонента и највећи енергетик урановог низа, а доприносе око 1/4 од свих природних зрачења

које долазе од Земље. Око 45%  $\alpha$ -зрачења урановог низа долази од ове групе радионуклида /35,38-40/. У свом ланцу распада радон се преко краткоживећих потомака трансформише у стабилно олово  $^{206}\text{Pb}$ , емитујући 5  $\alpha$ -честица енергије до 7,7MeV, бета зрачења до 2,8MeV и фотона гама зрачења до 2,4MeV /41,42/. У наредној табели дате су енергије  $\alpha$ -честица и њихови домети на нивоу мора на температури од 6°C /41/.

Табела 2.1.1. Енегрије  $\alpha$ -честица и домети /41/

| Радионуклиди            | Енегрије<br>$\alpha$ -честица(MeV) | Домет $\alpha$ -честица   |                             |
|-------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
|                         |                                    | Вода( $\times 10^{-4}$ m) | Ваздух( $\times 10^{-4}$ m) |
| $^{222}\text{Rn}$       | 5,49                               | 39                        | 4,08                        |
| $^{218}\text{Po}$       | 6,00                               | 44                        | 4,67                        |
| $^{214}\text{Po}$       | 7,69                               | 66                        | 6,91                        |
| $^{220}\text{Rn}$       | 6,29                               | 48                        | 5,01                        |
| $^{216}\text{Po}$       | 6,78                               | 41                        | 5,67                        |
| $^{212}\text{Po}$ (64%) | 8.78                               | 83                        | 8,53                        |
| $^{212}\text{Bi}$ (36%) | 6,05                               | 45                        | 4,73                        |

Радон припада класи тешких гасова и задржава се на различитим површинама уз образовање радиоактивног остатка. У природи се посматра као изоловани атом који је присутан у гасовитој и течной средини, кроз које се креће дифузно у оном степену који му дозвољава време полураспада. Просечно дифузионо растојање које радон пређе у ваздуху је 2,2m, са коефицијентом дифузије од  $D=0,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Пошто је инертан гас, напушта место генерисања (стена, земљиште, вода) сакупља се у већој или мањој мери у нижим слојевима атмосфере (7,5 пута је гушћи од ваздуха). Где се ствара радон и како се креће може се видети на основу табеле 2.1.2., у којој су дате просечне вредности концентрације  $^{222}\text{Rn}$  у различитим срединама/43/.

Табела 2.1.2. Концентрације радона на различитим местима на Земљи /43/

| Локација                               | Концентрација( $\times 10^6$ atom/m <sup>3</sup> ) |
|--|--|
| Ваздух изнад океана                    | 0,04   |
| Ваздух непосредно изнад површине земље | 4  |
| Просечна кућа                          | 20   |
| Земни гас                              | 20000  |
| Унутар просечног минералног зрна       | 500000   |

Највећа концентрација је у минералним зрнима, 25 пута мања у земљином гасу. Следе куће, ваздух изнад земљине површине и изнад океана. Из наведених резултата се може закључити да већина радона никада не напушта минерал у којем настаје, већ остаје чврсто заробљен унутар кристалне решетке где остаје до свог радиоактивног распада. Мали део ослобађа се пре дезинтеграције и креће кроз просторе пора земље до површине земље. У ваздуху га има зато јако мало, али у кућама као међупростору га има у већој концентрацији. Зависно од врсте и влажности тла, садржаја у њему, његове порозности и гранулације, концентрација радона на дубини од 1m може бити веома различита, иде и преко  $10^9$  Bq/m<sup>3</sup>. Одлазећи са земљине површине у слободну атмосферу радон се брзо расејава, услед чега му се концентрација смањује. Када доспе у затворен простор, његове концентрације могу бити велике и значајно зависе од вентилације датог простора /38-40/.

У воденој средини раствара се више него остали племенити гасови, а његова растворљивост у води је обрнуто пропорционална температури: што је виша температура средине, то је мање радона у води. При кључању излази из ње /34,35/.

## 2.2. Извори радона

Радон  $^{222}\text{Rn}_{86}$  се формира распадом  $^{226}\text{Ra}_{88}$ , односно урана  $^{238}\text{U}$ , што значи да његова концентрација зависи од садржаја урана у земљи и стенама /28/. Уран је саставни део Земљине коре. На Земљи је заступљен у око 0,0003%, а просечно га има од  $2\text{--}3 \times 10^{-3} \text{ g/kg}$ . Услед својих хемијских особина које му дозвољавају миграцију у природи у раствореном стању, у природи се налази у малим концентрацијама: апсорбован у минералима и земљи, најчешће стенама богатим калцијумом, гвожђем, у пукотинама са магнезијумом, или растворен у водама океана, мора, језера и река. Налази се у материнским и другим минералима, а најчешће су то магматске стене богате силицијумом, неке форме гранита и сијенита, еруптивне риолит и порфир, и вулканске стене пегматит и аплит /44,45/. Најтипичнији и најзаступљенији уранов минерал је уранинит, црни или тамносмеђи минерал велике густине, а по хемијском саставу уранов оксид ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ). По правилу, оксиди минерала садрже већу концентрацију урана него основни. Доминантне форме оксида у природи су уран-четири и уран-шест оксиди и обично су нерастворљиви. У табели 2.2.1. наведене су концентрације урана у различитим геолошким срединама и другим природним материјалима /46/.

Табела 2.2.1. Концентрације урана у природи /46/

| Материјали       | Концентрација урана (%) | Материјали          | Концентрација урана (%) |
|------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Вулкан. минерали | $4 \times 10^{-4}$      | Битуминозни шкриљци | $6,5 \times 10^{-3}$    |
| Базалти          | $2 \times 10^{-5}$      | Вода океана         | $1 \times 10^{-7}$      |
| Гранити          | $2,5 \times 10^{-3}$    | Жива материја       | $10^{-2} - 10^{-7}$     |
| Таложни минерали | $2 \times 10^{-4}$      | Метеорити           | $< 10^{-7}$             |
| Фосфат. минерали | $1 \times 10^{-2}$      |                     |                         |

Процеси формирања земље изменили су концентрацију и урана и радијума. Изложени деструктивним процесима минерали ослобађају радиоактивне изотопе. Када су стене изложене ерозији, ослобођена минерална зрна са ураном, а делом



и радијумом, апсорбована на глиеним честицама могу се транспортовати водом и таложити. Тако, глина и глиени шкриљци поседују већу концентрацију урана и радијума него друге седиментне стене, јер се добро апсорбују на аморфним телима. Примери седиментних стена са релативно високим концентрацијама урана су неке врсте црног глинца (тј. алумоглинац у Шведској и Норвешкој и Катанга глинац у САД) и седиментни наноси фосфата у Мароку, Јордану и Флориди. Међу седиментним минералима најмање су радиоактивни чисти органски и хемијски талози (камена со, гипс, анхидрит, кречњак, доломит, чист кварц, кварцни песак и различите силицијумске форме) /41/. На промену концентрације радионуклида имају утицај целокупни физички и хемијски процеси: осциловање температуре, залеђивање воде у пукотинама минерала, као и деловање биљних и животињских организама. На промену концентрације утичу и ветар, морска вода и сила теже. Ефекат дробљења минерала водом чини да се концентрације урана и радијума све више смањују, до веома малих вредности у финим гранулама земље као што је кварцни песак.

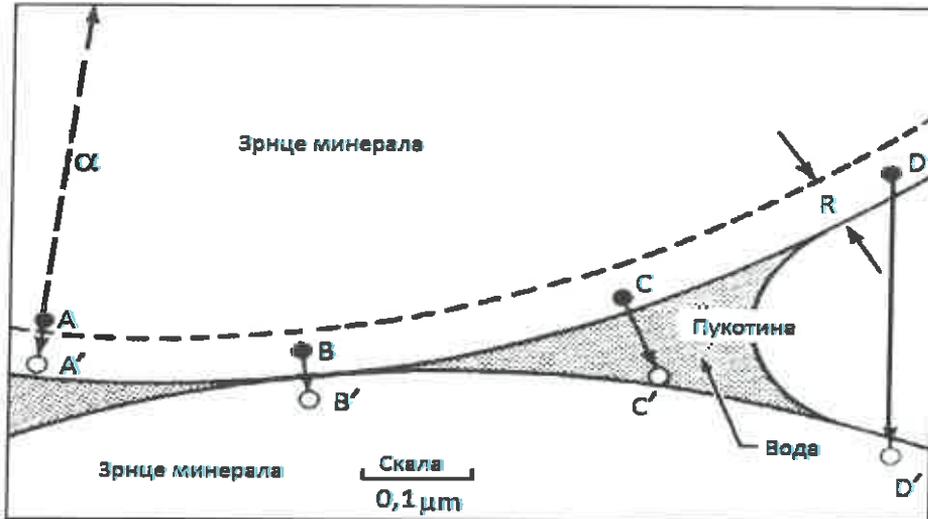
Минерали потомака урана у природи не постоје, већ се радијум налази у расејаном облику у природи. Може се премештати путем хемијских реакција растварање-таложње, тако да се на одређеним местима радијум може згуснути тако много, да се радон ствара у малим запреминама /47/.

### 2.3. Еманација радона

Основни физички процеси који доводе до еманације радона из кристалне решетке су илустровани на слици 2.3.1. Представљена су два сферна зрна промера  $2 \times 10^{-8} \text{ m}$  која се додирују у тачки В. Осенчен део представља водом испуњен простор. Дамет, R, радона је представљен испрекиданом линијом. Атоми  $^{226}\text{Ra}$  (пун круг) се распадају производећи  $\alpha$ -честице и атоме  $^{222}\text{Rn}$ , који завршавају свој пут у тачки означеној празним кругом.

Коефицијент еманације се састоји од три компоненте који потичу од директног одбијања, индиректног одбијања и молекуларне дифузије. Свака од ових

компоненти односи се на место завршетка путање атома радона у зрну минерала. Растојање, које атом радона може да пређе са места у решетки минерала или молекула где је настао у минералном зрну нормалне густине, било би од  $0,02-0,07 \times 10^{-6} \text{m}$ . То је управо кретање које омогућава атому радона да еманира из минералног зрна /48-51/.



Слика 2.3.1. Приказ путање атома радона унутар зрна минерала тла и између два суседна зрна минерала/42/

Директно одбијање се односи на атоме радона који завршавају свој пут у водом испуњеној пукотини између два суседна зрна минерала (ситуација C). Атом остаје у води, и наставља даље кретање дифузијом кроз воду, или се транспортује њоме /49/. Атоми који напуштају зрно минерала у коме су створени, пролазе кроз пукотину и продиру у суседно зрно, индиректно се одбијају и тако доспевају у пукотину, (ситуације B и D). Молекуларна дифузија се односи на оне атоме радона којима је почетак и крај путање унутар појединог зрна минерала, а који дифузијом мигрирају у пукотину између њих (ситуација A). Ако је међупростор сув и није довољно широк да заустави атом, он улази у суседно минерално зрно где се зауставља. Уколико се простор касније испуни водом, радон у интеракцији вода-стена бива понесен воденом струјом пре него што се распадне. Овај процес је веома спор, па је дифузија од примарне важности у одређивању распршености радона у подземној води и гасу. Концентрација радона у подземној води или ваздуху ( $Bq/m^3$ ), који пролази кроз порозне стене богате радоном може се изразити једначином /52/:

$$C_{\max} = \frac{A \cdot e \cdot d \cdot (1 - p)}{p} \quad (2.3.1.)$$

где је:  $C_{\max}$  - концентрација активности радона ( $Bq/m^3$ ) у запремини пора са потпуно одсутном вентилацијом;  $A$  - специфична активност радијума ( $Bq/kg$ );  $e$  - коефицијент еманације (део од целокупног броја формираних атома радона који еманира у просторе пора);  $d$  - компактна густина минерала ( $kg/m^3$ ), (за минерале земље уобичајено је  $2700 kg/m^3$ ); и  $p$  - порозност, однос запремине пора према целокупној запремини.

Величина која утиче на  $C_{\max}$  је управо порозност средине и то на следећи начин:  $C_{\max}$  се повећава ако се смањује  $p$ . Када је концентрација атома радона у јединици пора једнака оној у околним минералним зрнима, престаје дифузија атома радона у поре и они се не могу даље транспортовати. Другим речима, концентрација радона гаса у јединици запремине пора не може бити већа од концентрације у минералним зрнима.

Коефицијент еманације земље је од 1-99%, и зависи од геохемијских и метеоролошких услова. Коефицијент еманације минерала је константан и за магматске минерале је од 15-30%, за седиментне од 10-25% и за минерале рудног порекла од 30-90% /46/.

Коефицијент еманације радона са стена, делова стена, или земље зависи и од тога да ли се уран налази у решетки неуранових минерала као што су: фелдспат, магнетит, апатит, аланит или циркон, или уранових као што су уранинит ( $U_3O_8$ ), ураноторит, или кофенит ( $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$ ). Већи је коефицијент када се уран налази у решетки својих минерала, јер се они налазе често између великих зрна од кварца и фелдспата, или између слојева у биотиту, што олакшава еманацију /9/.

Колико ће створених атома еманирати из минералног зрна и ући у просторе пора зависи и од тога где се атоми радијума-родитеља налазе у зрну, састава и величине зрна, сорпције на површини зрна, садржаја воде, температуре и величине пора, при чему је већа еманација са ситнозрних материјала или више порозних /53,54/. Шансе за еманацију радона су веће ако је већа порозност материјала у којем се одвија дифузија.

Еманација радона већа је са влажне земље него са суве. Просечно се еманација повећава 2-3 пута са земље ако се садржај воде повећа од 0% на 5% /55/. Концентрација радона у ваздуху земљиних пора повећава се са повећањем садржаја воде у порама. Ако су поре испуњене 75% са водом, 25% са ваздухом, концентрација радона у ваздуху пора биће два пута већа, него када су биле потпуно испуњене ваздухом /56,57/. Уколико избачени атом радона при дезинтеграцији радијума успорава вода присутна у порама, спречава и његово продирање у решетке околних минералних зрна, па је еманација у земљи константна. Однос између концентрација радона у ваздуху и води зависи од температуре, тако да се са повећањем температуре повећава концентрација у ваздуху пора /58/.

Још један разлог за већу еманацију је да присуство воде у порама спречава сорпцију радона на спољашним површинама честица. Показано је да до сорпције радона на минералним зрнима долази само у сувој земљи. Ефекат сорпције се смањује са повећањем влажности и то тако да 10% влаге смањи сорпцију толико да се практично не може мерити. Глинене честице имају високи сорпциони капацитет, док су сорпционе вредности неких крупнозрних материјала, као кварцни песак, толико мале да се не могу мерити /50/.

## 2.4. Транспорт радона

Напуштајући минерале, радонови атоми у ваздушној средини остају као слободни атоми. Даље могу да се транспортују на два основна начина, дифузијом и струјањем ваздуха и околних гасова ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), или водом која протиче кроз хоризонталне земљине слојеве. Пошто је радон инертан елемент, и не ступа у хемијску везу са другим елементима, може да пређе значајна растојања од места настанка. Тај подземни транспорт радона могао би да се опише следећом једначином /41/:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{eff}} \Delta C - \nabla(\vec{v}C) - \lambda C + \phi \quad (2.4.1.)$$

где је:  $C$  - концентрација радона ( $1/\text{m}^3$ ) у простору пора,  $D_{\text{eff}}$  - ефективни коефицијент дифузије радона ( $1/\text{m}^2\text{s}$ ),  $\vec{v}$  - брзина ( $\text{m/s}$ ) супстанце која транспортује

радон,  $\lambda$  - константа радиоактивног распада радона (1/s) и  $\phi$  - карактеристика извора ( $1/m^3s$ ). Први део једначине описује дифузију, други конвекцију, трећи део распад и четврти део изворе радона.

Дифузија је главни начин кретања, а транспорт њоме је ограниченог домета. Са једне стране, домет ограничава време живота изотопа, а са друге стране структура средине кроз коју се креће. У различитим срединама радон дифузијом прелази различита растојања, међу којима постоји огромна разлика. То се може видети из табеле 2.4.1., у којој су дате граничне вредности коефицијената дифузије за радон у различитим срединама /3/.

Табела 2.4.1. Коефицијенти дифузије,  $D$ , за радон /3/

| Средина              | $D$ ( $m^2/s$ )                           |
|----------------------|---|
| Ваздух               | $10^{-9}$                                 |
| Облуци-крупан шљунак | $10^{-9} - 5 \times 10^{-10}$             |
| Сув песак            | $10^{-9}$                                 |
| Влажан песак         | $2,5 \times 10^{-10}$                     |
| Обрадива земља       | $5 \times 10^{-11} - 2,5 \times 10^{-11}$ |
| Глинаста земља       | $8 \times 10^{-13}$                       |
| Вода                 | $10^{-13}$                                |

Из табеле се запажа да је дифузија кроз крупни шљунак као у ваздуху, док је веома мала кроз водом натопљену глину. Ако су земљине поре потпуно испуњене водом, земља ће имати исти дифузиони коефицијент као вода. Дифузиони коефицијент воде је 10000 пута мања од дифузионог коефицијента ваздуха /3/. Просечно се радон помери 1,6m у сувој земљи ( $D = 5 \times 10^{-8} m^2/s$  за порозну земљу), а само  $1,6 \times 10^{-2} m$  у влажној земљи ( $D = 5 \times 10^{-10} m^2/s$ ). Пошто је процес дифузије одговоран за пренос радона са дубина (од 1 до 2m), до темеља кућа, познавања средњих дифузиононих растојања су важна у одређивању лимита ефективног померања  $^{222}Rn$

/3,59/. Да би испитивања дала што реалнију слику терена треба урадити велики број мерења узорака земље.

Дифузија радона кроз земљу је повезана са њеном порозношћу, односно зависи од величине дистрибутивних зрна, степена компактности структуре и садржаја воде у земљи. Већа порозност омогућава обимнији транспорт. Присутне порозне шупљине у земљи се надовезују и надграђују, што није случај код стена. Порозност земљишта се дефинише према односу величине поре-пукотине у земљишту. Постоје две веома битне компоненте: 'текстурални' простор поре и 'структурни' простор поре. Текстурални простор поре се односи на начин паковања честица земљишта, док је структурни простор поре завистан од количине ваздуха који се налази у узорцима земљишта.

Како радон има ограничени живот, велики део се распадне после известног пређеног растојања. Од радона који је еманирао са извора који се налази дубоко у земљи, и транспортује дифузијом, 90% се распадне после растојања од 0,05m у води, око 2m у песковитој земљи са уобичајеним садржајем влаге, и 5m у ваздуху /59/.

Растојања до којих може радон да мигрира су од великог значаја зато би требало обратити пажњу на промене концентрације радона изазиване струјањем ваздуха навише и наниже у земљи. Концентрација радона се повећава при струјању навише, а при струјању наниже опада. Ти утицаји су велики на дубинама од 0,5 до 1m где се уобичајено мери концентрација радона. На дубинама већим од 10m промене су безначајне, тако да се не могу експериментално препознати /60/. Близу површине земље концентрација радона се снижава скоро до нуле.

Градијент притиска може бити узрок форсираног струјања гаса или течности у међупростору у земљи, а могу га проузроковати различити геофизички и геохемијски феномени, као што су земљотреси, вулканске ерупције, подземна експлоатација нафте и урана. Те појаве могу да створе мноштво ефеката, а главни су емисија гаса, притисак, и конвекција флуида. Гасови се углавном ослобођају са складишта нафте, али могу бити створени и пресирани са топлих региона као што су вулкани /61/. У вулканима, многи гасови као  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2$  су подесни за транспорт радона, који могу допрети до површине на много

начина. Велики температурни градијент и велика дегазација су уопште уочљиви феномени унутар вулканског гротла. Када доспе у подземну воду која је била у вези са вулканом, због топлоте и  $H^+$ -трансфера, радон се ослобађа, при чему се његова растворљивост у води смањује са повећањем температуре /62/.

У свим случајевима транспорта радона земним гасом, радон је крајње мала компонента гаса ( $37,4Bq/m^3 = 0,7 \times 10^{-5}Rn/m^3$ ). Значи, радон путује као минорна компонента земног гаса, у поређењу са кисеоником, азотом, угљен диоксидом, итд. Процењено је да брзина транспорта радона не може да буде већа од  $(4-6) \times 10^{-5}m/s$ . Са том брзином може да пређе 3-5m дневно /50,63-66/.

Повећане концентрације радона често се налазе изнад зона фрактура стена, где се јони урана или радијума растворени у подземној води наталожили на површини пукотина, одакле распадом радијума еманира радон. На тим местима су повећани нивои  $CO_2$  и често хелијума. Овим гасовима би могао радон да се транспортује до површине земље из пећина и пукотина стена /61,67/. Ваздух се транспортује ван пећина због промене притиска и температуре /68,69/. Струјање ваздуха у површинском делу земље и на самој површини може бити изазвано и флукуацијама атмосферског притиска или последица временских прилика, као што су ветар, киша, топљење снега.

Са друге стране, подземне воде могу периодичним подизањем нивоа да преместе руде урана, тако да на новој локацији буде више руда него на месту порекла налазишта. Претходно место минерализације и ново стварају две области извора радона са истог рудног тела. Са потпуно алкалним водама, као што је у активним карстним просторима, радијум  $^{226}Ra$ , исто као калцијум, баријум и стронцијум, може лако да се транспортује. И неке локалне структуре, као различити слојеви, пукотине или разломи могу бити узрок погрешне детекције налазишта руде урана на основу мерења радона. У таквим околностима, техника мерења радона не даје праве информације о налазиштима урана.

### 3. РАДОН У ЗЕМЉИШТУ

Земљиште представља површински слој Земљине коре у коме се непрекидно одвијају динамички процеси под утицајем климатских, биолошких, физичко-хемијских фактора, а пре свега људске активности /6/. Састоји се од минералне (неорганске) као и органске компоненте која углавном настаје распадом биљног материјала. Неорганска или минерална компонента земљишта се састоји од честица насталих ерозивним дејством разних природних фактора на стене. Како стене које улазе у састав земљине коре поседују одређену концентрацију природних радионуклида, треба очекивати да се могу наћи и у земљишту насталом распадањем стена. Вертикална дистрибуција распаднутог материјала је најбржа у песковитом земљишту, а најспорија у глинама. Радионуклиди се акумулирају углавном у површинском слоју земљишта, на дубинама од 0,05m /2/.

Дифузија радона, као најзаступљенијег радионуклида-потомка радијума, унутар матрице тла значајно зависи од порозности и моћи апсорпције тла. За одређени хемијски састав тла и конфигурацију путева унутар тла, радон не може да дифундује пре него што се распадне у метални  $^{218}\text{Po}$ , који остаје скоро комплетно непокретан у тлу /70/. Ако је земља пропустљива, попут пешчара, гас радон створен у стенама које леже испод, лако се транспортује навише кроз земљу, посебно кроз зоне пукотина и фрактура слојева. Присуство подземних вода, или влаге смањују концентрацију са дубином /71/. Концентрација радона повећава се са дубином и може достићи максимум на дубини од око 2m у земљи. Присуство урана у многоме повећава концентрацију радона у земљишту /72/.

Концентрација радона  $C(z)$  са дубином  $z$  у земљи може се описати теоријски једначином /73/:

$$C(z) = C_0(1 - e^{-kz}) \quad (3.1.)$$

где је  $C_0$  - константа и



$$k = \frac{v}{2D\varepsilon} - \sqrt{\frac{v^2}{4D^2\varepsilon^2} + \frac{\lambda}{D}} \quad (3.2.)$$

где је:  $v$  - брзина струјања (притицања),  $\varepsilon$  - порозност земљишта,  $D$  - коефицијент дифузије,  $\lambda$  - константа радиоактивног распада радона ( $7,55 \times 10^{-3} 1/h$ ).

Уочено је да се директним мерењем концентрација радона у земном гасу јавља велики распон вредности концентрација радона. Као алтернатива овим мерењима користи се метод израчунавања максималне концентрације активности  $C_{\text{max}}$ . Да би се израчунала максимална концентрација, треба одредити порозност, компактну густину и еманацију радона из земљишта на месту мерења /40/ .

Брзина притицања радона из земљишта јако утиче на концентрацију у земном гасу. До оптималних резултата се долази приликом мерења на дубини од  $1m$  /71,74,75/, где концентрација радона има неки релативно константан ниво-70-80% од равнотежне концентрације.

На малим дубинама концентрација трпи огромне промене услед метеоролошких промена на земљи /76-78/. Атмосферски притисак утиче тако да се ексхалација радона из земље смањује са повећањем притиска и обратно. Ветар изнад површине земље редукује концентрацију радона у земном гасу. Та редукција је већа ако земља има већу пропустљивост, као што су песак и шљунак у којима утицај ветра може да буде до дубине од  $1m$ .

Промене концентрације радона у земном гасу могу бити краткотрајне и дуготрајне. Краткотрајне су условљене дневним променама температуре. Дуготрајне су условљене параметрима сезонског карактера. Један од могућих фактора који утиче на сезонску промену концентрације радона је подземна вода, чији су нивои већи у јесен и зиму, а други је температура /78/. Највећа концентрација радона је у време топљења снега и у зимско време, када је излаз из земље у атмосферу посебно отежан, пре свега због нарушене проходности капилара земље. Утицај подземних вода је незнатан на пропустљиве земље, али је важан на глинасте. Када је глина сува има пуно пукотина и већу концентрацију радона /79-83/. Сезонски утицај може бити промењен ако је придружена сеизмичка активност.

## 4. РАДОН У ВОДИ

Концентрација радона у води у површинском слоју земље је обично од  $10\text{-}200 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ , док у подземним водама концентрација иде и преко  $10^6 \text{ Bq/m}^3$ , и то у пукотинама стена богатих ураном. При нормалној употреби такве воде може се очекивати и значајан продор радона врло високих концентрација из воде у домове.

### 4.1. Радон у подземној води

Подземна вода има концентрацију радона чији максимум зависи од порозности и коефицијента еманације одговарајуће земље. Када је вода у директном контакту са минералним честицама које садрже радијум, настали радон може ефектом узмака да буде убачен у воду. Радон који са земље одлази у поре са водом, дифузијом прелази мала растојања пре дезинтеграције. Ако је подземна вода проточна он наставља даље кретање /74/. Ниво концентрације радона у води далеко је већи од концентрације у гасу који је у контакту са том водом. Нађена је концентрација радона у води од  $1,9 \times 10^6 \text{ Bq/m}^3$ , а у додирној гасовитој фази  $150 \text{ Bq/m}^3$ . Концентрација радона може да буде велика у води у пукотинама стена, и то много пута већа него у самој стени, што је карактеристично за гранит, где концентрација урана износи  $148 \text{ Bq/kg}$  /49/. Концентрација активности радона у стенама гранита је  $400000 \text{ Bq/m}^3$ , а у води у пукотинама може да достигне вредност од 10 милиона  $\text{Bq/m}^3$ . Ова разлика концентрације у стени и у пукотинама није последица дифузије радона са гранита, већ је настала таложењем урана и његових потомака на површинама пукотина стена кретањем подземних вода. До тога је дошло или због хемијске реакције са минералима на површини пукотина, или због слабе растворљивости нуклида потомака. Нађено је да концентрација урана на тим површинама може да буде 3 - 20 пута већа него у околној стени и у води /78/. Зато је материјал са површина пукотина

и напуклина богат радијумом, са којег радон може директно да еманира у воду у пукотинама. Други разлог би могао да буде много пута већа концентрација радона у засебним зрнима уранових минерала са којих радон дифундује у воду. Како је порозност стене веома мала, концентрација радона у постојећим околностима може да буде 10 - 100 пута већа у води, него у стени. У табели 4.1.1. дати су интервали концентрација радона и радијума у подземној води у различитим околинама /81/.

Табела 4.1.1. Концентрација активности радона и радијума у подземним водама /81/

| Подземне воде          | $^{222}\text{Rn}$ ( x $10^3$ Bq/m <sup>3</sup> ) | $^{226}\text{Ra}$ ( x $10^3$ Bq/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------|--|--|
| Језерска и морска вода | < 2  | 0,0005-0,007                                     |
| Копани бунари:         |  |  |
| Уобичајено             | 10-300   | 0,001-0,09                                       |
| Гранит богат ураном    | 40-400   |  |
| Бушени бунари:         |  |  |
| Седиментна стена       | 10-50  |  |
| Кристална стена        | 70-500   | 0,01-0,25  |
| Гранит богат ураном    | 500-4000 (max 57000)                             | max (0,35-2,5)                                   |
| Перматит богат ураном  | max (15000-28000)                                |  |
| Наноси руде:           |  |  |
| Рудник руде гвожђа     | 50-300 (max 600)                                 | 0,1-6  |
| Уранове руде           | 2000->100000                                     |  |

Логично је очекивати да концентрација у води у пукотинама стена које су са високим садржајем урана буде висока. То, међутим, није увек тако. На пример, упркос високим садржајима урана у алумоглинцима, велика концентрација радона у води у простору алумоглинаца је редак случај. Ипак, се може рећи да је концентрација радона у подземним водама најчешће мала, у просторима где је мала концентрација урана у стени (диориту, даброу, у основним вулканским стенама, у кречњаку, пешчару и глинцу), са извесним изузецима.

У многобројним истраживањима запажена је условљеност између нивоа концентрације радона и количине падавина. Чак и мале количине кише могу изазвати пораст радона. Разлози су у растворљивости радона у води, продирању у мале поре разних стена и земљишта, њиховом испирању и растварању. На тај начин радиоактивни материјали садржани у разним стенама у земљишту долазе до површине земље. Растворљивост радона у подземним водама има великог утицаја на транспорт радона из тла на површину земље, а самим тим има утицај на нивое природног фона. Познато је да растворљивост радона у води расте са опадањем температуре воде. У периодима хладног времена, када тло није замрзнуто, присуство радона у подземним водама јако је наглашено /74/.

Због нестабилности радона, контаминација њиме се јавља првенствено у подземним, не површинским, изворима воде, јер под земљом, ова вода се креће кроз стене које садрже природни уранијум који се у њој ослобађа /2,36/. Али није установљено да је радон ослобођен из подземне воде у земни гас био узрок повећаној концентрацији радона у зградама. Прво, концентрација радона у земном гасу је много већа него у води испод, а друго што су земљине поре у слоју непосредно изнад водене површине пуне водом, па због ограниченог живота радона и малог коефицијента дифузије такве земље, радон прелази мало растојање. Али, велика концентрација радона у згради може бити последица непосредне близине подземне проточне воде, која у себи има висок ниво концентрације радона. Радон би у том случају могао да се ослободи струјањем воде и да се потом транспортује до зграде, али само ако је концентрација радона у подземној води много већа него у земљи и ако вода струји према површини.

#### **4.2. Радон у води за пиће**

У многим земљама, вода из подземних извора (извори, бунари, поткопи/водоравни отвори и бушотине) се користи у домаћинству. Вода за пиће сме, по правилу, садржати радионуклиде /25,83,84/. Вода за општу потрошњу има мало радона, зато што се претходним одговарајућим третманима у отвореном простору ослобађа радон, а и зато што су извори велики водени басени.

Препоручене референтне вредности за  $\alpha$ - нестабилне радионуклиде у води за пиће износе  $0,1 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , а за  $\beta$ -нестабилне  $10^3 \text{Bq/m}^3$  /83/. Веће вредности концентрација ових радионуклида не значи и њихову неподобност за коришћење. Просечна, препоручена концентрација радона, као једног од веома присутних  $\alpha$ -радионуклида у водама које се у оквиру градске мреже користе, а добијају се из површинских вода, су мање од  $0,4 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . Уколико се снабдевање водом врши из врела подземних вода препоручена доза је око  $20 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  /2,36,58/. Концентрација од  $37 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  често је у води из артешких бунара.

Садржај радона у природним водама је различит и варира у широким границама. У обичним питким и речним водама је око  $3,7 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , у морској  $1,1 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . Концентрација од  $0,37 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  карактеристична је за језера и реке, од  $3,7$ - $370 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  за подземне воде. Нижа граница концентрације радона у радоновим водама је од  $180$ - $380 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , а у веома високорадоновим изнад  $4500 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  /81/. Вода из артешких бунара садржи далеко више радона, него из копаних. Копани бунари су, углавном, извори воде која се користи у домаћинству и на мањим су дубинама у земљи од артешких. У табели 4.2.1. дат је пример у којем се види разлика у концентрацијама радона и радијума у водама из копаних и артешких бунара.

Табела 4.2.1. Концентрације  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{226}\text{Ra}$  у води за пиће /81/

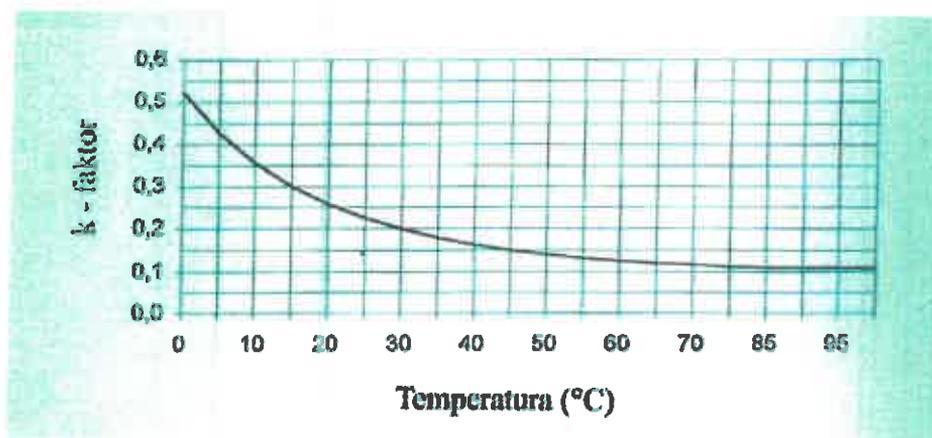
| Снабдевање водом | Број | $^{222}\text{Rn}$<br>( $\times 10^3 \text{Bq/m}^3$ ) | $^{226}\text{Ra}$<br>( $\times 10^3 \text{Bq/m}^3$ ) |
|------------------|------|--|--|
| Копани бунари    | 690  | 4-1600   | 0,004-0,3  |
| Артешки бунари   | 570  | 4-44000  | 0,004-7,5  |

Треба рећи, да се извори радона, радијум и уранијум, не налазе увек у непосредној близини бунара и врела. Вода која се акумулира у бунарима и врелима може потицати са великих удаљености, која на свом путу пролази кроз један или више извора радијума. Тако да се извори радона могу налазити и јако далеко од места узорковања. Препорука ових истраживања је аерација воде пре употребе, јер се велики део становништва снабдева водом из сопствених бунара /84-88/.

Истраживања која су последњих година рађена, а и на основу препоруке US-EPA (United States Environment Protection Agency) горња граница концентрације радона у води која се сме користити у домаћинству је  $11 \times 10^6 \text{Bq/m}^3$  /87,88/. Са друге стране, према одлуци Европске Комисије из 2001.године дозвољена горња граница је  $10^6 \text{Bq/m}^3$  /89/. Изнад ових вредности предузимају се одговарајуће мере заштите, а посебно уколико је измерена концентрација радона изнад, или око  $10^6 \text{Bq/m}^3$ .

#### 4.3. Процес преласка радона из воде у затворен простор

Радон је 'аквафобик' - радије би био у ваздуху него у води и тако повећава своју концентрацију у њему /58,74,72,87-89/. Радон у гасовитом стању је средње растворљив у води. Под дејством Ван дер Валсових сила ствара метастабилне структуре, тзв. клатрате ( $\text{Rn} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) у којима је атом радона поларизован деловањем јаког диполног момента молекула воде. Однос концентрација радона у ваздуху и води је температурски зависна величина и назива се Освалдов коефицијент трансфера,  $k$ . Утицај температуре на вредност фактора дат је на слици 4.3.1.



Слика 4.3.1. Утицај температуре на вредност фактора трансфера,  $k$  /58/

Опадањем температуре количина радона у води расте, али се зато повећава коефицијент  $k$ . Математички облик је:

$$k = \frac{C_w}{C_a} \quad (4.3.1.)$$

где су  $C_w$  и  $C_a$  концентрације радона у води и ваздуху, респективно и изражавају се у  $Bq/m^3$ . У температурском опсегу од  $10^\circ C$  до  $30^\circ C$  утицај коефицијента је мали, вредности око 0,3, да би при температури од  $0^\circ C$  имао максималну вредност од 0,5. Уколико су пукотине у земљи или стенама у потпуности испуњене водом, ослобођен радон се комплетно раствара у води.

Ако се посматра однос концентрација радона у води и у ваздуху у затвореним просторијама, њихов међусобни однос се назива коефицијентом трансфера,  $T$  и представља обрасцем /58/:

$$T = \frac{\overline{\Delta C_w}}{C_a} = \frac{We}{\lambda V} \quad (4.3.2.)$$

где је:  $\overline{\Delta C_w}$  промена концентрације радона у ваздуху у унутрашњости просторије услед коришћења воде (разлика у концентрацијама радона пре и после употребе воде), и  $\overline{C_w}$  концентрација радона у води;  $W$  представља просечно време коришћења воде,  $e$  ефикасност трансфера радона из воде у ваздух,  $\lambda$  ниво промене у ваздуху,  $V$  запремина стана.

Експериментална истраживања утицаја радона из воде на концентрације радона у кућама, уз уважавање типичних вредности за количину коришћене воде, карактеристике куће и начин вентилације, дају просечну вредност фактора трансфера од  $10^{-4}$ . Да би се добили што поузданији подаци, вршило се 24-сатно праћење дешавања на одређеним локацијама и мерење концентрације радона у просторијама обављало се пре и након коришћења воде. Иако су у већини случајева концентрације радона у води биле изузетно високе, средње вредности  $239 \times 10^3$

Bq/m<sup>3</sup>, уочено је знатно повећање концентрације након коришћења воде у испитиваним објектима, на било који начин (кување, прање, туширање,..). Истраживања показују да након тридесето-минутног туширања вредности концентрације радона су се промениле од 71 Bq/m<sup>3</sup> на 4420 Bq/m<sup>3</sup> /22/. Нагли пораст је последица емитоване енергије α-распада радонових потомака, која достиже максимум неколико минута након затварања туша. Ова нагла промена концентрације радона у купатилу, условиће пораст концентрације радона и у кући за дужи временски период. Када се начини проветравања узму у обзир и комбинацијом са одређеним вредностима коефицијента трансфера, могу се добити оптималне вредности концентрација /58/. Увиђа се да радон присутан у води даје одређени допринос концентрацији радона у затвореном простору. То значи да радон присутан у ваздуху у просторијама је ипак последица његовог продора из земље, или самих зидова објекта него из воде /58,81/. Само у случајевима веома високих концентрација радона у води може се говорити о његовом значајном доприносу концентрацији у домовима /21,90,91/.



## 5. РАДОН У ВАЗДУХУ

Генерисање радона, његов транспорт и продирање, су веома комплексни процеси. Због релативно дугог времена полураспада, радон може да борави релативно дуго у атмосфери пре него се распадне. На тај начин он учествује у турбулентном преносу кроз атмосферу и може да доспе и до њених виших слојева и пређе велика растојања. Такође и сезонске промене метеоролошких услова утичу на варијацију концентрације радона у ваздуху, као и на концентрацију природне радиоактивности у ваздуху уопште, а то су пре свега вертикални градијент температуре и брзина ветра на месту посматрања. Заједно са земним гасом може улазити на разне начине у куће и тако повећавати своју концентрацију у њима. Промена нивоа концентрације радона која је изазвана метеоролошким променама споља може условити промену концентрације радона у унутрашњости објеката.

### 5.1. Радон у атмосфери

Напуштајући земљу, гас радон се разређује атмосферским ваздухом до безначајних вредности већ на висини од пола метра изнад земље. Средња садржина у ваздуху близу површине земље приближно је  $1 \text{ atom}/10^{-6} \text{ m}^3$  ваздуха /9/, а концентрација у опсегу  $8\text{--}14 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Мада истраживања показују и супротно: у условима интензивног премештања ваздуха, струје разносе радон-гас са места напуштања земље, и тако на неким местима условљавају и концентрације и преко  $100 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Уопште, концентрација у приземном слоју ваздуха веома је променљива и разликује се за неколико редова величине од  $10^{-4} \text{ Bq}/\text{m}^3$  до  $74 \text{ Bq}/\text{m}^3$  /29/. Тако велике амплитуде осциловања степена радиоактивности својствене су само за ваздушну средину. Ступајући у ваздушну средину, радон се разноси хоризонталним и вертикалним струјама у разним правцима, при чему је запажено да промена концентрације радона и његових потомака у већем степену зависи од вертикалних струјања него од

горизонталних. Са друге стране, услови који доводе до промена концентрације радона, не морају на исти начин да утичу и на његове потомке у тој средини.

Дневна промена концентрације радиоактивности у атмосфери је сложена функција низа утицаја, али је суштинска промена у приземном слоју повезана са неким доминантним процесом у датом моменту. Максималне вредности радиоактивности ваздуха су у јутарњим и ноћним часовима, а минималне у поподневним. Рано ујутру, пре изласка Сунца, температурска инверзија спречава вертикално струјање што доводи до екстремно стабилне атмосфере, и појаве јутарњег максимума. После изласка Сунца, почиње загревање тла, што подиже температуру приземних слојева атмосфере. Настаје температурска инверзија и успостављају се вертикалне ваздушне струје, што је последица изједначавања концентрације радона по висини, односно његово умањење у приземном слоју. Касно поподне расте стабилност атмосфере што доводи до пораста концентрације радона у приземном слоју. На тај начин, концентрација радона у приземном слоју ваздуха је у обрнутој зависности од температуре /9/.

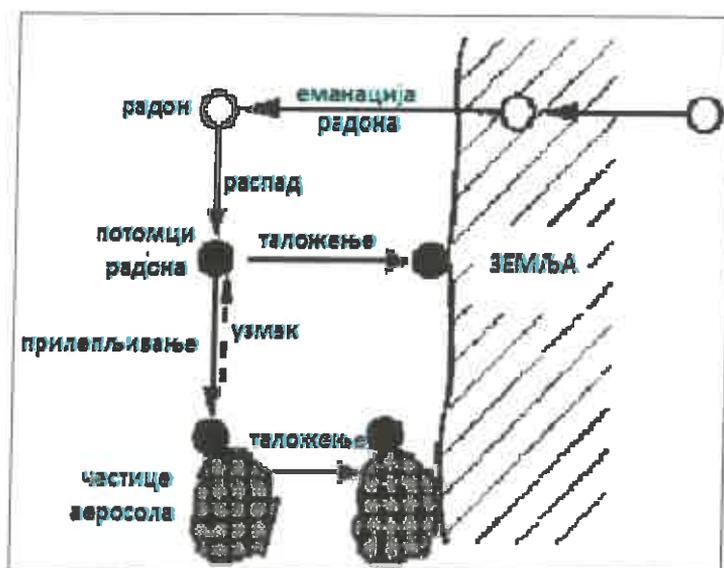
До значајног смањења нивоа радиоактивности ваздуха долази за време јаког и дуготрајног ветра. Нагло снижавање нивоа концентрације радона настаје при стварању леденог покривача на површини земље, падању снега или обилних киша, који ограничавају емисију гасова из земље, а повећавају акумулацију радона у земном гасу. Према тим условима, мала концентрација радона у ваздуху је у зимском периоду и у периоду јесењих и пролећних залеђивања површине земље, због спречавања ексхалације радона густим снежним покривачем.

Утицај на концентрацију радиоактивних гасова у приземном слоју ваздуха имају температура и барометарски притисак. Повишена температура ваздуха и снижени барометарски притисак стварају повољне услове за емисију радона из земљиног покривача. Повећање концентрације радона у приземном ваздуху са порастом температуре спољашне средине објашњава се њиховом лакшом емисијом из земље због ослобађања њених капилаара од влаге /41,46/.

Велика разлика у радиоактивности ваздуха је над океаном и континентом - над океаном је за три реда величине мања од оне над континентима, а некад и још мања.

Промена концентрације радона у атмосферском ваздуху не повлачи за собом аутоматски, и промену концентрације његових потомака. Опште је познато да су продукти распада радона углавном позитивно наелектрисани, од 80 до 85% њих, и хемијски врло активни. Они интерагују са негативним јонима присутним у атмосфери стварају и природне радиоактивне аеросоле. Повишена релативна влажност ваздуха ствара повољне услове за појачану кондензацију водене паре и сорпцију радиоактивних продуката распада еманацијама на честицама водене паре. Настали активни аеросоли таложе се под дејством гравитационог поља на површини земље, где се задржавају на растињу, а и лагано продиру у унутрашњост тла /42,92/. Тиме се нарушава равнотежа између радона-родитеља и потомака.

На слици 5.1.1. представљени су поједностављени механизми еманације и распада радона, и везивање потомака са аеросолима и површинама и супротан процес, узмак радона и потомака са аеросола и површина, и распад. Овде су занемарени јонизација, електростатичке силе, гравитација, струјање ваздуха и други важни процеси укључујући транспорт радона и његових продуката распада /93/.



Слика 5.1.1. Основни процеси који утичу на равнотежну активност радона и његових потомака /93/

При повишеној температури ваздуха, када се концентрација радона брзо смањује услед појачаних турбуленција ваздуха, концентрација радиоактивних аеросола у приземном слоју се увећава. При ниским температурама, од  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ , такође се запажа релативно повећање радиоактивности аеросола атмосферског ваздуха на умањење концентрације радона /42/. Највећа концентрација радиоактивних аеросола је при релативно великој влажности, док је у летњем периоду приметно њихово смањење у ваздуху.

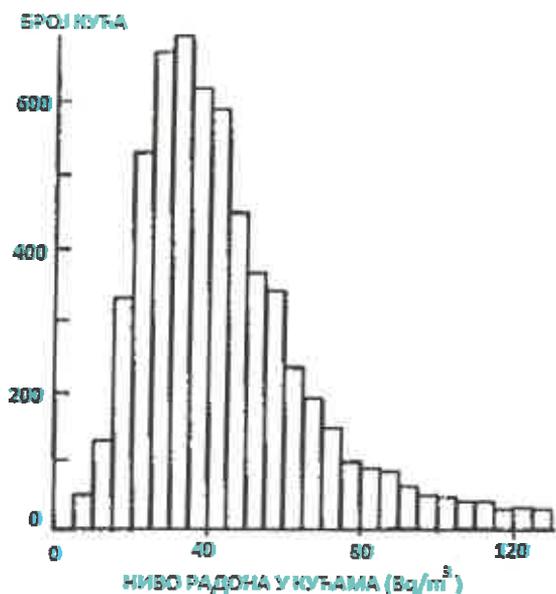
## 5.2. Радон у затвореном простору

Концентрација активности радона у затвореним просторима може варирати од неколико  $\text{Bq/m}^3$  до више од  $10^5\text{Bq/m}^3$ . Уобичајене концентрације радона у затвореном простору у већини европских земаља су између 20 и  $80\text{Bq/m}^3$  /94/. На концентрацију радона у зградама утиче низ фактора, као што је садржај радијума у земљи испод зграде, пропустљивост земље, конструкциони грађевински материјали.

Појава, али и промена концентрације радона у затвореном простору (кућама и зградама) је последица његовог уласка у куће са земним гасом кроз пукотине у бетонским подовима и зидовима, кроз празнине између пода и плоча, и око одвода и цеви, и кроз мале поре у зидовима од шупљих блокова. Због тога нивои радона су обично већи у сутерену, подрумима и приземљима. Радон се такође ослобађа са конструкционих материјала зграде и тако утиче на промену концентрације у унутрашњости /25/. Концентрација радона у вишеспратницама опада од подрума до последњег спрата за око 20% по спрату /94/. Истраживања показују да је већа концентрација радона у приземним кућама, него у вишеспратним стамбеним зградама /9,95-98/. Разлог је директан контакт кућа са земљом.

Статистичким путем установљено је да је дистрибуција радона у зградама логаритамска и зависи од неколико фактора: концентрације радијума у земљи, пропустљивости земље, броју и величини улазних путева радона, притиску у згради и вентилацији зграде /99-102/.

Дистрибуција радона у просечним кућама је представљена на слици 5.2.1. Ретко је концентрација радона једнака нули, а од средње вредности према мањим и већим, дистрибуција иде косо /103/.



Слика 5.2.1. Типична дистрибуција радона. Средња вредност концентрације је  $40\text{Bq/m}^3$  /103/

У многим земљама су на основу гео-метеоролошких и грађевинско-техничких услова усвојене максимално дозвољене вредности концентрације радона и његових потомака (интервентни нивои) у домовима /104/, и сврстане у три опште категорије нивоа концентрације активности радона:

I-низак, испод  $200\text{Bq/m}^3$ ,

II-средњи, између  $200\text{-}600\text{Bq/m}^3$  и

III-висок, изнад  $600\text{Bq/m}^3$ .

За школе и предшколске установе максималне концентрације су  $200\text{Bq/m}^3$ , а горња граница концентрација у радном простору је  $600\text{Bq/m}^3$  /105-107/.

### **5.2.1. Земља и стеновито тло испод зграда као главни извори радона**

Земља и стене испод зграда су главни извори радона. Да би они били значајни извори, требало би да је концентрација урана у њима преко 50%, посебно, ако су стене дубоко доле у земљи (дубље од 100m) /95/. Ако је земља пропустљива, попут пешчара, гас радон створен у стенама које леже испод, лако се транспортује навише кроз земљу. Присуство подземне воде, влажна глина или друга непропустљива земља су средине које мање, или више спречавају транспорт радона навише. Посебан допринос извору радона дају зоне пукотина и фрактура слојева, преко којих се гас ефективно транспортује навише. Може се десити, да преко зона фрактура проблем са радоном има само по нека кућа, која лежи директно на фрактури. Са друге стране, радон се са земним гасом увлачи у кућу и услед разлике у температури, притисцима у и ван ње.

Последњих година велика се пажња поклања едукацији становништва о начину заштите од зрачења и елиминисању утицаја радона у кућама. Уколико је подлога, земљиште са изузетно високим садржајем радионуклида, говори се и о изградњи нових кућа на другим локацијама, као и друге грађевинске сруктуре /105/.

### **5.2.2. Грађевински материјали као извори радона**

На концентрацију радона у зградама до другог спрата доминантан утицај има земљиште (хемијски састав, физичке и водно-механичке особине, порозност тла), а на вишим спратовима значајан је утицај грађевинског материјала /25,104/. Сви грађевински материјали у већој или мањој мери садрже природне радионуклиде у зависности од геолошког састава локалитета са кога су узети за експлоатацију, као и од технолошког процеса њихове обраде. Зато су и потенцијални извори радона и сматрају се примарним изворима радона у зградама. Материјали који садрже високу концентрацију  $^{238}\text{U}$  и  $^{226}\text{Ra}$  су неки гранити, алумоглинци, отпадни материјали из рудника и пепео. Могуће је увек да се нађу различити типови

локалних стена и земље (глина) са богатим садржајем урана који се користе као грађевински материјали, код којих концентрација може бити и неколико хиљада  $Bq/m^3$  /108/. Када се ради о мермерним плочама, које се последњих година све више користе у изградњи, како пословних тако и стамбених породичних објеката, присуство радионуклида у потпуности потиче од средине у којој су настали, пошто се њихова обрада своди само на механичко резање и брушење природних блокова /109/. У пракси се показало да црвени гранити садрже високе концентрације  $^{226}Ra$  и  $^{232}Th$ , реда величине  $137Bq/kg$  и  $334,8Bq/kg$ , респективно. Црвени, црни и сиви мермер такође имају повећану концентрацију  $^{226}Ra$  у интервалу од 22,8 до  $44,8Bq/kg$ . Зато се одговарајућим гамаспектрометријским анализама могу детерминисати услови и начини коришћења ових материјала.

У неким посебним ситуацијама, радон може бити ослобођен из камених подлога које су саставни делови камина или соларног система за грејање.

### **5.2.3. Вода као извор радона у кући**

Осим грађевинског материјала и питка вода која се црпи како из подземних извора, тако и површинских извора представља потенцијални, секундарни, извор радона у кућама. Природни ток воде испод површине земље је такав да она често пролази кроз стене богате природним ураном који отпушта радон у воду. Вода са таквих извора нормално да садржи много веће концентрације радона него површинске воде, као што су језера и реке. У површинским водама концентрација радона је просечно око једне десетине концентрације радона у подземним водама. Тако да је њихов утицај на ниво радона у кућама мали /15,36,74/.

Ако је кућа у непосредној близини подземних вода високе концентрације радона, ослобођен радон из њих може утицати на повећање нивоа радона унутар просторија. Ако се пак користи у домаћинству (кување, прање, туширање) може се очекивати одређено повећање нивоа радона у кући. Значи, сваки пут када се вода употреби у кући, радон се ослобађа и заједно са радоном који се налази унутар просторије

доприноси повећању концентрације, као и повећању ризика од појаве карцинома удисањем /15,58,74,84,87,70,71,110,111/.

### 5.3. Дистрибуција радона унутар куће

До дистрибуције, кретања радона унутар кућа обично долази када је извор радона појачан у једној соби, или у једном делу куће, одакле се струјањем ваздуха преноси у друге делове куће. Довољно је да једна врата буду стално отворена, или затворена, да би се утицало на транспорт радона унутар куће. У простору у коме нема вентилације, или је веома мала, радон остаје у њему практично 'заробљен'. Ако се просторије посматрају на овај начин, подрум има највећу концентрацију радона, зато што се најмање проветрава и што је у директном контакту са земљом, која је најснажнији извор /111/. Однос средњих вредности дистрибуције радона на спрату и у приземљу је 0,8, које потврђује чињеницу да је већа концентрација радона у нижим деловима куће /96/.

Како је радон гас, вентилација у кући је важан фактор који утиче на његове нивое. Ако је проветравање повремено са краткотрајним отварањем прозора, после затварања прозора, концентрација радона нагло порасте у соби /26/. Веза концентрације радона унутар и ван затворених просторија, вентилације и јачине ексхалације (флукса радона) може се представити у аналитичкој форми, и изражава се у  $Bq/m^3$ :

$$C_{Rn} = \frac{(LC_{Rno} + J)}{\lambda + L} \quad (5.3.1.)$$

где је:  $C_{Rn}$  концентрација радона у затвореном простору ( $Bq/m^3$ ),  $C_{Rno}$  концентрација радона у отвореном простору ( $Bq/m^3$ ),  $L$  јачина вентилације (1/s),  $J$  јачина ексхалације ( $Bq/sm^2$ ) и  $\lambda$  константа радиоактивног распада (1/s).



Временске прилике споља утичу да ефекти вентилације буду различити. Ако је споља мала брзина ветра, нема ваздушних промена у кући и повећава се концентрација радона /112,113/. Уколико се на неки начин мења однос притисака ваздуха у и изван кућа долази до интензивнијег продора земног гаса у кућу, а са њим и радона. А такође и температурске промене утичу на променљивост концентрације радона у кући.

## **6. МИНЕРАЛНЕ И ТЕРМОМИНЕРАЛНЕ ВОДЕ**

Извори подземних минералних вода, формирају се претежно у највишем делу литосфере, на дубинама 300-600m /114,115/, након сложеног узајамног дејства вода-стена. Подземне воде долазе у директан контакт са стеновитим масама хетерогеног састава и растворљивости (магматске, седиментне, метаморфне), и чине да минералне воде буду сложеног хемијског састава и минерализације. Метаморфне стене, као што су филити, и дубинске магматске стене, гранити, диорити, садрже карбонате подложне брзом распадању под дејством подземних вода. Како је њихова пропусност јако мала вода се креће дуж пукотина и расцепа. Вулканске стене карактерише различита водопрпусност, која произилази из саме структуре стена. Од њихове геолошке старости зависиће и порозност као и пропусност терена. Седиментне стене чине шкриљци, аргалити, алеврити и неке ситнозрне класичне стене, пешчари као и карбонатне стене. Пропусност као порозност терена зависи од самог састава стена, али оно што је заједничко за све ове појавне облике седимената је присуство сланих вода на тим теренима.

Минералне воде се одликују покретљивошћу и способношћу да обнављају своје резерве. У њима је присутно више од 70 елемената у виду простих јона, недисосованих молекула, гасова, колоида и суспендованих честица. Велики утицај на квалитет и количину подземних вода имају шуме. Слој шумске стеје не дозвољава да се падавине брзо оцедје низ стране и да брзо испаре, већ да што дубље пониру и чиме се вода обогаћује минералним састојцима.

Минералне воде одувек су побуђивале пажњу веома широког круга како истраживача, тако и корисника, јер захваљујући својим физичким особинама и хемијском саставу повољно делују на људски организам и могу се користити за профилаксу и лечење. Најдужу традицију у истраживању и коришћењу имале су и имају у домену балнеологије, због чега су третиране као лековите воде.

## 6.1. Класификација минералних вода

Данас у свету постоји велики број класификација минералних и термалних вода, а најзначајније су према пореклу, температури и хемијском саставу.

У односу на геолошко порекло разликују се две врсте вода /114/:

- јувенилне, које долазе непосредно из вулканских терена и,
- вадозне, метеорског порекла.

Јувенилне или исконске воде се јављају на старим вулканским теренима и настају константним процесом дехидратације магматских стена. Притисак и температура који магму одржавају у дубини у хомогеном и течном стању опадају приближавањем ка површини, кристалишући минерале од којих настају стене и ослобађајући велику количину водене паре и гасова (кисеоник, азот, сумпорводоник,...). Ако на ове пукотине наиђу подземне воде, зависно од температуре и притиска растварају стене кроз које пролазе и тако воде чини минералним. Под утицајем хидростатичког притиска и напона вода се пење ка површини и истиче на најнижем месту на терену. Обично су нешто топлије од вадозних вода, као и слабијег хемијског састава и температуре. За разлику од њих вадозне су атмосферског порекла, настале од кишнице или топљења снега, које услед капиларности и земљине теже пониру дубоко у земљу. При пролазу кроз стене оне се загревају и минерализују. Захваљујући тој топлоти и земљиној капиларности пењу се и избијају на површину /116-118/. Другачије се још називају и понорнице.

У природи постоје и мешавине ових врста вода. Атмосферска вода понире дуж раседа и у унутрашњости земље се загрева и минерализује. Под утицајем притиска пење се ка површини, као топла и минерализована вода. Понекад се та вода на мањој дубини минерализује и појављује на површини као хладна минерална вода. А постоји још један појавни облик минералних вода-пелоиди. Настали су као продукт мешања минералне воде и органских и неорганских материја. Састоје се из кристалног скелета, колоидног комплекса и блатног раствора.

У зависности од дубине, циркулације и геотермалних услова формирања минералне воде се одликују веома различитим температурама у границама од 0°C (чак и ниже у областима вечитог мраза) до 200-300°C (у областима активних вулкана), /119/. Са физиолошког и практичног гледишта, воде се деле на:

- хладне или акратопеге, испод 20°C и,
- топле или акратотерме, изнад 20°C.

Воде у балнеологији обично се деле на оне које снижавају и на оне које повећавају телесну температуру. Воде испод 34° снижавају, а преко 35° повећавају нормалну температуру тела.

На основу концентрације седимената, јонског и гасног састава, општа подела вода је /120/:

- 1.Обичне или олигоминералне воде које садрже мање од једног грама растворених састојака у литру воде
- 2.Радиоактивне воде које са собом носе растворене радиоактивне елементе из минерала
- 3.Просте или обичне кисељаче који садрже преко једног грама слободне угљене киселине у једном литру воде
- 4.Земне кисељаче који садрже више од једног грама растворених минерала
- 5.Алкалне воде код којих преовлађују хидрокарбонатни и натријумови јони као растворене минералне материје
- 6.Слане или муријатичне воде где преовлађују хлоров и натријумов јон
- 7.Горке воде које садрже у себи преко једног грама по литру растворене чврсте састојке са сулфатним јонима
- 8.Гвожђевите воде које носе у себи више од 0,01g гвожђа или његових јона по литру
- 9.Арсенске воде које су по саставу јако сличне сланим и гвожђевитим водама и арсен садрже у пето- или тро-валентном стању
- 10.Сумпоровите воде које садрже како слободан сумпорводоник, тако и хидросулфид јон и тиосулфид јон
- 11.Јодне воде које се одликују великим процентом јода и разноликог хемијског састава

## 6.2. Радиоактивност минералних вода

Радиоактивност минералних вода условљена је присуством соли радијума, његовом еманацијом и производима његовог распада. Радиоактивне воде су веома сиромашне минералним састојцима и припадају зато групи простих вода. Најрадиоактивније су воде које произилазе из гранитних и порфирних стена. Воде које садрже знатну количину сулфата имају обично малу количину соли радијума/114/.

Класификација минералних вода у односу на садржај природних радионуклида у минералним водама заснива се на познавању радионуклида присутних у минералним водама и изведеним величинама из дозвољеног уношења природних радионуклида у људски организам. Затим се врши упоређивање добијених вредности са усвојеним, максимално дозвољеним концентрацијама природних радионуклида. На тај начин минералне воде деле се у четири класе /121/:

1. Минералне воде са основном концентрацијом природних радионуклида, чије специфичне концентрације задовољавају релацију:

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{K_i} \leq 1 \quad (6.2.1.)$$

где је  $A_i$  специфична активност присутног радионуклида, а  $K_i$  средња вредност његове специфичне активности

2. Минералне воде са повећаном концентрацијом природних радионуклида, чије специфичне активности задовољавају релације:

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{K_i} > 1 \quad (6.2.2.)$$

$$\text{и } \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{MDK_i} \leq 1 \quad (6.2.3.)$$

где је  $MDK_i$  максимално дозвољена концентрација природних радионуклида

**3. Минералне воде обогаћене природним радионуклидима, чије активности задовољавају следеће релације:**

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{MDK_i} > 1 \quad (6.2.4.)$$

$$\text{и } \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{MDK_i^+} \leq 1 \quad (6.2.5.)$$

где је  $MDK_i^+$  максимално дозвољена концентрација  $i$ -тог радионуклида у води за пиће за групу становника, или лица која раде са отвореним изворима зрачења

**4. Минералне воде контаминиране природним радионуклидима, за чије активности важи релација:**

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{MDK_i^+} > 1 \quad (6.2.6.)$$

За сваку примарну класу може се одредити доминантност одређеног радионуклида, или групе радионуклида. Такође може се указати и на неку врсту активности радионуклида чији релативни удео у сумама примарне класификације је већи од остатка из те суме и тако карактерише тип воде.

### **6.3. Радонске воде**

Значајну улогу у укупном озрачивању становништва имају свакако и радиоактивне-радонске воде. Формирају се у наслагама травертина обогаћених радијумом, или у

уранско-радијумским кристаластим стенама. Са балнеолошког аспекта радонске воде се деле у две групе: угљекиселе и азотне, са садржајима радона преко  $18,5 \text{ Bq/m}^3$ , радијума  $10^{-6} \text{ Bq/m}^3$  и урана преко  $3 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  /122/.

На основу концентрације самог радона у води, воде можемо поделити на:

- ниско концентроване воде, концентрације до  $5 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3$
- средње концентроване воде, концентрације до  $3 \times 10^6 \text{ Bq/m}^3$
- високо концентроване воде, концентрације изнад ових вредности.

Већина угљекиселих радонских вода формира се у гранитима, гранито-гнајсевима, често на малим дубинама. Степен обогаћивања радоном одређен је садржајем радијума у стенама и хидрогеолошким условима кретања воде. Као релативно распрострањене воде овог типа јављају се хидрокарбонатно-хлоридне, натријумске или натријумско-калцијумске воде са повишеном минерализацијом (до  $20 \text{ kg/m}^3$ ). Високо су активне, преко  $10^6 \text{ Bq/m}^3$ , и термалне до  $63^\circ\text{C}$ .

У оквиру азотних радонских вода издвајају се три типа вода, различитог јонског састава и минерализације, као и порекла. Локалног су карактера, обично пукотинског типа, у оквиру којих се налазе колектори - огњишта високо еманирајућих вода радона. То су /119/:

1. кисеонично-азотне воде, мале минерализације ( $0,5 \text{ kg/m}^3$ ) и хладне. Претежно су (хидрокарбонатно-хлоридне) натријумске воде, а понекад и натријумско-калцијумске. Издани ових вода су у плићим деловима земљине коре. Типичне су воде атмосферског порекла, које се формирају на рачун локалних падавина и велике издашности. Измерена концентрација радона варира у распону од  $10^8$  до  $10^{15} \text{ Bq/m}^3$ .

2. радонске-азотне воде, слабе минерализације и обично су силицијумске алкалне терме. Карактерише их дубља инфилтрација атмосферских вода у зонама младих тектонских раседа. При истицању на површини имају температуре од  $40^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$ .

3. азотне, хлоридно-натријумске, или калцијумско-натријумске воде, високог степена минерализације и различитих температура (10°-40°C). Садржај радона није велики,  $740 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  и не прелази  $3700 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . Генетски су везане за наслаге морског порекла и представљају резултат мешања у различитим размерама старих, јако метаморфозних морских и инфилтрационих вода атмосферског порекла.



## 7. БАЊЕ СРБИЈЕ

Подручје Србије, захваљујући географском положају, геолошкој структури, сложености и расчлањености рељефа, клими, минералним и термоминералним водама убраја се у најлепше комплексе ненарушене животне средине на Балкану и шире. Бање и климатска лечилишта Србије имају дугогодишњу традицију омиљених места за лечење, опоравак, одмор и опуштање због изузетних лековитих и окрепљујућих карактеристика. Већина српских бања се налази у планинским пределима, заштићена од јаких ветрова, пријатне и благе климе у одлично очуваном природном окружењу. Многобројне минералне воде, чија лековита својства, према хемијском саставу, температури и другим окрепљујућим факторима су неопходна компонента у лечењу бројних болести. Територија Србије обилује природним термалним изворима са температуром изнад 15°C, чији се издани у већини случајева налазе изнад 600m. По правилу, због одговарајућег минералног састава имају специфичан укус и мирис /132/.

Када се посматра формирање, појављивање и распрострањеност минералних вода издвајају се следећи реони /119/:

- 1.реон Карпато-балканиода,
- 2.реон Српског кристаластог језера
- 3.Шумадијско-копаоничко-косовски реон,
- 4.реон Динарида
- 5.реон Панонског басена

## 7.1. Реон Карпато-балканоида

Реон Карпато-балканоида карактерише сложена геолошка грађа, где наслаге иду од најстаријих кристаластих шкриљаца до најмлађих алувијалних наноса од метаморфних, магматских и седимантних наслага. У дубљим деловима терцијарног басена доминирају артерски типови издани. Највећи број појава и лежишта минералних вода везан је за распрострањеност карстног и карстно-пукотинског типа издани /119/. Температура вода је у интервалу од 20° до 35°C, ретки су издани са температуром преко 45°C. По степењу минерализације спадају у групу слабо минерализованих вода, са минерализацијом од 1g/l. На основу рН вредности сврставају се у ред слабо киселих (5,5-6,8), неутралних (6,8-7,2) и слабо алкалних (7,2-8,5). По гасном саставу су азотног типа, а по заступљености радиоактивних елемената спадају у групу радонских, односно радијумско-радонских вода.



Слика 7.1.1. Геолошка карта Карпато-балканског региона /133/

Представници овог реона су: у првом реду Нишка Бања, а за њом су такође познате Соко Бања, Гамзиградска Бања, Брестовачка Бања. Њихов положај дуж басена дат је на геолошкој карти (слика 7.1.1. /133/).

Концентрације радона и радијума у минералним водама овог реона /119,133-139/, могу се видети у табели 7.1.1. :

Табела 7.1.1. Концентрација радионуклида у минералним водама реона

| Бања              | Температура (°C) | Rn ( $\times 10^3$ Bq/m <sup>3</sup> ) | Ra ( $\times 10^4$ Bq/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|------------------|--|--|
| Нишка Бања        | 36° – 38°        | 0,4 – 570                              | 0,48                                   |
| Соко Бања         | 28° – 45°        | 370                                    | 0,48                                   |
| Гамзиградска Бања | 38° – 43°        | 25,9                                   | 0,28                                   |
| Брестовачка Бања  | 32° – 42°        | 4,44                                   | 0,10                                   |

Услед високе радиоактивности воде истраживања концентрације су у овим бањама вршена изван и унутар затвореног простора, посебно у Нишкој Бањи. Годишња концентрација радона у ваздуху споља је 57Bq/m<sup>3</sup>, а запажена је и појачана концентрација радона у кућама и становима од 635Bq/m<sup>3</sup> /133-139/.

## 7.2. Реон Српског кристаластог језера

Овај реон заузима централно место на територији Србије и обухвата највећи део слива Велике Мораве. У погледу рељефа то је доста разуђен реон. У хидрогеолошком погледу терен је испресецаан густом мрежом водених токова. Посебно место у овом реону има Грделичка клисура дужине око 40km, настала процесом ерозије. Када је о геолошкој структури реч, најстарије стене овог реона су кристаласти шкриљци вишег и нижег кристалинитета са гнајсевима, амфиболитима и

сличним стенама. Могу се спорадично јавити и друге стене, рецимо мермери, магматске стене типа гранита и гранодиорита. Реоном преовадавају наслаге мезозојске, терцијарне и квартарне старости. Дуж алувијалних равни река овог реона наглашено је присуство песковито-шљунковитих наслага у границама од 5 до 15m. Раседна структура терена праћена је бројним пробојима магматских и вулканских стена из старијих или млађих геолошких епоха /119/.

Извори минералних вода су пукотинског или пукотинско-карстног типа у оквиру магматских и вулканских стена, које карактеришу и значајни хидрогеотермални потенцијали. У овом реону срећу се артерски типови издани унутар басена терцијарне старости. Не мањи значај има и збијени тип издани у оквиру алувијалних наслага са богатим резервама вода. Воде карактерише јако висока температура истицања, преко 100°C, што је још једна потврда великог геотермалног потенцијала /33,140/. Веома су разноврсног хемијског састава, као и великог опсега минерализације. У зависности од рН вредности, може се говорити о изразито киселим, испод 5,5, слабо киселим и неутралним, па преко слабо алакалних до алкалних са вредношћу преко 8,5. Термоминералне воде углавном припадају хидрокарбонатној групи, мада су присутне и сулфатне и хлоридне воде. По гасном саставу у реону су углавном заступљене угљокиселе воде, али су присутне и воде азотног односно метанско-азотног типа /119/.

Познате бање овог региона су: Пролом Бања, Сијаринјска Бања, Врањска Бања, Бујановачка Бања и Рибарска Бања. Радиоактивни елементи се налазе у малим концентрацијама, посебно радон /141,142/, што указује и табела 7.2.1.

Део овог региона је и познато туристичко одређиште Ђавља Варош, које се истиче пукотинским изданом минералне воде, високе минерализације и изразито богате гвожђем и његовим оксидима. Од радиоактивних елемената у извесним концентрацијама има: радона-  $7,80 \times 10^9 \text{Bq/m}^3$ , радијума -  $0,40 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  /119/.

Табела 7.2.1. Концентрација радионуклида у минералним водама реона

| Бања             | Температура (°C) | Rn ( x10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ) | Ra ( x10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|------------------|---|---|
| Пролом Бања      | 26° – 31,5°      | 19,2                                      | 0,07                                      |
| Сијаринска Бања  | 32° – 72°        | 51,8 – 92,5                               | -   |
| Врањска Бања     | 94° – 110°       | 14,8                                      | 0,17                                      |
| Бујановачка Бања | 24,5° – 43°      | 18,5                                      | 0,12                                      |
| Рибарска Бања    | 16° – 41°        | 20  | 0,15                                      |

### 7.3. Шумадијско-копаоничко-косовски реон

По свом физичко-географском положају овај реон заузима централно место, почев од Саве и Дунава на северу, до границе са Македонијом, на југу. У геоморфолошком погледу то је терен брдско-планинског карактера. Насупрот планинским масивима налазе се алувијалне равни, речне долине и потолине. Углавном су тектонске струкутре и испуњене наслагама неогене и квартарне старости. Основна карактеристика овог реона је раседна структура настала интензивним деловањима магматских и вулканских активности. Њихова интензивна делатност условила је стварање разноликих комплекса метаморфних стена. Присутни су гранити, диорити, гранодиорити, дијабази, кварцлатити, балазити, као њихове пратеће стене туфови и туфити. Наслаге неогене старости чине наслаге басена до дубине 500m, а то су углавном миоцен и плиоцен /119/. Песковите наслаге имају подређен положај и карактеришу плиће делове басена, и условљавају појаве лигнита, мрког угља. Наслаге квартарне старости су заступљене као алувијалне и терасне песковито-шљунковите или глиновито-шљунковите наслаге, дебљине од 2-12m. На терену

најзаступљеније су творевине кредне старости: глинци, пешчари (гвожђевити и глауконитски), конгломерати, као и кречњаци.

Хидрогеолошки карактер реона указује на велики број појава и лежишта минералних вода. Заступљени су скоро сви типови издани, али не подједнако. Најприсутнији је пукотински тип издани у стенама магматског и метаморфног порекла. Сложена геолошка структура утиче и на њихову издашност. Затим су ту карстни и карстно-пукотински издани у оквиру кречњака и мермера. Збијени тип издани особеност је алувијалних песковито-шљунковитих наслага. Артерски тип издани се среће по ободу реона, посебно у деловима терена са локално наглашеном испуцалошћу. Ово је реон са најбројнијим и најразноврснијим минералним водама, које према томе имају и велики температурски опсег. Угљо-киселе воде (кисељаци) су са температуром испод 15°C и има их око 30. Њих 15 има температуру од 15° до 20°C. Највећи број појава (око 45) или лежишта минералних вода има температуру у границама 20°-35°C. Њих десетак има нешто вишу температуру изнад 35°, вредност температуре је и 80°C. Када је реч о минерализацији уочава се разноврсност, као и код рН вредности. Са једне стране налазе се ултра киселе воде (испод 4), а са друге њена крајност-изразито алкалне (рН вредност 9).

Познате бање Шумадијско-копаоничко-косовског реона су: Буковичка Бања, Бања Горња Трпча, Богутовачка, Новопазарска, Матарушка, Јошаничка Бања, Врњачка Бања, Луковска, Куршумлијска Бања, Клокот Бања, Бања Бањска.

Треба нагласити, што се и види из табеле 7.3.1., да се реон одликује већим бројем минералних вода са повишеним садржајем радона, али не у довољној количини да се укључе у породицу радиоактивних вода /143-148/.

Табела 7.3.1. Концентрација радионуклида у минералним водама реона

| Бања              | Температура (°C) | Rn ( $\times 10^3$ Bq/m <sup>3</sup> ) | Ra ( $\times 10^3$ Bq/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|------------------|--|--|
| Буковичка Бања    | 13° – 25,7°      | 40 – 99,9                              | 0,91                                   |
| Бања Горња Трпача | 31°              | 29,6                                   | 0,16                                   |
| Богутовачка Бања  | 24° – 27°        | 44                                     | 0,55                                   |
| Новопазарска Бања | 15° – 50°        | 9,25                                   | 0,28                                   |
| Матарушка Бања    | 28° – 51,5°      | 9,2                                    | 0,20                                   |
| Јошаничка Бања    | 36° – 75°        | 7,4                                    | 0,20                                   |
| Врњачка Бања      | 14° – 36,5°      | 0,5 – 2,4                              | 0,05                                   |
| Луковска Бања     | 20° – 38°        | 11,1                                   | 0,15                                   |
| Куршумлијска Бања | 14° – 67°        | 18,5                                   | 0,12                                   |
| Клокот Бања       | 16° – 32°        | 16,6                                   | 0,24                                   |
| Бања Бањска       | 31,5° – 54°      | 3,7                                    | 0,17                                   |

#### 7.4. Реон Динарида

У геоморфолошком погледу то је претежно реон брдско-планинског карактера са општом тенденцијом повећања кота терена од најнижих делова на северу у долини Саве, до највиших делова по ободу метохијске котлине. Тектонска грађа реона је

сложеног карактера и огледа се пре свега у тектонским збивањима у прошлости, а који су условили данашњу разуђеност терена. У геолошкој грађи присутне су стене или њихови комплекси различите старости и састава, почев од најстаријих до најмлађих. Значајно су заступљене стене палеозојске старости: шкриљави комплекси гнајсева, филита, микашиста. У комплексима стена се могу наћи и остаци мермера и прекристалисаних кречњака. Наслаге мезозојске старости су распрострањене у целини, али неравномерно. Наслаге јурске старости су заступљене у централним деловима реона. Наслаге неогене-терцијарне старости присутне су у северном делу реона, али и у оквиру мањих или већих басена у Метохији.

У хидрогеолошком погледу, као последице раседне структуре изазване вулканском и магматском активношћу појављују се сви типови издани минералних вода /119/: збијени тип издани са слободним нивоом, пукотински тип, карсни тип и артерски тип издани. Пошто око 50% терена чине стене или њихови комплекси, могу се срести и 'безводни' делови терена, које чине шкриљаве стене палеозојске старости, наслаге јурске и неогене старости (глине, лапори,...) како на површини тако и у дубини терена. Присуство минералних вода у скоро свим типовима водоносних средина указује на њихову разноврсност у односу на формирање, физичка и хемијска својства. Присутне минералне воде имају температуру у широком опсегу од 8° (Кремна) до 80°C (Богатић). По јонском саставу највећи број минералних вода припада групи хидро-карбонатних или хидрокарбонатно-сулфидних вода. Нешто су мање заступљене хлоридне воде. На основу гасног састава деле се на азотне и угљенокиселе воде. Као што се из табеле 7.4.1. може видети садржај радионуклида скреће пажњу, али су у већини случајева присутни само у траговима.

Познатије бање области Динарида су: Бања Ковиљача, Бања Бадања, Овчар Бања, Прибојска Бања, Пећка Бања.



Табела 7.4.1. Концентрација радионуклида у минералним водама реона

| Бања           | Температура (°C) | Rn ( x10 <sup>3</sup> Bq/m <sup>3</sup> ) | Ra ( x10 <sup>3</sup> Bq/m <sup>3</sup> ) |
|----------------|------------------|---|---|
| Бања Ковиљача  | 15° – 30°        | 34,8                                      | 0,61                                      |
| Бања Бадања    | 12° – 14°        | 188,7                                     | 0,59                                      |
| Овчар Бања     | 35° – 37,5°      | 14,8                                      | 0,21                                      |
| Прибојска Бања | 37°              | 7,7                                       | 0,22                                      |
| Пећка Бања     | 11° – 47°        | 8,5                                       | 0,37                                      |

## 7.5. Реон Панонског басена

У геоморфолошком погледу то је претежно равничарски терен, благо заталасан, са надморском висином која прелази 100m. Монотоност равнице ублажавају лесни платои, наслаге песка, као Делиблатска пешчара чија највиша узвишица достиже висину од 250m. На истоку се налазе Вршачке планине висине од 640 и 590m. У геолошкој грађи учествују стене и њихови комплекси различите старости и састава. Присутни су кристаласти шкриљци, који изграђују Вршачке планине, а затим следе конгломерати, пешчари, кречњаци и доломити (тријас), брече, пешчари, рожнаци и друге стене јурске и кредне старости. У грађи басена учествују и стене магматског порекла: спилити, кератофири, риолити, као и вулканити. Дебљина ових комплекса варира од неколико десетина до неколико стотина метара. Преко ових комплекса стена налази се наслаге глиновито-песковитог састава. Завршни део седиментног циклуса су наслаге кредне старости језерског и језерско-речног порекла: песак, шљунак, глине, глиновити пескови и сличне стене.

Хидрогеолошке карактеристике проистичу и из сложене грађе терена. Зато су у овом реону заступљени пре свега, издани артерског типа. У неким деловима срећу

се и карстни, карстно-пукотински и збијени тип издани. Присуство минералних вода започиње већ на дубинама од 300 до 500m од површине /119/. Велики број издана је откривен израдом бушотина или бунара својствено условима на терену. Температура присутних минералних вода је у широким границама, иде од 20° до 100°C. Треба истаћи да температура воде расте са повећањем дубине појављивања. Једно посебно својство ових вода је појава 'жутих' или 'мрких' вода, на местима богатим нафтом и гасом, па се још називају и 'нафтне воде'. Услови њиховог формирања условљавају повишену минерализацију /149/ и указују на алкални карактер вода. По јонском саставу могу се припојити класи натријум, магнезијум, калцијум хидрокарбоната или хлорида, а могу се срести и хидрокарбонатно-хлоридне или хлоридно-хидрокарбонатне. Садржај радиоактивних елемената није типичан за минералне воде овог реона.

## 8. ГЕОТЕРМАЛНА ЕНЕГИЈА ПОДЗЕМНИХ ВОДА

Топлотна енергија Земље назива се још и геотермална енергија и резултат је формирања планета из прашине и гасова пре више од четири милијарде година. Спуштањем кроз кору Земље температура расте отприлике  $17^{\circ}$  до  $30^{\circ}\text{C}$  по километру дубине. Испод коре налази се омотач који је састављен од делимично растопљених стена и температура тог омотача је између  $650^{\circ}$  и  $1250^{\circ}\text{C}$ . У самом језгру Земље температуре би по неким проценама могле бити између  $4000^{\circ}$  и  $7000^{\circ}\text{C}$  /150,151/. Будући да топлота увек прелази са топлијих делова на хладније, топлота из унутрашњости Земље преноси се према површини и тај пренос топлоте главни је покретач тектонских плоча. На местима где се спајају тектонске плоче може доћи до пропуштања магме у горње слојеве и та магма се тада хлади и ствара нови слој земљине коре. Кад магма дође до површине може створити вулкани, али већином остаје испод површине, те ствара огромне базене и ту се почиње хладити, а тај процес траје од 5000 година до милион година. Подручја испод којих се налазе овакви базени магме имају висок температурни градијент и таква подручја изузетно су погодна за искоришћавање геотермалне енергије /155/. У природи се геотермална енергија најчешће појављује у форми вулкана, извора вруће воде и гејзира. Ове изворе можемо поделити на изворе са ниском (испод  $90^{\circ}\text{C}$ ) и унутрашње енергије  $0,03\text{--}0,4\text{MJ/kg}$ , умереном ( $90^{\circ}\text{C}\text{--}150^{\circ}\text{C}$ ) и високом температуром (већом од  $150^{\circ}\text{C}$ ) и унутрашње енергије и до  $3\text{MJ/kg}$ . Наменско коришћење ових извора зависи од температуре: ресурси са највишом температуром се користе за производњу електричне енергије, а ресурси са ниском се могу поделити у две групе: они који се директно користе и они за које се користе пумпе које испумпавају топлоту из подземних извора /151/.

У неким земљама се геотермална енергија користи већ годинама у облику бања, односно рекреативно-лековитог купања. Али развој науке није се ограничио само на подручје лековитог искоришћавања геотермалне енергије већ је искоришћавање геотермалне енергије усмерио и према процесу добијања електричне енергије. Геотермална енергија се може искористити и у друге сврхе: у загревању зграда, пословних простора, спортско-

рекреационих центара, у процесу сушења дрвета и вуне, у производњи хране, планском сточарству.

Главни недостатак приликом искоришћавања геотермалне енергије је да нема пуно места на свету која су изузетно погодна за експлоатацију. Најпогоднија су подручја на рубовима тектонских плоча, тј. подручја велике вулканске и тектонске активности /150/.

### 8.1. Улога радона у геотермалним прегледима

Кора садржи мале количине радиоактивних честица као што су радон и уранијум. Од радиоактивних изотопа дуже се задржава само  $^{222}\text{Rn}$ . Радиоактивни изотопи радона и радијума се користе у две фазе: истраживање и експлоатација /41,152-154/. Њихово присуство на површини указује на потенцијално постојње резервоара, због огромне енергије која се ослобађа приликом распада. Резервоари термалне енергије, врела, углавном карактерише висок топлотни проток и велика концентрација радона /153/. На свом дугом путу кроз унутрашњост земље до места избијања термална вода долази у контакт са великим површинама радиоактивних вулканских стена, као што су гранит, кварц и базалт који садрже велике количине радијума у себи /154/. Формирани радон у интеракцијама вода и стена остаје заробљен у микрокристалима стена и заједно са солима радијума се таложи у близини места избијања термалних вода /41,155/. Како је радон изотоп кратког века, његова концентрација на извору указује на својства резервоара и термодинамичке услове у временима преноса мањим од 30 дана у односу на стварање течности.

На концентрацију радона у геотермалним резервоарима утиче убацивање радона у течност из стена, као и пренос течности кроз резервоар. На његову концентрацију у површинском слоју делимичног утицаја има и присуство  $^{238}\text{U}$ , као и других потомака радиоактивног низа. Директно убацивање радона из термалних вода на површину зависи од тектонских дисконтинуитета земљишта, пукотина и порозности тла, протока флуида, влаге и метеоролошких услова, притиска, физичко-хемијских особина течности која га са собом доноси на површину.

Мерења концентрације радона на различитим растојањима од самог врела указује на просторну варијацију вредности: у самом врелу и у непосредној близини присуство радона је интензивније него на местима веће удаљености /152,155/. Повећана концентрација у

непосредној близини врела је не само последица ослобођеног радона из воде већ и његово присуство у ваздуху и земном гасу /157,158/. Контунуирана еманација радона око самог врела топле воде је услед његовог избацивања у виду мехурића паре и молекулске дифузије у атмосферу /159/. Дакле, постоји висока термодинамичка активност која прати радон: у првом случају њега на површину доводе гасови које се крећу кроз пропусте, а у другом случају течности произведене пражњењем /160/.

Истраживања знатне радонове унутрашње енергије у геотермалним пољима добар су показатељ геотермалног потенцијала резервоара /161/. Већа концентрација радона условљава већу унутрашњу енергију, и чине потенцијале ових поља израженијим.

## 8.2. Геотермална енергија у Србији

За развој геотермологије у Србији у 20.веку заслужан је први српски хидрогеолог Светолик Радовановић, који се сматра оснивачем хидрогеологије и геотермологије /162/. Србија је релативно мала земља, око  $80.000\text{km}^2$ , али је њена геолошка и тектонска структура веома комплексна. Зато су и њене геотермалне карактеристике веома интересантне. Има 4 геотермалне области: Панонски Басен, Динариде, Српско-македонски масив и Карпато-балкански масив /162/.

На територији Србије налази се 159 природних термалних извора, који се налазе углавном на дубинама 200-300m. Највећи проток је из термалних извора насталих пролазом кроз стене мезозоица, а затим из стена терцијарних гранитоида и вулканских стена. Укупна геотермална енергија је  $800\text{MWt}$ , али искоришћеност овог температурског система је слаба, око  $80\text{MWt}$  /163-166/, свега 10% потенцијала. Геотермална енергија се углавном користи за загревање бањских објекта, а у неким бањама користи се и за загревање стакленика и фарми, или у мањим индустријским постројењима.

Истраживања показују да геотермална енергија у Србији може бити знатан део енергетског ресурса Србије. Постојеће геотермалне резерве се процењују на  $400 \times 10^6 \text{тона}$ . Интензивно коришћење ових вода је у агро- и аква- култури, као и у главним системима за загревање градова, чиме би се умногоме олакшао и побољшао и стандард и живот становништа Србије.

## 9. МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА РАДОНА

Већина мерних метода за радон и његове потомке заснива се на детекцији  $\alpha$ -честица, као и мерење  $\gamma$ -зрачења, док се за мерење  $\beta$ -зрачења мало користи. Методе се разликују по начину и трајању узорковања, па се може говорити о пасивном и активном узорковању. Код пасивног узорковања радон самостално дифундује у детекцијску комору, док се при активном узорковању уноси одређена количина ваздуха у јединици времена и затим изводи мерење активности једном од метода. По трајању узорковања разликују се тренутна, континуирана и интегрална мерења /1/. Да би се избегле несигурности и грешке мерења које потичу од саме природе радиоактивности, понекад би требало повећати време мерења и анализе.

У оквиру ове тезе мерења активности концентрације радона и потомака у води и ваздуху вршена су помоћу AlphaGUARD-а, а Gamma TRACER-а и чврстим CR-39 траг детекторима.

### 9.1. AlphaGUARD мерни уређај

AlphaGUARD (Genitron Instruments GmbH, Немачка) је један од најсофистициранијих и најтачнијих система за континуирано мерење концентрације радона и потомака у ваздуху, у земљи и води, као и мерење одређених метеоролошких параметара (температуре ваздуха, барометарског притиска, релативне влажности ваздуха), слика 9.1.1./167/. Уређај је опремљен и тзв. релокацијским детектором који региструје промене положаја мерног уређаја током мерења. Подесан је како за краткотрајно тако и дуготрајно унутрашње и

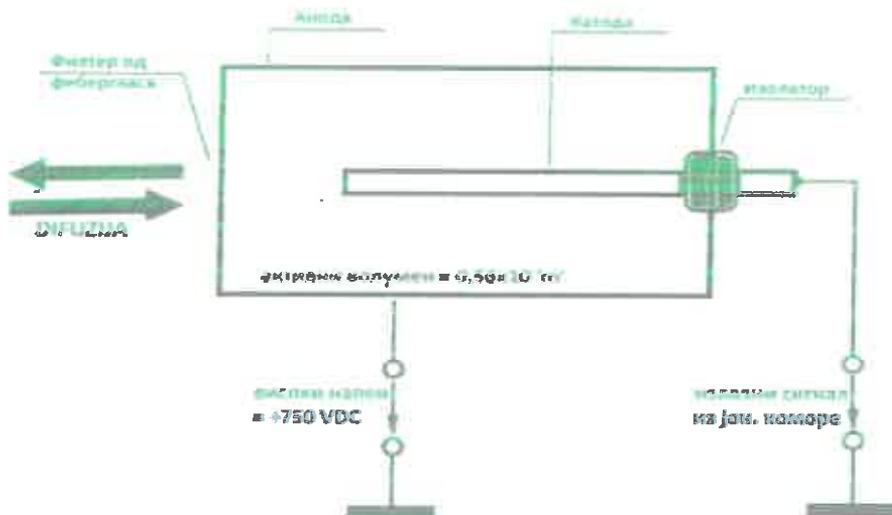
спољнашње испитивање. Уређај може радити на два оперативна начина: дифузни и пумпни.

Омогућава промену интервала мерења од 10min, односно 60min у дифузном моду, као и 1min односно 10min у пумпном начину рада. Измењене концентрације се складиште у меморији рачунара, таквог капацитета који при 60-то минутном мерном циклусу омогућава чување података насталих за 4 месеца непрекидног рада (односно у 10минутном циклусу 20 дана рада). Мерно подручје уређаја је од  $2\text{Bq/m}^3$  до  $2 \times 10^6\text{Bq/m}^3$ , резолуција  $1\text{Bq/m}^3$  и осетљивост детектора је  $20\text{Bq/m}^3$ .



Слика 9.1.1. AlphaGUARD PQ 2000 PRO (произвођач Genitron Instruments)

Средишњи део овог уређаја је детектор радона-пулсна јонизациона комора запремине  $0,56 \times 10^{-3} \text{m}^3/1/$ . При дифузионом начину радон сам улази у јонизациону комору кроз филтер од фибергласа који спречава улазак радонових потомака, односно аеросола. Кућиште коморе се налази на позитивном потенцијалу од 750V (анода), а унутра се налази катода изолатором причвршћена на кућиште. Унутрашњост коморе представљена је на слици 9.1.2. /167/.



Слика 9.1.2. Приказ јонизационе коморе AlphaGUARD уређаја /167/

Радиоактивним распадом радона  $\alpha$ -честице јонизују ваздух унутар коморе. Катода привлачи позитивно наелектрисане честице које на њој узрокују слабу струју која се мери. Та струја је пропорционална количини распаднутих атома радона. Помоћу DSP технологије (Digital Signal Processing) обрађује се излазни сигнал из јонизационе коморе. Резултати мерења читавају се на дисплеју /1,167/. Сваку измерену концентрацију радона прати и одговарајућа статистичка грешка. Читавају се још и температура у  $^{\circ}\text{C}$ , релативна влажност у % и атмосферски притисак.

Пумпни режим рада омогућава AlphaPUMPA, слика 9.1.3./167/.



Слика 9.1.3. AlphaPUMPA-a /167/



Њоме се може подесити брзина струјања ваздуха у детекцијску комору на некој од дефинисаних вредности: 0,03, 0,05, 0,1, 0,3, 0,5 и 1 l/min. Поседује и унутрашњи 'aqua-stop' филтер који спречава продирање воде у апарат.

### **9.1.1. Мерење концентрације активности радона у ваздуху помоћу AlphaGUARD уређаја**

За мерење концентрације радона у ваздуху уређај се поставља на одговарајућу чврсту подлогу у простору у коме се мерење одвија. Мерење концентрације радона у ваздуху једнако се добро врши како у затвореном тако и на отвореном простору. Ако се мерење врши на отвореном треба водити рачуна да је уређај заштићен од утицаја влаге или атмосферских падавина. На саму концентрацију радона утицај имају и дневне температурске варијације, па и о томе треба водити рачуна.

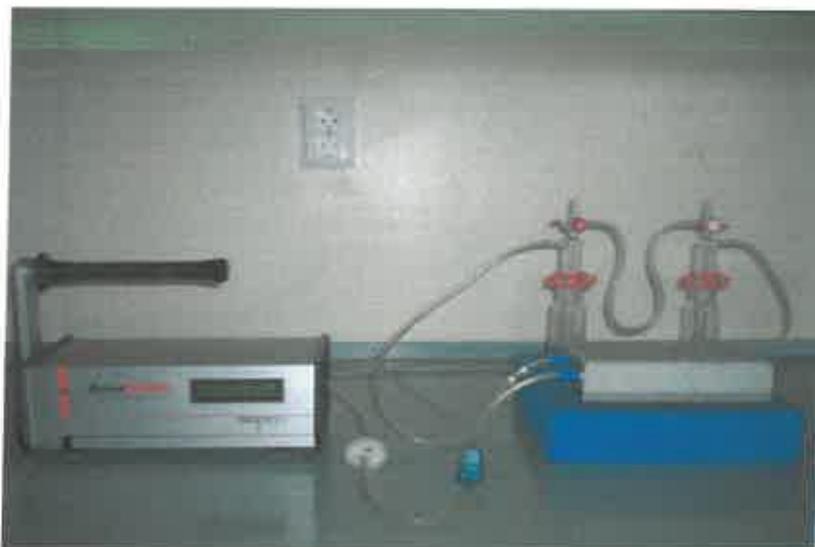
На основу измерене концентрације активности радона у ваздуху како у затвореним просторијама, тако и на отвореном одређене су и ефективне еквивалентне дозе (EED) за радон удахнут у одговарајућој средини помоћу обрасца (1.2.3.), датог у поглављу 1.

### **9.1.2. Мерење концентрације активности радона у води помоћу AquaKIT система**

AquaKIT је систем за директно мерење концентрације гаса радона у води. Може се користити и код отпадних и код вода са великом концентрацијом соли. Веома је лаган за руковање и карактерише га брзо и веома прецизно одређивање концентрације радона у узорку од 0,5l. Опсег мерења је од 5 до  $2000 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , а статистичка грешка је мања од 10%. AquaKIT сет се састоји од: AlphaGUARD-а, AlphaPUMPE и две стаклене посуде за еманаацију радона гаса и сигурносну посуду, што се види на слици 9.1.2.1. /167/. Део сета су и термометар за мерење температуре

узорковане воде опсега  $-10^{\circ}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ , шприц за узорковање (0,1l), четири посуде за узорке од 0,1l и 0,5l, универзална посуда за течност, пластичне цевчице за повезивање, чаура активног угља капацитета  $1,25 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{g}$ .

Основни услов за тачност мерења је одговарајуће узорковање воде, па треба минимизирати пут од узорковања до мерења. Узорковање воде се може извршити највише 6 сати пре мерења и то само у стакленим бочицама са шлифом, које су напуњене до самог врха. Уколико остаје мало слободног простора радон се веома брзо нагомилава у непосредној близини поклопца, и након отварања напушта боцу. Користе се искључиво стаклене бочице да би се избегле одређене хемијске реакције које се могу јавити код пластичних бочица /1/. Минимална количина је 0,5l.



Слика 9.1.2.1. Мерење концентрације радона у води помоћу AquaKIT система /167/

За сигурно постављање опреме, као и да AlphaPUMP-а и стаклене посуде буду у исправном положају део сета је и четвртасти рам. Приликом састављања апаратуре мора се водити рачуна да виши изводи еманационе и сигурносне посуде буду међусобно повезани, а нижи извод еманационе посуде везан за 'IN' бризгач пумпе. На тај начин се узорак воде у посуди снабдева ваздухом. Нижи извод сигурносне посуде повезан је са активним адаптером AlphaGuard-а.

Сама процедура мерења изводи се на следећи начин: отворе се сигурносни вентили на врху обе посуде и пластичном инјекцијом се полако сипа узоркована количина воде. Затворе се сигурносни вентили на обе посуде, и уређај се постави у пумпни режим рада са мерним циклусом од 1min. На AlphaPUMPI се постави брзина струјања од 0,3l/min и укључи се у трајању од 10min. Након тога се искључи пумпа, а мерење се наставља AlphaGUARD-ом следећих 20min. Концентрација се израчунава према једначини:

$$C = 10^{-3} \cdot C_{AG} \cdot \left( \left[ \frac{V_s - V_U}{V_U} + k \right] + C_o \right) \quad (9.1.2.1.)$$

где је  $C_{AG}$  концентрација радона у ваздуху мерена AlphaGUARD-ом,  $C_o$  концентрација у окружењу пре почетка мерења,  $V_s$  укупна мерна запремина система,  $V_U$  запремина узорковане воде и  $k$  дифузиони коефицијент радона у води, који се одређује једначином:

$$k = 0,106 + 0,405 \cdot e^{-0,052T} \quad (9.1.2.2.)$$

где  $T$  представља температуру на којој се врше мерења.

Коректност при одређивању концентрације радона у води зависи од: непробојности мерне опреме, односа запремине узорка/мерне опреме, температуре узорка, количине радона у мерној опреми пре почетка експеримента и позадине AlphaGUARD-а.

Одређивање односа узорка и мерне опреме се базира на потпуном познавању унутрашње запремине опреме. Унутрашња запремина опреме резултат је суме унутрашњих запремина компонената интегрисаних у мерној опреми. У табели 9.1.2.1. дате су унутрашње запремине појединих компонената.

Табела 9.1.2.1. Запремине AquaKIT-ових компонената и израчуната укупна запремина мерне поставке

| Компоненте система             | Запремина ( $\times 10^{-3}l$ ) |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Јон. комора AlphaGUARD уређаја | 680                             |
| AlphaPUMP-а                    | 18                              |
| 0,1l еманационог суда          | 201                             |
| Сигурносни суд                 | 202                             |
| Спојна цев (1,8m)              | 21                              |
| Укупна запремина               | 1122                            |

Из табеле видимо да је укупна запремина система 1,122l, која је као вредност  $V_s$  у овој дисертацији коришћена при израчунавању концентрације активности радона у води.

Вредност дифузионог коефицијента од  $k=0,26$ , узета је као валидна у оквиру истраживања, која су се одвијала на температури приближној собној температури од  $20^{\circ}C$ . Однос запремине између ваздуха у опреми и воденог узорка апроксимативно 10:1. Ово је подесно све док су узорци мерени под нормалним условима. Код дифузног коефицијента ово води несигурношћу од  $\leq 2\%$  и због тога су грешке занемарљиве.

Пошто се концентрација активности радона није могла одредити на самом месту узорковања, одређена је њена коригована вредност /22/, по формули:

$$C_{\text{corr}} = C \cdot e^{(\ln 2 \cdot t / T_{1/2})} \quad (9.1.2.3.)$$

где је  $C_{\text{corr}}$  коригована вредност концентрације радона, и представља вредност у тренутку узорковања,  $C$  измерена вредност концентрације активности радона након одређеног времена,  $t$  време протекло од тренутка пуњења до мерења, и  $T_{1/2}$  време полураспада радона. У оквиру ових истраживања време  $t$  је 15 дана.

Годишња ефективна доза коју прими становништво услед ингестије радона, рачуна се по формули (1.2.5) дате у поглављу 1.

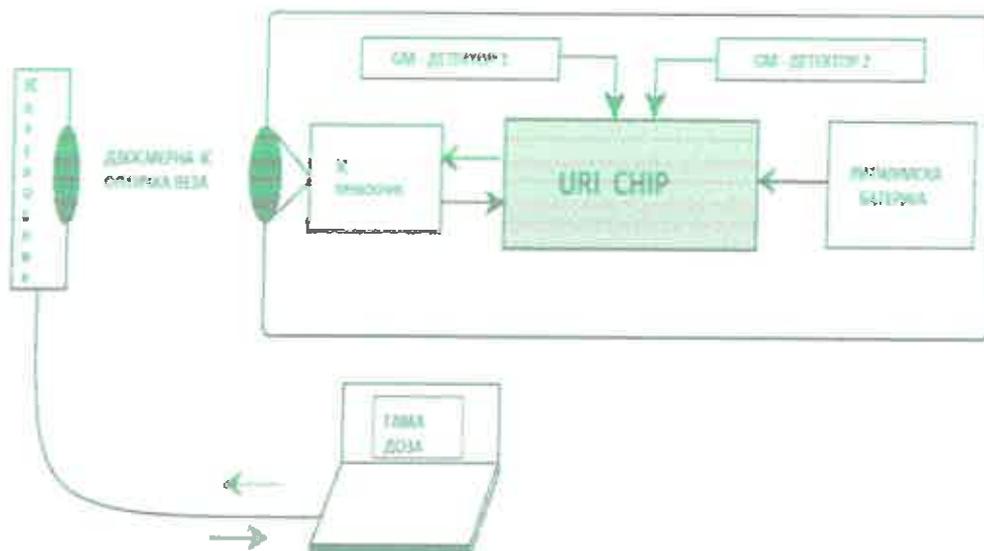
## **9.2. Gamma TRACER**

Мерење еквивалентне дозе гама зрачења у ваздуху вршена су помоћу аутономне ADL-сонде - Gamma TRACER -, система за континуирано мерење нивоа природне радијације.

На свим мерним местима сонда је била постављена 1m изнад површине земље, када су мерења вршена на отвореном простору, а на истом растојању сонда је била постављена од зидова и подлоге када су мерења вршена у затвореном простору. Временски интервал снимања података на мерним местима зависио је од временских услова. Уколико су се временски услови брзо мењали у току мерења, снимање података се дуже одвијало. То се пре свега односило на мерења на отвореном простору. У просеку је време снимања података било 8h, а ако је било потребно снимање се вршило и током 24h.

### **9.2.1. Основне карактеристике мерног система Gamma Tracer-a**

За снимање  $\gamma$ -радијација коришћен је аутоматни мерни инструмент Gamma Tracer, производ фирме Genitron Instruments GmbH из Франкфурта. Инструмент континуирано региструје радијационе дозе у изабраним временским интервалима. Комплетна електроника и напон напајања, налазе се у херметичком кућишту. Технологија чипа за енергетско снабдевање је ослобођена сваког одржавања, тако да Gamma Tracer уређај може најмање три године радити са једним пуњењем /168/. На слици 9.2.1.1. дате су најважније компоненте Gamma Tracer система.



Слика 9.2.1.1. Основне компоненте Gamma Tracer система /168/

Преко интерактивног инфрацрвеног порта, регистроване вредности се могу очитати у сваком тренутку. Гама професионални софтверски програм за употребну комуникацију, као и софтвер за анализирање, гарантују једноставан, брз и сигуран приступ акумулираним подацима као и њиховој визуелизацији.

### 9.2.2. Основни технички подаци система ADL-Gamma Tracer-a

Овај систем је посебно конструисан за рад под различитим условима. Континуирано регистровање информација (података) врши се помоћу временски неосетљивог уређаја ADL-монитора, који се може поставити било где на отвореном простору. У њему су уграђени полупроводници. ADL-сонде раде континуирано више од 50000 сати (5 година) без замене батерије. Подаци се могу очитати са ADL-уређаја у свако време (на разумној даљини), активирањем оптичког (инфрацрвеног) преноса података. Сви подаци се преносе у базу података на РС рачунару, а све потребне

информације о дозама зрачења добијају се преко посебно инсталационог софтверског програма.

ADL-Gamma Tracer чине две Geiger-Muller-ове цеви као детектори зрачења, осетљивости од 0,2 импулса/s за 100nGy/h и опсега мерења од 10nSv/h до 10mSv/h (могуће је и 10Sv/h). Калибрација зрачења износи 662keV (Cs-137). Мерни опсег је широк и варира од корисника и потребе мерења: 1, 2, 5, 15, 30, 60, 120m. Пренос података се врши преко IC преносника (12m удаљености), FM модула (на 5000m удаљености), RS-422-port (на 1000m удаљености или везивањем на телефонски модем). Температурни распон у коме је омогућен нормалан рад уређаја је од -20° до +50°C, а могућ је и на -40° до +70°C. Напајају га литијумске батерије уз оптимално време рада од око 5 година.

Gamma Tracer има широку област примене, са високом прецизношћу, која далеко превазилази уређаје сличне намене до сада произведене у свету. Због велике осетљивости веома брзо и прецизно мери нивое природне радијације у радним и животним амбијентима.

### 9.3. Чврсти траг-детектори

Чврсти траг-детектори  $\alpha$ -честица из распада радона користе се за мерење концентрације радона у дужем временском интервалу. Траг детектор је пластични материјал у коме  $\alpha$ -честице настале распадом остављају траг. Пут који  $\alpha$ -честица емитована са неког нуклида у ваздуху прелази и доспева до детектора је домет честице, R /169/. Најчешће се као детектор користи полимер CR-39 (polyallyl diglycol carbonate) који осетљивом структуром омогућава да се региструју честице у широком енергетском интервалу. Детектор се налази на једном крају дозиметарске коморе, чија величина одговара домету и на тај начин омогући максималну детекцију створених  $\alpha$ -честица у што краћем временском року.

У табели 9.3.1. /170/, представљене су вредности домета  $\alpha$ -честице емитоване из радона и његових потомака у ваздуху и унутар дозиметра.

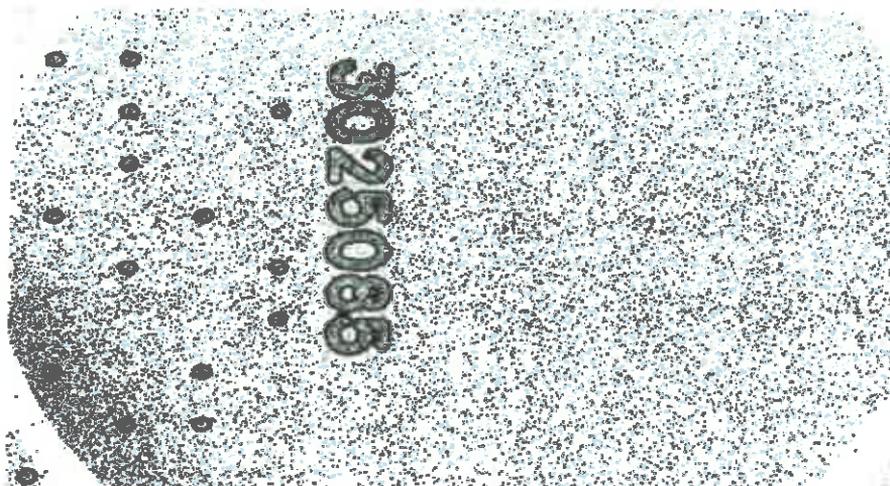
Приликом распада  $\alpha$ -честице се емитују у свим правцима у цилиндру, али само 1/4 емитованих  $\alpha$ -честица доспева до детектора и само 1/2 од свих емитованих пада нормално на површину детектора /41/, остављајући траг. Трагови на детектору су електростатичке природе и реда су величине  $10^{-6}\text{m}$  /41,171/.

Табела 9.3.1. Домет емитоване  $\alpha$ -честице из  $^{222}\text{Rn}$  и његових потомака у ваздуху и унутра дозиметра /170/

| Нуклиди           | Енергија $\alpha$ -честице (MeV) | Домет                        |                             |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                   |                                  | Ваздух ( $\times 10^{-2}$ m) | CR-39 ( $\times 10^{-6}$ m) |
| $^{222}\text{Rn}$ | 5,48                             | 4,0                          | 35,5                        |
| $^{218}\text{Po}$ | 6,00                             | 4,6                          | 40,7                        |
| $^{214}\text{Po}$ | 7,70                             | 6,9                          | 59,8                        |
| $^{220}\text{Rn}$ | 6,28                             | 4,9                          | 43,6                        |
| $^{216}\text{Po}$ | 6,77                             | 5,6                          | 48,9                        |
| $^{212}\text{Po}$ | 8,78                             | 8,5                          | 75,8                        |

Дуговечни су на нормалној температури као и нижој од  $0^{\circ}\text{C}$ , а могу да 'преживе' и на високим температурама зависно од структуре детектора и интензитета јонизације. Након процеса нагризања растворима  $\text{NaOH}$  или  $\text{KOH}$ , а некад у етанолу, трагови постају видљиви под оптичким микроскопом. Дистрибуција трагова представљена је на слици 9.3.1., /171/.





Слика 9.3.1. Дистрибуција трагова условљена електростатичким ефектима/171/

Укупна енергија коју честица преда средини приликом интеракције има значајан утицај на облик и величину трага /172/. Димензије трагова на плочици зависе и од угла под којим честица пада на површину плочице, тј. ефикасности удара,  $\theta_c$ . За CR-39 детекторе износи приближно  $20^\circ$  /41, 172-176/.

Постављањем плочице под микроскоп са јаким увећањем, до 20 пута, може се мануелно израчунати густина трагова,  $\rho$  по Поасоновој статистици /41/:

$$\rho = \frac{N \pm \sqrt{N}}{A} \quad (9.3.1.)$$

где  $N$  одговара броју уочених трагова, а  $A$  је величина видљивог поља реда  $10^{-7} \text{m}^2$ . Густина трагова у детектору пропорционална је зрачењу гаса радона. Концентрација активности радона одређује се по формули /9/:

$$A = \frac{\rho - \rho_0}{K \cdot \tau} \quad (9.3.2.)$$

где је  $\rho$  густина трагова честица из распада радона (број трагова на  $10^{-4}\text{m}^2$  површине детектора),  $\rho_0$  фон детектора (број трагова на  $10^{-4}\text{m}^2$  површине пре експонирања),  $K$  одзив детектора (калибрациони коефицијент) и  $\tau$  време експонирања детектора.

Калибрациони коефицијент за детектор CR-39 је /41/:

$$K_o = \frac{1}{4} R_o \cos^2 \theta_c = 3,2 \text{tragacm}^{-2} / \text{kBqm}^{-3} \text{h} = 0,88 \text{cm}, \text{ за CR-39, } (\theta_c \approx 20^\circ) \text{ (9.3.3.)}$$

Грешка при мерењу концентрације активности радона рачуна се према формули:

$$\sigma = A \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_k^2 + \sigma_t^2} \quad (9.3.4.)$$

где је  $A$  концентрација активности радона,  $\sigma_p = 1/N^{1/2} + 0,004$ , а  $N$  је број трагова  $\alpha$ -честица у детектору,  $\sigma_k$  грешка калибрационог коефицијента (0,18) и  $\sigma_t$  грешка због транспорта дозиметра и дефинише се као однос између времена трајања транспорта и времена трајања експозиције.

На месту мерења детектори се налазе у цилиндричним затвореним дозиметрима у које дифундује радон и оставља траг /169-172/. Да би резултати били што поузданији и реалнији мерења концентрације радона врше се у периоду од месец до годину дана /172,173/. Осетљивост постављених траг детектора је на енергију  $\alpha$ -честица емитованих из распада радона и његових потомака вредности 5,5MeV, 6,0MeV и 7,7MeV, респективно /41/. Први радонов потомак  $^{218}\text{Po}$  услед кратког времена полураспада (3,05min) се делимично распада пре таложења. Време полураспада другог и трећег потомка,  $^{214}\text{Po}$  и  $^{214}\text{Bi}$ , је знатно веће и омогућава да се потпуно депонују у комори /174/.

Мерење концентрације активности радона у затвореном простору, у оквиру ове тезе извршено је коришћењем 'RadoSys' интегралног система мерења. Основне компоненте система су: дифузиони дозиметар са детектором типа CR-39, систем за хемијску анализу детектора као и систем за аутоматско читавање трагова на детекторима.

Детектори типа CR-39 представљају најчешће коришћене  $\alpha$ -траг детекторе у чврстом стању и омогућују мерење концентрације активности радона (RAC) на више хиљада локација истовремено. Сам детектор је јефтин и има једнократну употребу. Траг детектори величине  $10^{-4}\text{m}^2$  постављани су унутар пластичних дифузионих комора кроз коју радон дифундира. Комора отпорна на ударе, са одговарајућом електростатичком заштитом, приказана је на слици 9.3.2.



Слика 9.3.2. Изглед дифузионе коморе PADC/CR-39 детектора

Типична осетљивост детектора је 2,0 трагова по  $10^{-4}\text{m}^2/10^8\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ , иницијална позадина 0,3 трага/ $10^{-3}\text{m}^3$ , а лимит засићења је већи од  $12 \times 10^6\text{Bq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ .

Главни услов за добијање поузданих резултата при мерењу овим дозиметрима је пажљиво руковање детекторима. Било каква прашина или нечистоћа на CR-39 детектору или унутар коморе могу смањити тачност и поузданост мерења радона. Склапање дозиметра, приказано на слици 9.3.3., треба обављати у затвореним просторијама на спрату које нису климатизоване, а избегавати подрумске просторије услед познате појачане активности радона у њима.

Сваки од постављених детектора има урезан ID број, који одговара броју на налепници која се налази и на поклопцу коморе. Број је уједно и његов идентификациони број за локацију на коју се поставља. Алфанумерички код на налепници омогућава касније препознавање детектора на читачу уређаја.



Слика 9.3.3. Постављање детектора на поклопац коморе и нумерисање коморе

Уобичајено време излагања детектора било је по 3 месеца, у просторијама на висини од једног метра у односу на под, далеко од воде или извора грејања. Након тог времена дозиметар се транспортује у лабораторију за евалуацију.

Први корак у тој евалуацији је хемијско нагризање у 'RadoBath' јединици. Детектори су били нагризани 6,25% раствором NaOH, 4,5 сати на константној температури од 90°C [25,41]. Хемијски процес је егзотермни и генерише штетне паре, али компактна структура купатила штити истраживача од удисања ових штетних пара. Други корак је бројање урезаних трагова на детектору. Очитавање трагова врши се помоћу 'RadoMeter' аутоматизованог микроскопа повезаног са компјутером, у коме је инсталиран наменски софтвер за анализу CR-39 детектора. Време очитавања по детектору је око 60 секунди. Сам поступак бројања се може визуелно пратити на монитору, а резултати се исписују у табеле. На слици 9.3.4., шематски је приказана процедура мерења концентрације радона помоћу 'RadoSys' система.



Слика 9.3.4. Шематски приказ процеса мерења концентрације радона помоћу 'RadoSys' система

У циљу добијања што тачнијих резултата мерења помоћу 'RadoCal' сета (детектора са познатом RAC вредношћу) извршена је калибрација 'RadoMeter' уређаја.

## 10. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Предмет истраживања ове докторске тезе је концентрација активности радона присутна у минералним водама бањских центара Србије, са посебним акцентом на воде у базенима за купање, кадама и купатилима за инхалацију, као и на неким напуштеним изворима где се највеће озрачивање јавља као последица удисања радона. У неким случајевима, када је то год било могуће, мерења концентрације спољашњег радона су вршена и на самим извориштима као и локацијама где се врши каптирање ових вода. Зато су упоредо праћене концентрације активности радона и у води и у ваздуху. У исто време мерила се и јачина гама дозе зрачења.

Истраживање се одвијало у одређеним временским интервалима током 2009., 2010. и 2011. године, када су постојали реални услови за теренски рад. Истраживањем је обухваћено 18 бања у Србији, које су подељене у три региона, према геолошкој структури тла на коме се налазе. Мерења су се одвијала на подручју следећих бањско-здравствених центара као и неких изворишта минералних и термоминералних вода: Нишка Бања, Соко Бања, Гамзиградска Бања (реон Карпато-балканоида); Сијаринска Бања, Врањска Бања, Рибарска Бања, Пролом Бања (реон Српског кристаластог језера) и Новопазарска Бања, Богutowачка Бања, Матарушка Бања, Бања Горња Трепча, Буковичка Бања, Јошаничка Бања, Врњачка Бања, Луковска Бања, Куршумлијска Бања, Бања Бањска, Клокот Бања (Шумадијско-копаоничко-косовски реон).

Вредности концентрације активности радона у води и у ваздуху очитане помоћу AlphaGUARD мерног система, систематизоване су по табелама: табела 10.1.1.-реон Карпато-балканоида, табела 10.2.1.-реон Српског кристаластог језера и табела 10.3.1.-Шумадијско-копаоничко-косовски реон. Услед техничких потешкоћа

концентрације активности радона у води очитаване су након 15 дана, и у табелама означене као  $C_{uv}$  (концентрација радона у узоркованој минералној води). Ослањајући се на истраживања из литературе, вредност која одговара концентрацији активности радона у тренутку узорковања се дефинише коригованом вредношћу,  $C_{corr}$  и одређује се обрасцем (9.1.2.3) и сматра се валидном вредношћу. Вода је узоркована у стакленим посудама запремине 500ml, у малом млазу. Иако су посуде биле напуњене до врха у простору испод самог поклопца нагомилавао се радон ослобођен дифузијом из воде. Након отварања одлази у околни простор, па је самим тим умањено и његово присуство у води. Приликом узорковања минералне воде су имале различите температуре, а пошто су вредности очитаване након одређеног времена, собна температура од 20°C узима се као јединствена температура испитиваних вода. Годишња ефективна доза коју становништво прими услед ингестије радона,  $E$  чија се вредност одређује изразом (1.2.5.) представљена је у табелама. За одговарајуће концентрације активности радона у ваздуху,  $C_v$  израчунавана је и ефективна еквивалентна доза удахнутог радона,  $EED$  на годишњем нивоу, обрасцем (1.2.3.) из поглавља 1.

Током истраживања брижљиво су праћени метеоролошки параметри на местима мерења, пошто њихове промене условљавају и промену концентрације активности радона. То се првенствено односило на минералне и термоминералне изворе који се појављују географски далеко од места настанка, када постоји повећана могућност мешања обичне атмосферске воде и дубинских вода.

Пратећа јачина дозе гама зрачења мерена је Gamma Tracer-ом. Очитане вредности налазе се у: табели 10.1.2. везане за реон Карпато-балканоида, табели 10.2.2. везане за реон Српског Кристаластог језера и табели 10.3.2. вредности које су очитане у бањама Шумадијско-копаоничко-косовског реона.

За континуирано праћење осцилација у концентрацији активности радона у приватним кућама у Нишкој и Соко Бањи коришћени су чврсти CR-39 траг детектори. По подацима из литературе ово су наше бање са високом концентрацијом радона, па је било занимљиво пропатити осциловање концентрације радона у кућама у којима људи живе. Изабране су куће које се

налазе у непосредној близини извора минералних вода. Концентрација активности радона мерена је у периоду зима-пролеће, у једној полу-сезони узимајући у обзир постојећа климатска дешавања у природи. За добијене вредности израчуната је и ефективна еквивалентна доза удахнутог радона на годишњем нивоу, EED. Подаци су сумирани у табели 10.1.3.

Укупна статистичка анализа експерименталних резултата: максимална и минимална вредност, средња аритметичка средина, као и параметри лог нормалне расподеле, систематизовани је по реонима и представљени у делу 10.4.



## 10.1. Реон Карпато-балканоида

### 10.1.1. Концентрације активности радона у води и ваздуху мерене AlphaGUARD мерним системом

Табела 10.1.1. Концентрација активности радона у води и ваздуху неких бања овог реона

| Место                                 | $C_{uv}$<br>(Bq/m <sup>3</sup> ) | $C_{дог}$<br>(x10 <sup>3</sup> Bq/m <sup>3</sup> ) | E<br>(x10 <sup>-3</sup> mSv/god) | $C_v$<br>(Bq/m <sup>3</sup> ) | EED<br>(mSv/god) |
|---------------------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Нишка Бања-<br>'Радон'-базен          | 9769± 742                        | 149± 12  | 45,7                             | 1446± 102                     | 0,5              |
| Нишка Бања-<br>'Радон'-хол            | --                               | --   | --                               | 190± 82                       | 0,06             |
| Нишка Бања-<br>'Радон'-собе           | --                               | --   | --                               | 580± 150                      | 0,2              |
| Нишка Бања-<br>каптажа<br>'Мало грло' | 6431± 599                        | 97± 10   | 29,0                             | 177± 18                       | 0,02             |
| Соко Бања<br>Институт                 | --                               | --   | --                               | 126± 13                       | 0,04             |
| Соко Бања-<br>купатило                | 973± 88                          | 14± 3  | 4,3                              | 21± 8                         | 0,002            |
| Гамзиг. Бања-<br>хидроблок            | 817± 78                          | 13± 2  | 3,9                              | 152± 20                       | 0,03             |

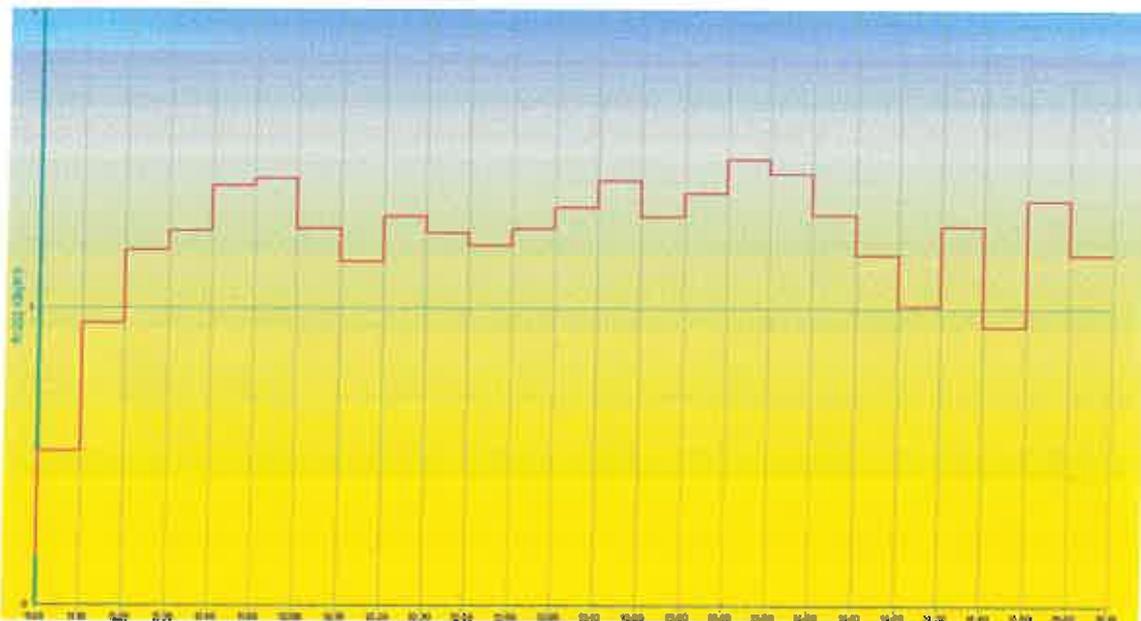
Нишка Бања се истиче својом високом радиоактивношћу и топлим изворима, и спада у ред слабо алкалних и благо минерализованих вода. Услед повећане концентрације радона, односно радијума, назива се још и радонска вода. Термална вода извора у Нишкој Бањи, настаје мешањем обичне атмосферске воде, коју дају врела Суве планине и Коритника, и дубинске топле воде.

Истарживања су започета у затвореном базену хотела 'Радон'. Очитане вредности концентрације активности радона у води  $C_{\text{ив}}$ , као и њена коригована вредност,  $C_{\text{соп}}$ , налазе се у табели 10.1.1. и износе 9769 и  $149 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . Ако се упреде са подацима из литературе добијене вредности су ниже, што је у првом реду последица дифузије радона из воде у ваздух. Израчуната годишња ефективна доза,  $E$ , коју становништво прими услед ингестије радона је нешто изнад дозвољених вредности и реда је величине  $45,7 \times 10^{-3} \text{mSv/god.}$  Концентрација активности радона у води овог познатог лечилишта, коју и становници и посетиоци користе као воду за пиће, а и у друге сврхе, одређена је на самом истицању из каптаже 'Мало грло' и износи  $97 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , а ефективна доза ингестијом унетог радона на годишњем нивоу је  $29 \times 10^{-3} \text{mSv/god.}$ , табела 10.1.1.

Мерене концентрације активности радона у ваздуху хотела,  $C_v$ , су у опсегу од 580-1446  $\text{Bq/m}^3$ , табела 10.1.1. Мерења су вршена при радном режиму базена, тј. када је био испуњен водом и када није било интензивније измене ваздуха изнад базена. На слици 10.1.1.1. приказане су вредности концентрације радона у ваздуху базена хотела, добијене при пуној експлоатацији базена. На ординати се налази очитана концентрација активности радона а на апсциси одговарајући временски интервал праћења. Ефективна еквивалентна доза удахнутог радона,  $EED$ , на годишњем нивоу која одговара концентрацији присутног радона је  $0,5 \text{mSv/god.}$ , табела 10.1.1. Интензивно проветравање базена, као и измене воде у њему по устаљеном режиму сваке вечери умањити концентрацију присутног радона.

Концентрација радона мерена је и на различитим местима и нивоима једанаестоспратног хотела 'Радон'. У холовима хотела, као и пространим салама, где се ваздух перманентно измењује, концентрација радона је у интервалу 82-190  $\text{Bq/m}^3$ , а ефективна еквивалентна доза удахнутог радона  $0,06 \text{mSv/god.}$ , табела 10.1.1. Дистрибуција радона у испитиваним местима, директно је у корелацији са могућношћу дотока ексхалираног радона из термоминералне воде. Како се термоминерална вода налази у систему водовода читавог хотела, у собама и другим просторијама које се не проветравају долази до највеће акумулације радона. На већини испитиваних места ове локације, просечна вредност концентрације радона налазила се у интервалу од 150 до  $580 \text{Bq/m}^3$ . Показало се да дистрибуција радона

у унутрашњости хотела не зависи од висине, јер допринос концентрацији радона првенствено долази од ексхалације гаса радона из термоминералне воде. У спаваћим собама хотела тај допринос долази од унутрашњих тоалета где се та вода користи. Одређена ефективна еквивалентна доза удахнутог радона на годишњем нивоу је  $0,2\text{mSv/god.}$ , табела 10.1.1.



Слика 10.1.1.1. Концентрација радона у ваздуху базена хотела 'Радон' ( $\text{kBq/m}^3$ )

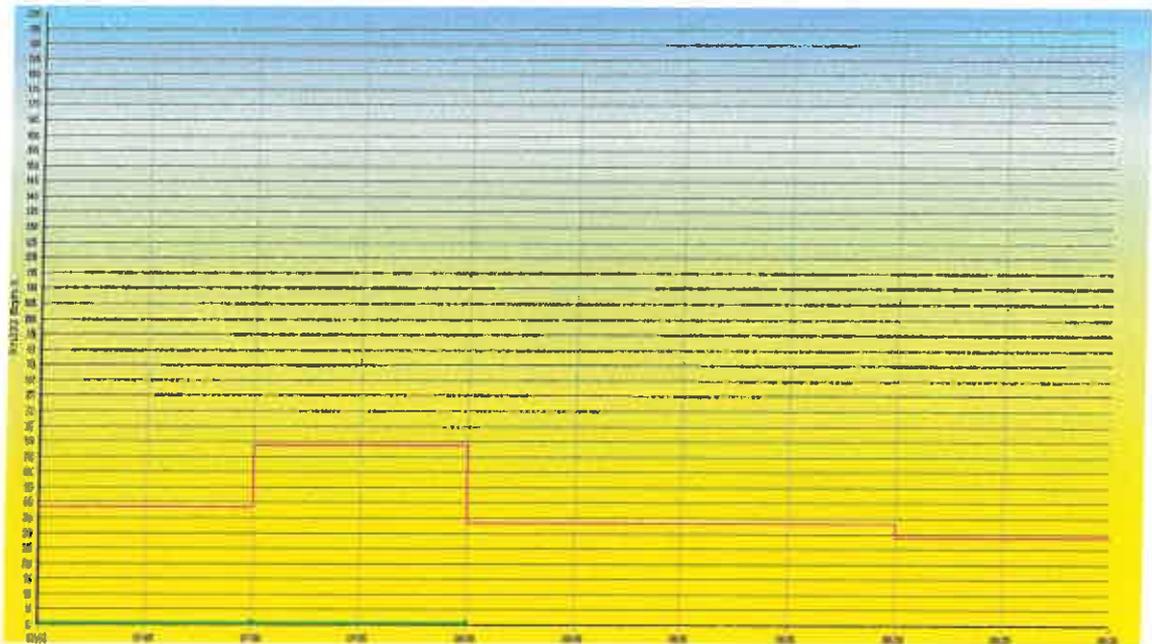
Приликом измене термоминералне воде из базена која се користила током дана, вршено је мерење концентрације радона на тераси 11. спрата хотела, која се налази изнад места испуста те воде. Услед великог испаравања, а самим тим и до интензивне ексхалације радона из воде која пада низ скоро вертикалне степенице, забележене су концентрације спољашњег радона и до  $320\text{Bq/m}^3$ . На слици 10.1.1.2. приказан је положај терасе хотела 'Радон', на којој је мерена концентрација спољашњег радона, а која се налази директно изнад места где се испушта термоминерална вода низ стрме бетонске степенице.



**Слика 10.1.2. Место испуштања термоминералне воде, које се налази директно испод терасе на којој је вршено мерење спољашњег радона**

Следећа локација на којој је праћена концентрација радона је у непосредној близини каптаже 'Мало грло', на месту избијања вишка термалне воде. Концентрација активности радона била је у интервалу од  $18\text{Bq/m}^3$  до  $177\text{Bq/m}^3$ , а израчуната ефективна еквивалентна доза на годишњем нивоу је  $0,02\text{mSv/god.}$ , табела 10.1.1. Очитане вредности се налазе у границама препоручених вредности.

Како значајан утицај има струјање ветра на присуство радона у ваздуху види се из измерених изразито ниских вредности на овој локацији. Концентрација радона је била у распону од свега 26 до  $59\text{Bq/m}^3$ , слика 10.1.1.3. Очигледно да ветар појачава расејавање радона по атмосфери.

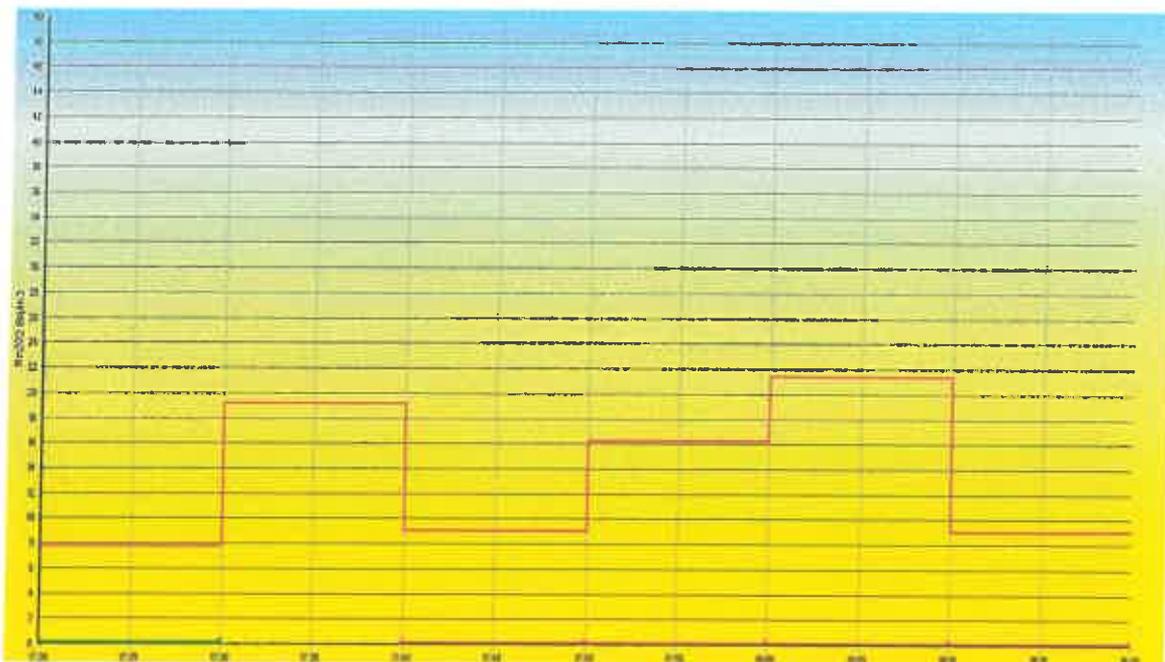


Слика 10.1.1.3. Концентрација активности радона у непосредној близини каптаже ( $Bq/m^3$ )

Термо-минерални извори Соко Бање спадају у ред термо-алкалних вода. Избијање радиоактивних гасова је велико тако да је сваки посетилац бање константно изложен благој инхалацији, што благотворно делује на дисајне путеве. Веома су разноврсног микро-садржаја и по јонском саставу припадају групи калцијум хидрокарбонатних вода.

Узорак минералне воде за испитивање узет је на самом шеталишту, на месту избијања воде из купатила. Добијене вредности концентрације,  $C_{uv}$  и  $C_{сопг}$ , приказане у табели 10.1.1. Концентрација радона присутног у води одређена обрасцем (9.1.2.3.),  $C_{сопг}$ , износи  $14 \times 10^9 Bq/m^3$ , а на основу ње израчуната годишња ефективна доза коју становништво прими услед ингестије радона је  $4,3 \times 10^{-3} mSv/god.$  Ове вредности указују на присуство радона, али више у ваздуху него у води. Његова концентрација у води је на граници нормалних вредности, док је у ваздуху ипак присуство радона интензивније у самом Институту него на отвореном. Разлог је у појачаном ветру који је умањивао присуство радона на шеталишту у тренутку мерења.

Концентрација активности радона измерена у ваздуху  $C_v$ , у просторији у приземљу Института за плућне болести Соко Бања била је у опсегу од 13 до  $126\text{Bq/m}^3$ , а годишња ефективна еквивалентна доза удахнутог радона, EED је  $0,04\text{mSv/god.}$ , табела 10.1.1. На самом шеталишту концентрација активности радона је имала минимум од  $8\text{Bq/m}^3$ , а максимум од  $21\text{Bq/m}^3$ , што се види и на слици 10.1.1.4. Годишња ефективна еквивалентна доза удахнутог радона је свега  $0,002\text{mSv/god.}$



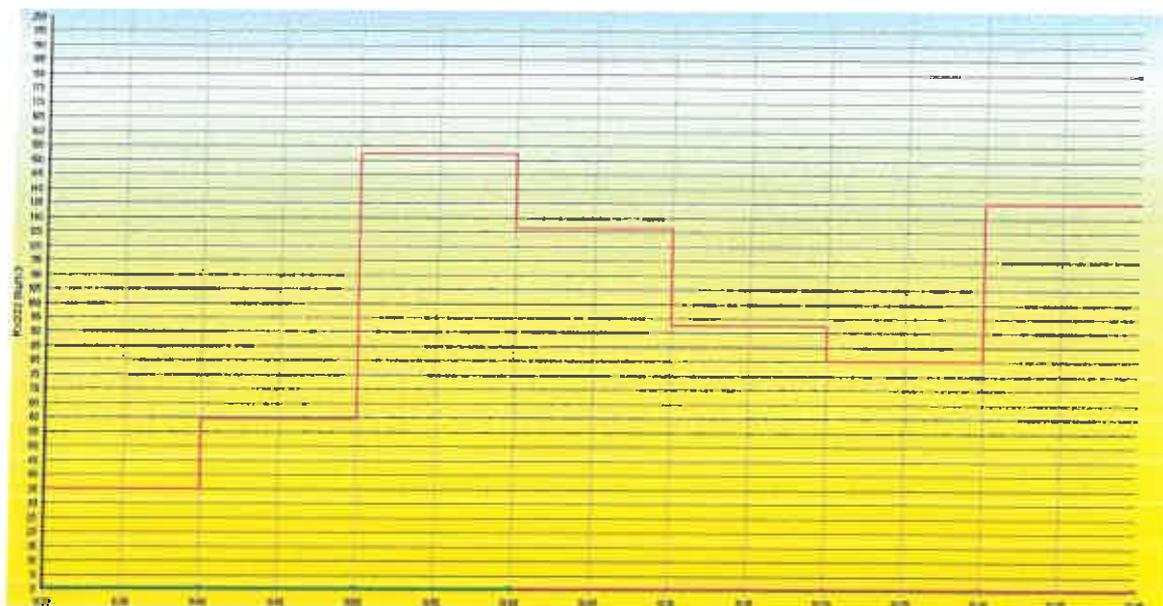
Слика 10.1.1.4. Концентрација активности радона у ваздуху на шеталишту Соко Бање( $\text{Bq/m}^3$ )

Гамзиградску Бању карактерише присуство земно-алкалне термоминералне воде. Термалне воде су веома богате микроелементима, благо минерализоване и спадају у групу хидрокарбонатних вода по јонском саставу.

Концентрација активности радона у води овог лечилишта је ниска и износи  $13 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , табела 10.1.1. Годишња доза радона унетог ингестијом је  $3,9 \times 10^{-3} \text{mSv/god.}$

Концентрација активности радона у ваздуху мерена је у хидроблоку, у сутерену, Специјалне Болнице представљена је на слици 10.1.1.5. Измерена вредност

концентрација активности радона је од 20 до 152Bq/m<sup>3</sup>, табела 10.1.1. Годишња ефективна еквивалентна доза удахнутог радона је 0,03mSv/god. И овде се може говорити о радону присутном у границама нормалних прописаних вредности.



Слика 10.1.1.5. Концентрација активности радона у ваздуху у хидроблоку Специјалне Болнице Гамзиградске Бање (Bq/m<sup>3</sup>)

Вода која се користи у сврху бржег и бољег опоравка пацијената настаје мешањем хладне и топле воде, температура од 25° до 40°C. Пуштањем у каду само хладне воде концентрација радона је ниска, у интервалу од 35 до 60Bq/m<sup>3</sup>. Отварањем славине и мешањем са топлом водом концентрација се нагло повећава до максималне вредности од 152Bq/m<sup>3</sup>. Хлађење воде прати и пад концентрације радона у просторији.

#### 10.1.2. Јачине дозе гама зрачења очитане Gamma TRACER-ом

Табела 10.1.2. која следи показује измерене јачине дозе гама зрачења на различитим местима ових бањских центара. Мерење јачине дозе гама зрачења у ваздуху,

извршена су на укупно десет локација на подручју Нишке Бање. Локације за мерење су брижљиво одабране, како би добили праве информације у истраживању. Временски интервал мерења износио је просечно 8h на сваком мерном месту. На појединим локацијама, на којима су се у току мерења временски услови перманентно мењали (интезивни ветрови), мерење је вршено у току 24h. Исто тако, мерења у затвореним базенима хотела, вршена су у току 24h и понављана више пута. У табели 10.1.2. приказане су вредности јачине доза гама зрачења у ваздуху и у Соко и Гамзиградској Бањи.

Табела 10.1.2. Вредности јачине дозе гама зрачења у ваздуху бањских центара овог реона

| Јачина дозе гама зрачења у ваздуху (nSv/h) |                     |               |         |          |
|--|---------------------|---------------|---------|----------|
| Бр.  | Локација            | Сред.вредност | Минимум | Максимум |
| 1  | Централни парк      | 111           | 62      | 153      |
| 2  | Главни извор        | 170           | 105     | 225      |
| 3  | Сува Бања           | 185           | 96      | 298      |
| 4  | Мало грло           | 215           | 97      | 352      |
| 5  | Школска чесма I     | 156           | 79      | 198      |
| 6  | Школска чесма II    | 147           | 55      | 188      |
| 7  | Бушотина НБ-1       | 135           | 58      | 186      |
| 8  | Град Ниш-Чаир       | 81            | 49      | 148      |
| 9  | Град Ниш-Аеродром   | 98            | 35      | 145      |
| 10   | Главно купатило     | 151           | 85      | 272      |
| 11   | Хотел Озрен         | 121           | 52      | 191      |
| 12   | Хотел 'Радон'-базен | 312           | 133     | 382      |
| 13   | Соко Бања-Институт  | 127           | 112     | 139      |
| 14   | Гам. Бања-хидроблок | 117           | 108     | 131      |

Да би се мерења одвијала на свим мерним локацијама под истим условима, вршена су у истим временским интервалима. Јачина гама дозе праћена је на 'отвореном', у спољашњој средини на 9 локација (1-9) и у самим хотелима и другим бањским

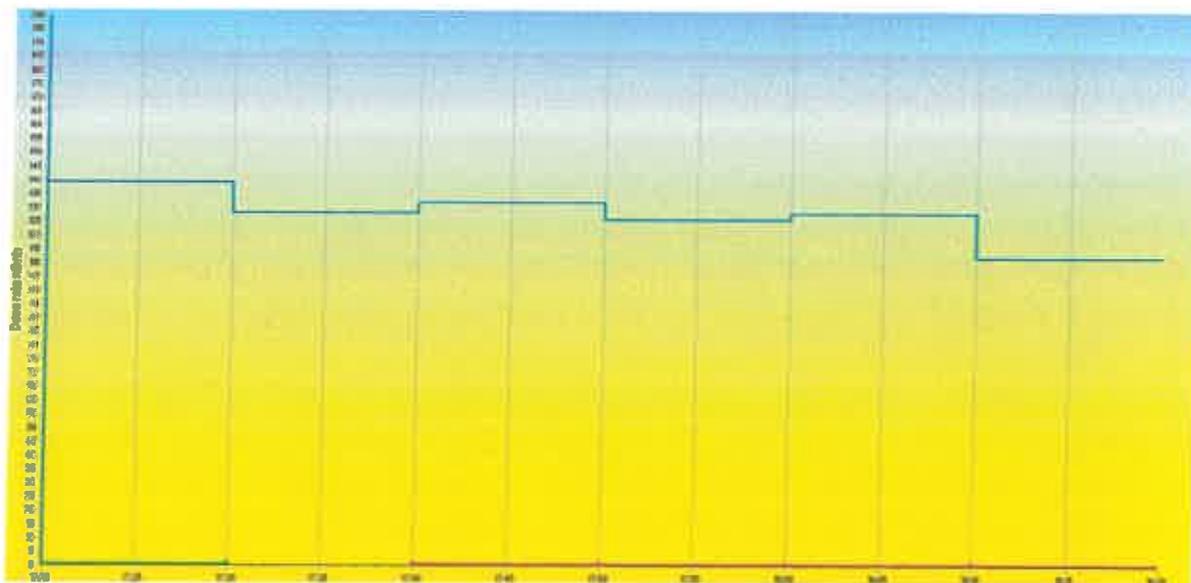


објектима на 5 локација (10-14). Примећено да су највеће варијације јачине дозе гама зрачења у ваздуху мерних места на отвореном простору (Централни паркомерно место бр.1, затим на мерном месту бр.7- Бушотина НБ-1, као и мерним местима бр.5 и бр.6 - Школска чесма I и Школска чесма II, респективно). Мерења у парку туристичко-рекреационог комплекса Нишка Бања, мерно место бр.1., су вршена више пута у различитим временским периодима и при стабилним атмосферским условима, али вредности јачине дозе незнатно су варирале и биле у интервалу од 72 до 153nSv/h. Мерно место бр.5 - Школска чесма I, као и мерно место бр.6 – Школска чесма II су издашни извори релативно хладне воде. Из табеле 10.1.2. види се да се средње вредности јачине доза на овим мерним местима налазе у опсегу од 55 до 188nSv/h, и осетно се разликују од мерних места где се налази термална вода. Ово указује могућност различите генезе ових изворских вода. Јачине доза гама зрачења у ваздуху мерног места бр.2 – Главни извор и мерног места бр.3 - Сува Бања налазиле су се у опсегу од 105 до 225 и од 96 до 298nSv/h, респективно. Мерно место бр.4 - 'Мало грло' је локација главног каптираног извора, из којег се системом разводних цеви вода дистрибуира у комплекс туристичко-рекреационог центра Нишка Бања. Мерења су вршена поред канала којим истиче вишак термоминералне воде из каптаже, као и у самом тунелу овог каптираног извора. У том тунелу регистроване су највеће средње вредности јачине доза гама зрачења, 215nSv/h, у односу на остала мерна места.

Са посебним интересовањем вршена су мерења у простору базена хотела 'Радон' - мерно место бр.12. Мерења су вршена континуирано у току 24h. Измерене јачине дозе гама зрачења биле су у опсегу од 133-382nSv/h. Када нема интензивног проветравања, измерене су највеће дозе, док су са интензивном вентилацијом ти нивои опадали. Није тешко закључити да су нивои гама зрачења у корелацији са водом која се користи у базену. А јачине дозе гама зрачења у ваздуху мерног места бр.10 - Главно купатило, налазиле су се у опсегу од 85 до 272nSv/h, и блиске су вредностима које су измерене у ваздуху хотела 'Радон'. Ова чињеница указује на подземну везу вода ових извора. Може се закључити да је термоминерална вода узрок нешто повећаних нивоа гама зрачења у реону Нишке Бање.

Као компаративна места за истраживање, биле су две локације у граду: Чаир, мерно место бр.8, где су вредности дозе гама зрачења биле у интервалу од 49 до 148nSv/h, и мерно место бр.9 - Аеродром, на којој је вредност дозе гама зрачења била у опсегу од 35 до 145 nSv/h. Ове две локације налазе се на супротним крајевима града.

Јачина дозе гама зрачења у ваздуху праћена је и у Соко Бањи, мерно место бр.13 - просторија у оквиру Института, и у Гамзиградској Бањи, мерно место бр.14 - купатило хидроблока. Јачина дозе гама зрачења која прати концентрацију радона у Институту Соко Бање нема изражену варијацију вредности, у интервалу је од 112 до 139nSv/h, а што је показано на слици 10.1.2.1.



Слика 10.1.2.1. Јачина дозе гама зрачења у просторији Института Соко Бање (nSv/h)

Измерена јачина гама дозе зрачења на мерном месту бр.14 је у интервалу од 108 до 131nSv/h, слика 10.1.2.2., са не тако изражајним променама вредности. И на једном и на другом мерном месту може се говорити о увек присутној одређеној концентрацији радионуклида у ваздуху.



Слика 10.1.2.2. Јачина дозе гама зрачења у купатилу хидроблока Специјалне Болнице Гамзиградска Бања (nSv/h)

### 10.1.3.Континуирано праћење концентрације активности радона у ваздуху помоћу CR-39 траг детектора

Познато је да човек у затвореном простору проведе просечно 80% свог времена. Када радон из ваздуха доспе у затворен простор може у њему достићи велику концентрацију, а узрок томе је радон ослобођен из земљишта и грађевинског материјала. Табела која следи представља концентрације активности радона у току једне полу-сезоне, у интервалу зима-пролеће. Континуирано мерење се одвијало у породичним кућама, у просторијама у којима се проводи већи део дана. Мерна места 1 - 8 се односе на куће у Нишкој Бањи које се налазе дуж тока бањске реке, а мерна места 9 - 11 се односе на куће које се налазе у самом центру Соко Бање.

Табела 10.1.5. Радон присутан у ваздуху у кућама Нишке и Соко Бање

| Бр. | Rn(Bq/m <sup>3</sup> ) |     |      | EED<br>(mSv/god) |
|-----|------------------------|-----|------|------------------|
|     | Ср.вред.               | мин | макс |                  |
| 1   | 54                     | 11  | 97   | 0,03             |
| 2   | 85                     | 16  | 153  | 0,05             |
| 3   | 59                     | 16  | 101  | 0,035            |
| 4   | 55                     | 10  | 97   | 0,03             |
| 5   | 44                     | 9   | 79   | 0,022            |
| 6   | 39                     | 7   | 66   | 0,02             |
| 7   | 42                     | 8   | 76   | 0,02             |
| 8   | 92                     | 11  | 165  | 0,06             |
| 9   | 85                     | 16  | 149  | 0,05             |
| 10  | 75                     | 12  | 133  | 0,04             |
| 11  | 49                     | 9   | 84   | 0,03             |

Подаци указују на појачано присуство у оним кућама које су саграђене од седиментног материјала и без подрумских просторија, мерно место бр.2, 8. и 9.: 153, 165 и 149Bq/m<sup>3</sup>, респективно. То указује на већу могућност продора радона из земљишта директно у куће кроз пукотине у подовима или емисијом из грађевинског материјала. Али се ипак може говорити о радону присутном у границама препоручених вредности. У табели су дате и вредности годишње еквивалентне ефективне дозе удахнутог радона (EED) у кућама, које одговарају нормалним вредностима. Повишене концентрације радона уочене су у зимском периоду када су проветравања просторија слаба, и када у свим просторијама није иста температура, у односу на пролећни период када су температуре у кућама изједначене и када је проветравање интензивније.

## 10.2.Реон Српског кристалоног језера

### 10.2.1. Концентрације активности радона у води и ваздуху мерене AlphaGUARD мерним системом

Табела 10.2.1. Концентрација активности радона у води и ваздуху неких бањских центара овог реона

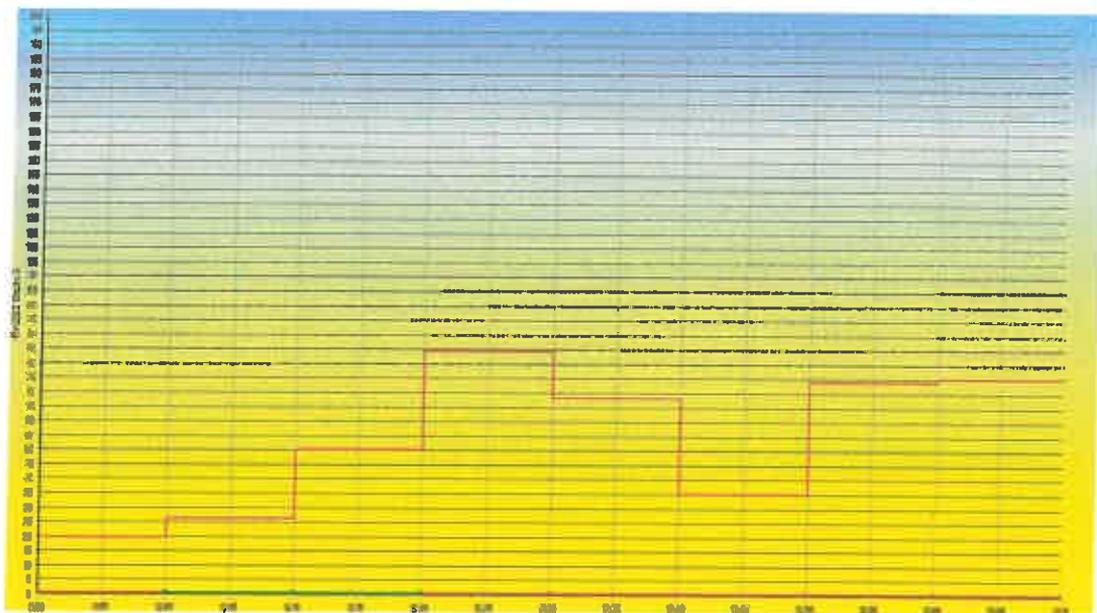
| Место                         | $C_{\text{лив}}$<br>(Bq/m <sup>3</sup> ) | $C_{\text{соп}}$<br>(x10 <sup>3</sup> Bq/m <sup>3</sup> ) | E<br>(x10 <sup>-3</sup> mSv/god) | $C_v$<br>(Bq/m <sup>3</sup> ) | EED<br>(mSv/god) |
|-------------------------------|--|---|----------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Сијаринска Бања-хидроблок     | 1070± 115                                | 17± 3   | 5,2                              | 65± 20                        | 0,04             |
| Сијаринска Бања-инхалаторијум | --                                       | --  | --                               | 88± 30                        | 0,06             |
| Врањска Бања-хидроблок        | 852± 73                                  | 13± 2   | 3,9                              | 50± 18                        | 0,03             |
| Рибарска Бања-хидроблок       | 1343±120                                 | 21± 2   | 6,5                              | 65± 21                        | 0,04             |
| Пролом Бања-базен             | 312± 27                                  | 7± 2  | 2,1                              | 25± 4                         | 0,02             |

Сијаринска Бања је богата минералним водама температуре од 32°C до 72°C, које се због високих температура користе за загревање бањског комплекса. Бања поседује изворе сумповито-гвожђевите радиоактивне воде. Припадају групи алкалних вода. По богатом гасном саставу сврставају се у ред угљокиселих вода.

Минерална вода која се користи у терапијске сврхе је помешана, и температуре је од 47,5°C. Концентрација активности радона у води,  $C_{\text{соп}}$  је вредности од 17x10<sup>3</sup>Bq/m<sup>3</sup>, математичким путем одређена. За дату вредност годишња доза радона унетог ингестијом, E је 5,2x10<sup>-3</sup>mSv/god. Вредности ових величина дате су у табели 10.2.1. У инхалаторијуму се издан налази на дубини од 1,5m, тако да узорковање воде није било могуће. Вода којом се снабдева Специјална Болница у

терапијске сврхе, је истог састава тако да израчуната концентрација радона карактерише и инхалаторијум.

Концентрација радона у ваздуху,  $C_v$ , табела 10.2.1., у хидроблоку Специјалне Болнице је у интервалу од  $20\text{Bq/m}^3$  до  $65\text{Bq/m}^3$ , слика 10.2.1.1. Услед велике влажности терапије се одвијају при отвореним прозорима. Поштујући начин рада и процедуру у Специјалној Болници и мерења су се одвијала под тим условима. Годишња ефективна доза удахнутог радона, EED је  $0,04\text{mSv/god}$ .

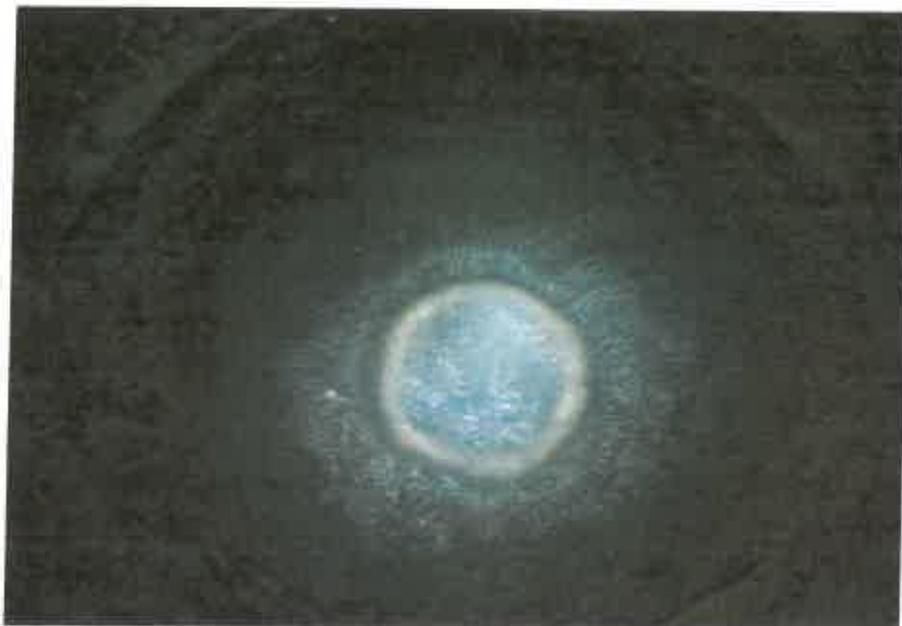


Слика 10.2.1.1. Концентрација активности радона у ваздуху хидроблока Сијаринске Бање ( $\text{Bq/m}^3$ )

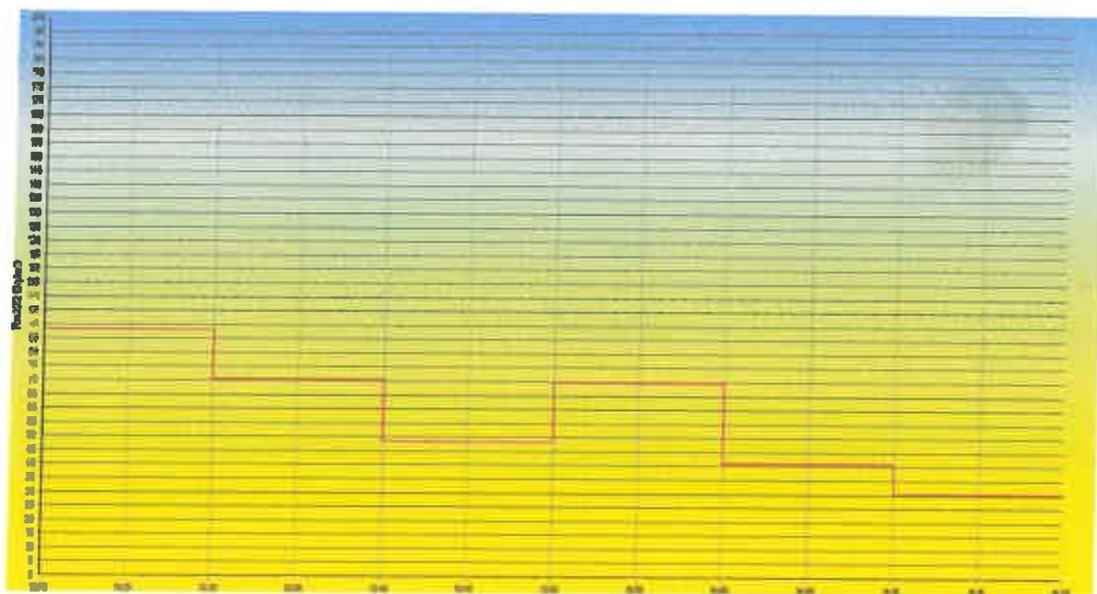
Пре пуњења каде ниво радона у просторији је био низак,  $20\text{Bq/m}^3$  да би након одређеног времена концентрација почела да расте. Радон је ексхалтирао из воде и повећао своје присуство у ваздуху.

У инхалаторијуму Сијаринске Бање, који је изнад болнице, налази се врућ извор сумпоровите минералне воде температуре  $78^\circ\text{C}$ . Просторија је практично испуњена влагом и мирисом вод<sup>0</sup>никсулфида. На слици 10.2.1.2. може се видети како термална вода ври из издана.

Концентрација радона у ваздуху у инхалаторијуму Сијаринске Бање имала је и минималну од  $30\text{Bq/m}^3$ , максималну вредност од  $88\text{Bq/m}^3$ , слика 10.2.1.3. Годишња ефективна еквивалентна доза инхалираног радона је  $0,06\text{mSv/god}$ . Вредности су приказане у табели 10.2.1.



Слика 10.2.1.2. Извор термоминералне воде у инхалаторијуму Сијаринске Бање



Слика 10.2.1.3. Концентрација радона у ваздуху у инхалаторијуму Сијаринске Бање ( $\text{Bq/m}^3$ )

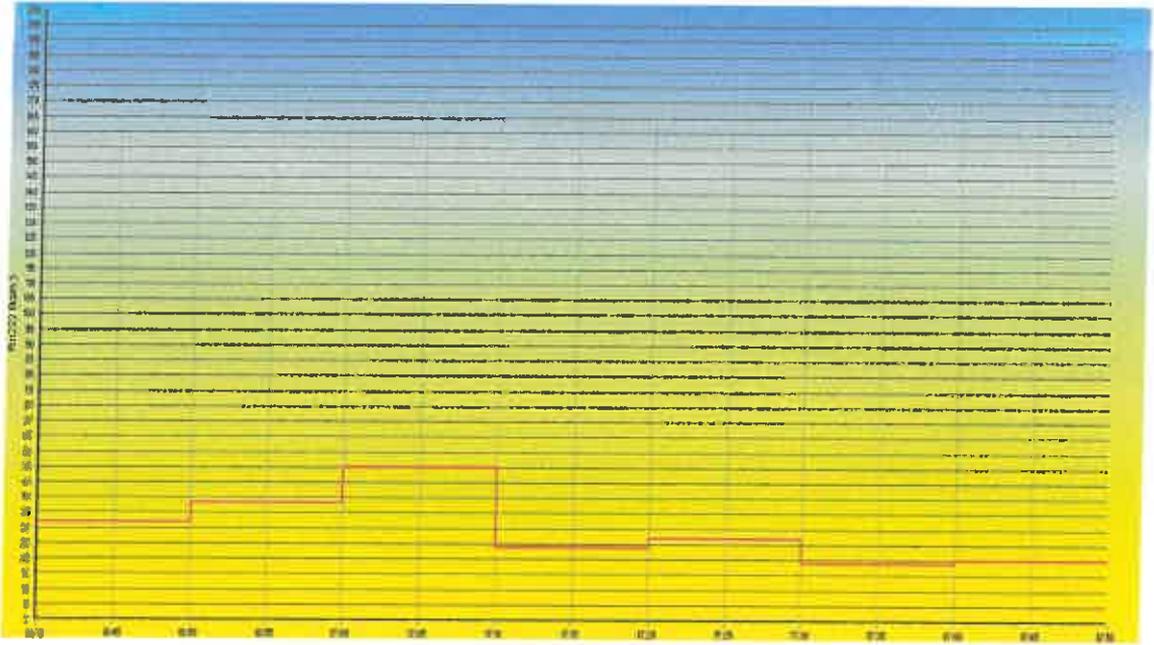
Са слике се може видети да променљивост концентрације радона у зависности од климатских прилика. На почетку мерења ветра није било, па се заступљеност радона креће у распону од 75 до 90Bq/m<sup>3</sup>. Како се време променило и ветар појачао концентрација радона је опала нагло на 30Bq/m<sup>3</sup>. Ветар је појачао расејавање радона по ваздуху и умањио на тај начин присуство у просторији у које продире кроз покутине у зидовима.

Врањска Бања је најстарија и најтоплија бања у Србији, која својим лековитим термоминералним водама благотворно делује на људски организам. Минерални извори настали су избијањем топле подземне воде из пукотинског система магматских стена и носе разне минералне честице шкриљаца, ситнозрних гнајсева и кварца. Састав вода проистиче из самог земљишта, а настају инфилтрацијом атмосферских вода у тло. Највећа дубина до које се воде спуштају је 5km, где је њена температура од 150° до 180°C. То је и највећа дубина неког хидрогеотермалног резервоара. Присуство сумпорводоника као и повећан садржај јона сулфата даје води горак укус и мирис на покварена јаја, што их сврстава у ред топлих сулфатних вода. У бањи се топлотна енергија термалних извора углавном користи за загревање објеката, али и за технолошке потребе привреде.

Концентрација активности радона у води,  $C_{\text{вот}}$  је  $13 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , табела 10.2.1. Годишња доза радона унетог водом,  $E$  је  $3,9 \times 10^{-3} \text{mSv/god}$ .

Концентрација активности радона у ваздуху испитивана је у хидроблоку бањског стационара, у просторији у где се у терапијске сврхе мешају топла и хладна вода. Температура хладне воде је 38°C, а топле 72°C. Концентрација активности радона,  $C_v$  имала је своју минималну од 19Bq/m<sup>3</sup> и максималну вредност од 50Bq/m<sup>3</sup>, што је дато у табели 10.2.1. Интервал вредности концентрације радона представљен је сликом 10.2.1.4.





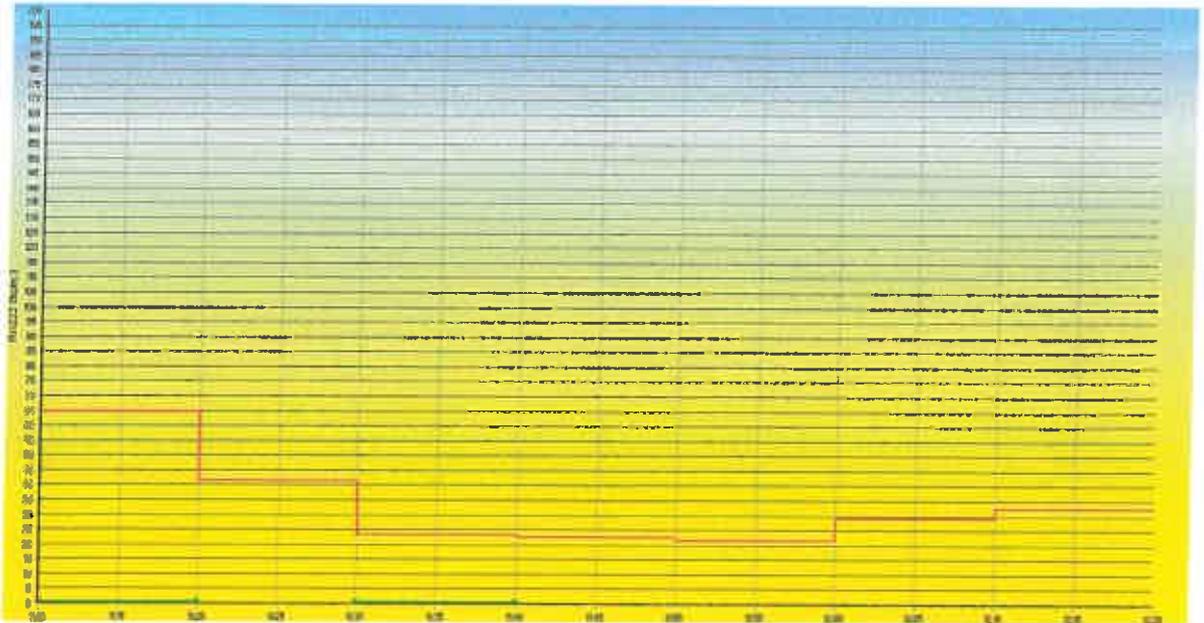
Слика 10.2.1.4. Концентрација активности радона у ваздуху у хидроблоку Врањске Бање ( $Bq/m^3$ )

Додавањем топле воде концентрација радона показује пораст од  $32Bq/m^3$  на вредност од  $60Bq/m^3$ , што указује на одређено присуство радона у води. Годишња ефективна еквивалентна доза удахнутог радона у купатилима је  $0,04mSv/god.$

Рибарска Бања обилује изворима минералне, сумповите и слабо алкалне силикатне воде. Једина је акратопега на Балкану са минералном водом температуре од  $16^{\circ}C$ .

Температура минералне воде која се користи за масажу у кадама је  $35^{\circ}C$  и стално циркулише. На основу измерене вредности концентрације активности радона у води,  $C_{iv}$  одређена је њена коригована вредност математичким путем,  $C_{согг}$  од  $21 \times 10^3 Bq/m^3$ . На основу ове концентрације присутног радона у води одређена је и његова годишња ефективна доза унетог ингестијом,  $E$  у вредности од  $6,5 \times 10^{-3} mSv/god.$ , табела 10.2.1. У води, као и у ваздуху у хидроблоку ове бање из резултата се види да је радон присутан у малим концентрацијама.

Концентрација активности радона у ваздуху у хидроблоку Специјалне Болнице је у интервалу од минималне  $21\text{Bq/m}^3$  до максималне  $65\text{Bq/m}^3$ , слика 10.2.1.5. Годишња ефективна еквивалентна доза удахнутог радона, EED је  $0,04\text{mSv/god}$ . Вредности су налазе у табели 10.2.1.



Слика 10.2.1.5. Концентрација активности радона у ваздуху у хидроблоку Рибарске Бање ( $\text{Bq/m}^3$ )

Појаве термалних вода **Пролом Бање** везују се за леву и десну страну Проломске реке, коју изграђују андезити са распуклинама од  $0.05\text{m}$  дубине. Преко дробљеног материјала, долази до инфилтрације падавина и акумулације подземних вода у системе пукотина и прслина. У ширем подручју Пролом Бање налази се више бушотина које у бањски систем уносе минералне воде са различитих дубина (од  $40$  до  $600\text{m}$ ). Минералне воде овог бањског компелкса припадају групи алкалних вода.

Коригована концентрација активности радона у минералној узоркованој води,  $C_{\text{corr}}$  је  $7 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , табела 10.2.1. Израчуната годишња ефективна доза коју становништво прими услед ингестије радона је  $2,1 \times 10^{-3} \text{mSv/god}$ . Из добијених резултата се увиђа да је радон у минералним водама присутан у траговима.

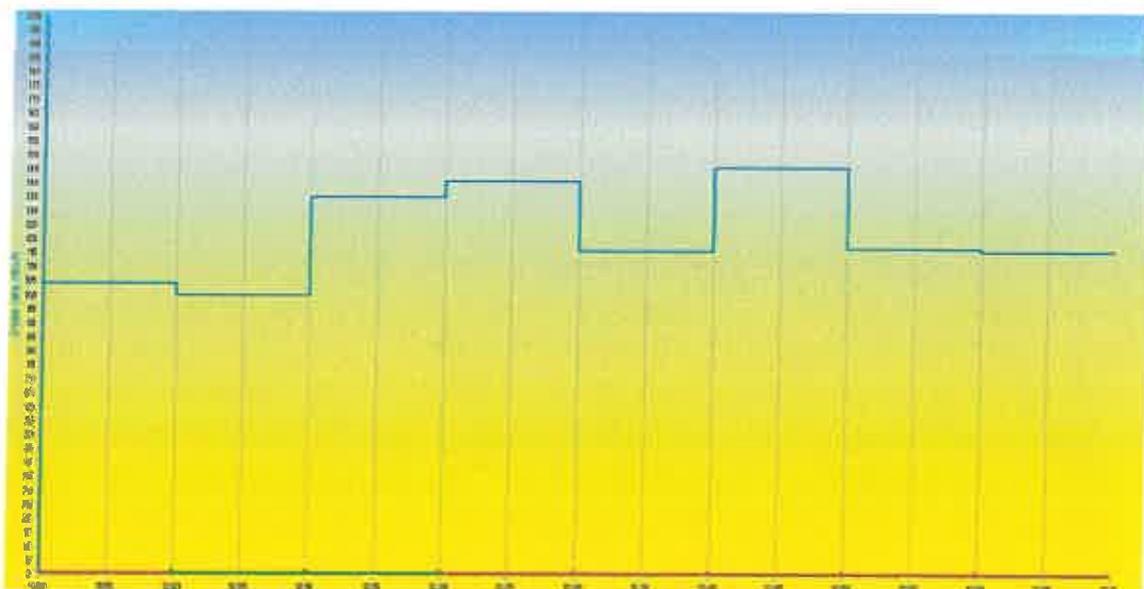
Концентрација активности радона мерена у ваздуху,  $C_v$  на базену је у интервалу од  $4\text{Bq/m}^3$  до  $25\text{Bq/m}^3$ , а ефективна годишња доза удахнутог радона је  $0,02\text{mSv/god.}$ , табела 10.2.1.

### 10.2.2. Јачине доза гама зрачења очитане Gamma TRACER-ом

Табела 10.2.2. Вредности јачине доза гама зрачења у ваздуху бањских центара овог реона

| Јачина дозе гама зрачења у ваздуху (nSv/h) |                               |               |         |          |
|--|-------------------------------|---------------|---------|----------|
| Бр.  | Локација                      | Сред.вредност | Минимум | Максимум |
| 1  | Сијаринска Бања-хидроблок     | 122           | 100     | 146      |
| 2  | Сијаринска Бања-инхалаторијум | 145           | 123     | 179      |
| 3  | Врањска Бања-хидроблок        | 165           | 140     | 198      |
| 4  | Рибарска Бања-хидроблок       | 121           | 103     | 148      |
| 5  | Пролом Бања-базен             | 36            | 12      | 56       |

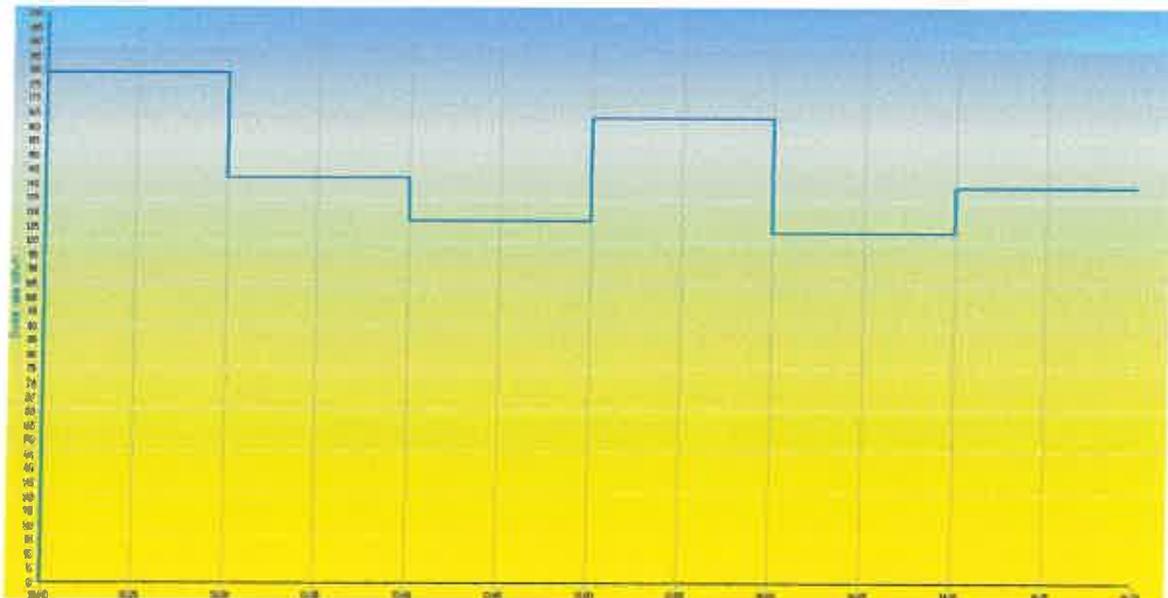
Присуство радона у ваздуху прати одређена јачина дозе гама зрачења. Интервал вредности јачине гама дозе зрачења који прати распад радона у ваздуху у просторији хидроблоку Сијаринске Бање је од  $100$  до  $146\text{nSv/h}$ , слика 10.2.2.1.



**Слика 10.2.2.1. Јачина дозе гама зрачења у просторији хидроблока Специјалне Болнице Сијаринска Бања (nSv/h)**

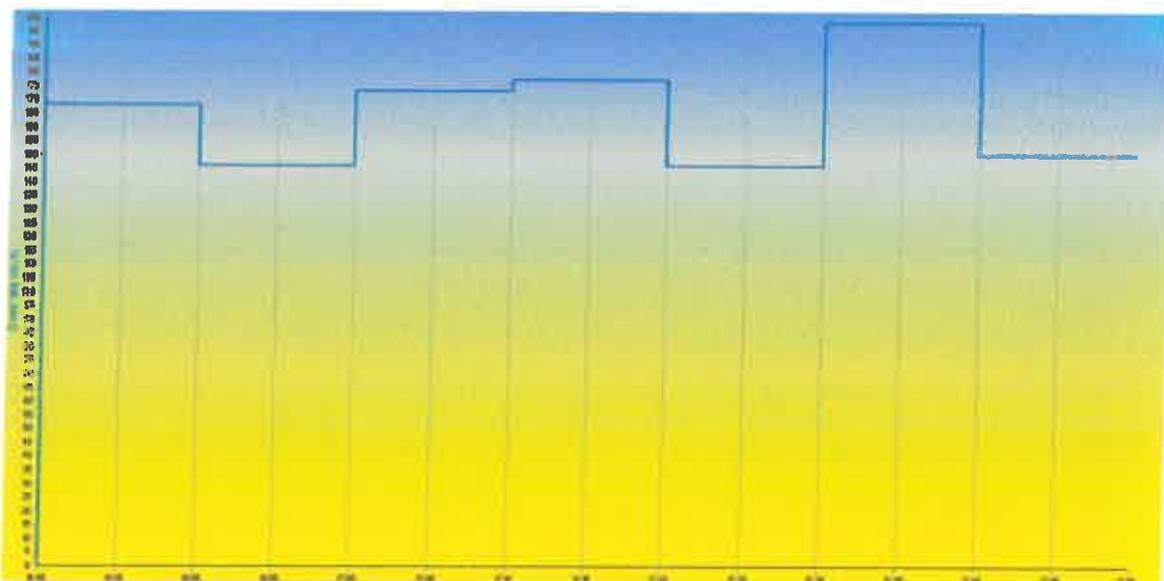
Пошто се у терапијске сврхе користи мешавина топле и хладне воде, пуштањем топле воде у каду појачава се екshalација радона из воде, што се уочава порастом јачине гама дозе у ваздуху. Након одређеног времена јачина дозе опада до своје средње вредности од 122nSv/h.

Јачина дозе гама зрачења измерена у инхалаторијуму Сијаринске Бање имала је интервал вредности од 123nSv/h до 179nSv/h, слика 10.2.2.2. Јачина гама дозе зрачења у инхалаторијуму има релативно устаљену вредност, изражава мале варијације у односу на средњу вредност. Промена временских прилика и појачано струјање ветра условило је и опадање јачине дозе зрачења.



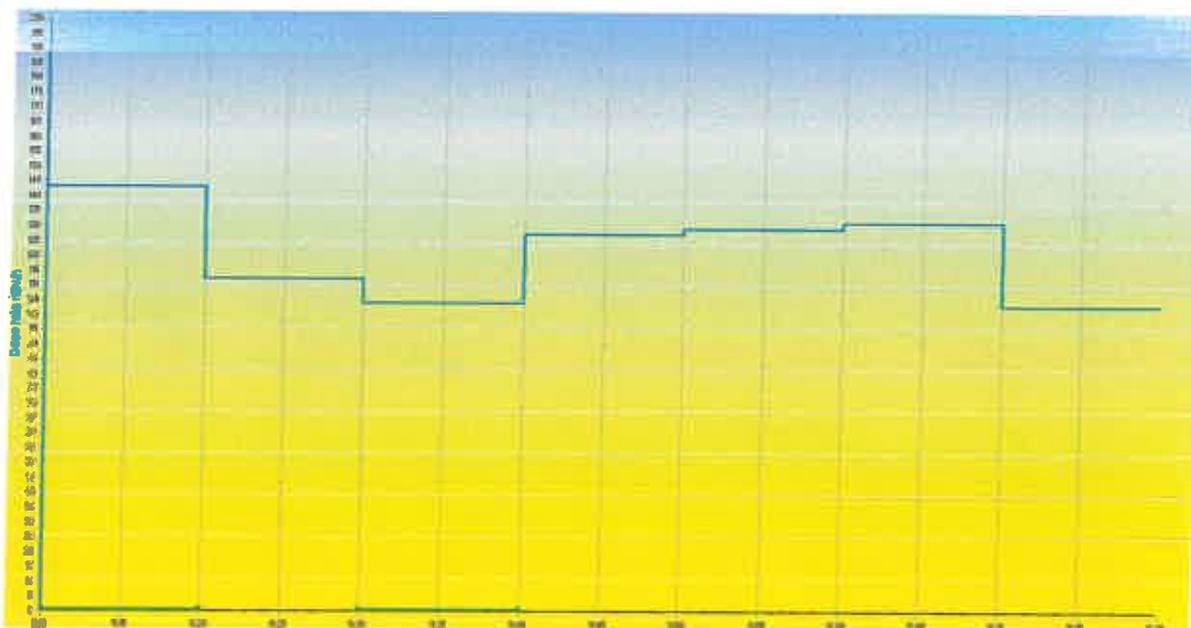
Слика 10.2.2.2. Јачина дозе гама зрачења у инхалаторијуму Сијаринске Бање (nSv/h)

У Врањској Бањи измерена доза гама зрачења је у распону од 140nSv/h до 198nSv/h, табела 10.2.2. и слика 10.2.2.3. Приликом додавања топле воде јачина гама доза зрачења нагло расте до максималне вредности, али и брзо опада на свега 120nSv/h. Разлог је у нагом ослобађању радионукида из воде у ваздух.



Слика 10.2.2.3. Јачина дозе гама зрачења у хидроблоку Врањске Бање (nSv/h)

Измерена јачина гама дозе зрачења у ваздуху у просторији хидроблока Рибарске Бање је у интервалу од 103nSv/h до 148nSv/h, слика 10.2.2.4. Са слике се може видети да јачина дозе зрачења има устаљену вредност, пошто вода у кадама хидроблока стално циркулише. Тако да се може говорити о константном присуству радионуклида у ваздуху.



Слика 10.2.2.4. Јачина дозе гама зрачења у хидроблоку Специјалне болнице Рибарска Бања (nSv/h)

Пролом Бања се карактерише јако ниском јачином гама дозе зрачења, средње вредности од свега 36nSv/h, табела 10.2.2. Овако ниска вредност се и могла очекивати, пошто је радон у води присутан у јако малој концентрацији.

### 10.3.Шумадијско-копаоничко-косовски реон

#### 10.3.1. Концентрације активности радона у води и ваздуху мерене AlphaGUARD мерним системом

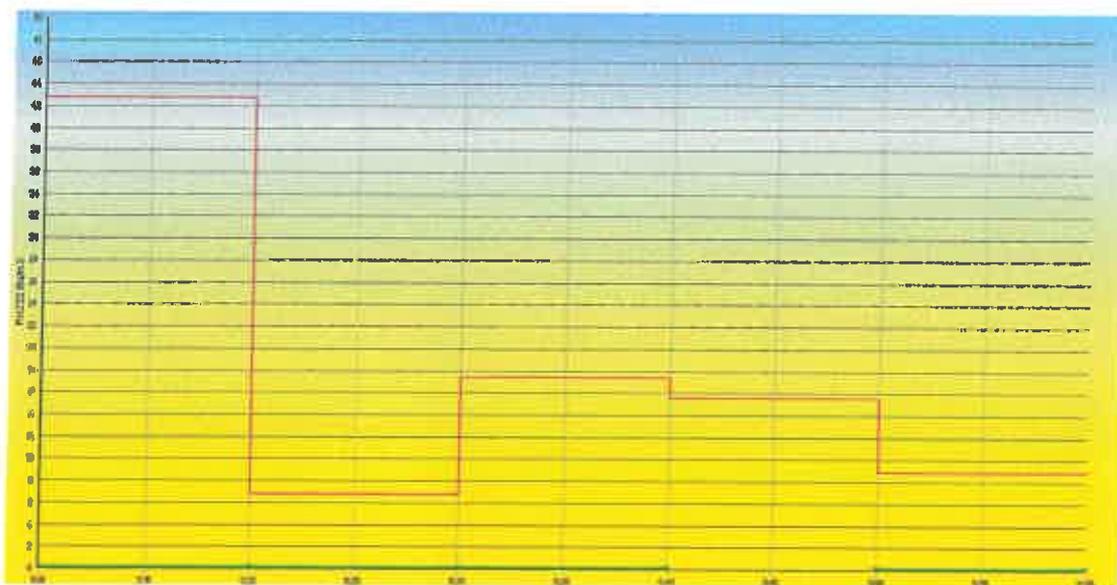
Табела 10.3.1. Концентрација активности радона у води и ваздуху познатих бањских центара овог подручја

| Место                         | $C_{uv}$<br>(Bq/m <sup>3</sup> ) | $C_{corr}$<br>(x10 <sup>3</sup> Bq/m <sup>3</sup> ) | E<br>(x10 <sup>-3</sup> mSv/god) | $C_v$<br>(Bq/m <sup>3</sup> ) | EED<br>(mSv/god) |
|-------------------------------|----------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Буковичка Бања<br>-парк       | 331± 32                          | 6± 3  | 1,8                              | 43± 7                         | 0,006            |
| Бања ГорњаТрџа<br>-хидроблок  | 1023±116                         | 16± 2   | 4,9                              | 52± 6                         | 0,004            |
| Богутовачка Бања<br>-базен    | 518± 45                          | 8± 8  | 2,5                              | 94± 10                        | 0,06             |
| Новопазарска<br>Бања-базен    | 476± 39                          | 7± 1  | 2,1                              | 16± 8                         | 0,01             |
| Матарушка Бања<br>-хидроблок  | 769± 69                          | 12± 4   | 3,7                              | 107± 9                        | 0,06             |
| Луковска Бања<br>-гејзер      | 905± 84                          | 14± 2   | 4,3                              | 21± 8                         | 0,01             |
| Јошаничка Бања<br>-чесма      | 617± 57                          | 10± 1   | 3,06                             | 44± 4                         | 0,006            |
| Врњачка Бања<br>-Римски Извор | 308± 35                          | 5±0,5   | 1,5                              | 33± 5                         | 0,003            |
| Куршумлијска<br>Бања-бушотина | 728± 65                          | 11± 1   | 3,4                              | 15± 5                         | 0,002            |
| Бања Бањска<br>-чесма         | 720± 63                          | 11± 2   | 3,4                              | 51± 6                         | 0,009            |
| Клокот Бања<br>-извор         | 969± 87                          | 15± 2   | 4,6                              | 79± 9                         | 0,05             |

Буковичка Бања је једна од најкомплетнијих балнеотуристичких центара у Србији. Ту су неисцрпни извори хладне и топле минералне воде. Буковичка минерална вода сврстава се у ред најпознатијих хладних алкално-угљенокиселих вода.

Математичким путем одређена коригована вредност  $C_{\text{кор}}$ , концентрације активности радона у води са чесме у самом парку је  $6 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , табела 10.3.1. Како се вода користи за пиће израчуната је годишња ефективна доза,  $E$ , коју становништво прими услед ингестије радона и која износи  $1,8 \times 10^{-3} \text{mSv/god.}$ , табела 10.3.1.

Концентрација активности радона у ваздуху,  $C_v$  у парку Буковичке Бање креће се у интервалу од  $7 \text{Bq/m}^3$  до  $43 \text{Bq/m}^3$ , а одређена годишња ефективна еквивалентна доза удахнутог радона,  $EED$  је  $0,006 \text{mSv/god.}$ , табела 10.3.1. Распон концентрације активности радона представљен је на слици 10.3.1.1.



Слика 10.3.1.1. Концентрација активности радона у самом парку Буковичке Бање( $\text{Bq/m}^3$ )

Истраживања су започета отварањем славине што је омогућило радону да 'напусти' минералну воду. То се на слици уочава као максимална вредност,  $43 \text{Bq/m}^3$  да би након тога уследио пад на минимум. Након тога концентрација радона показује мале варијације вредности. Ниску вредност концентрација радона прати и мала  $EED$  доза удахутог радона.

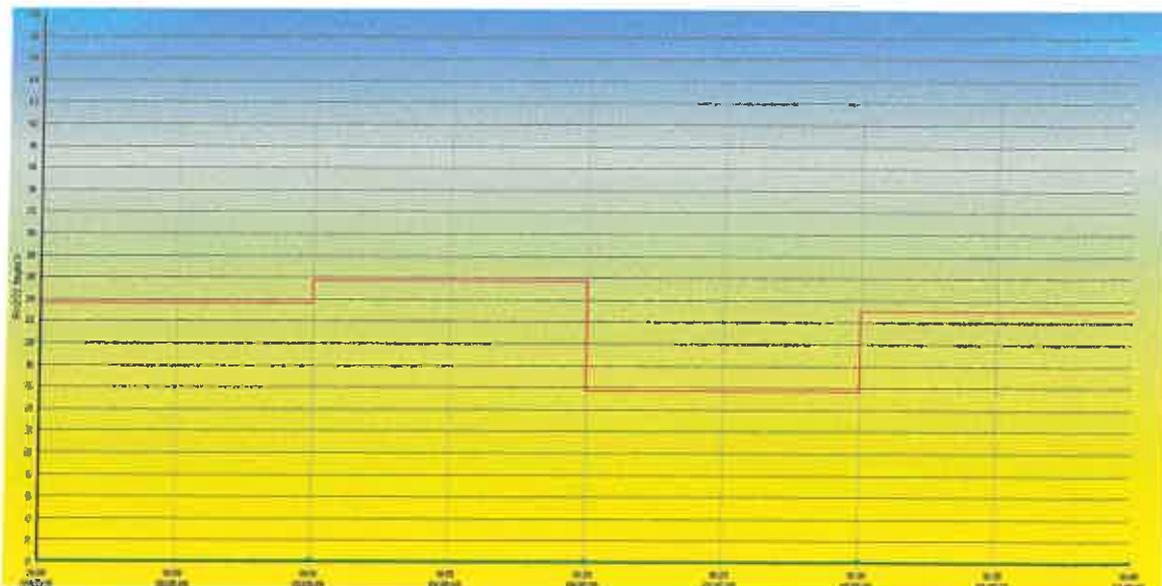


Терен на коме лежи Бања Горња Трепча обилује различитим типовима метаморфних стена, који својим саставом утичу на разноврсност минералних вода. Вода је богата калијумом, калцијумом, натријумом, хлором, баријумом, сребром, манганом, алуминијумом, оловом, хромом, никлом, бакарром, сумпором, литијумом, цезијумом, па отуда и име 'Атомска Бања'. Воде главних термалних извора су на основу компонената које садрже јувенилне, хидрокарбонатне, земноалкалне са константном температуром и саставом.

У табели 10.3.1. налазе се и концентрација активности присутног радона у води,  $C_{\text{пр}}$  након 15 дана од дана узорковања, и њена математички одређена вредност,  $C_{\text{соп}}$  од  $16 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . Ова вредност концентрације радона у води, минералне воде бање сврстава у групу слабих (благих) радиоактивних вода. Годишња ефективна доза коју становништво прими путем ингестије радона,  $E$  је  $4,9 \times 10^{-3} \text{mSv/god.}$

Концентрација активности радона у ваздуху, измерена је у центру бање, поред саме чесме која је култно место окупљања великог броја посетилаца. Интервал вредности је од  $6 \text{Bq/m}^3$  до  $24 \text{Bq/m}^3$ , слика 10.3.1.2.

У купатилу хидроблока концентрација активности радона,  $C_v$  кретала се у распону од 6 до  $52 \text{Bq/m}^3$ . Годишња ефективна еквивалентна доза удахнутог радона,  $EED$  је  $0,004 \text{mSv/god.}$ , табела 10.3.1. У просторији хидроблока концентрација радона је нешто повећана што се и очекивало пошто се радон у њој акумулира, а доспева и ексхалацијом из воде и продире споља. Ипак су обе вредности концентрације мале да би се говорило о значајном утицају радона на организам.

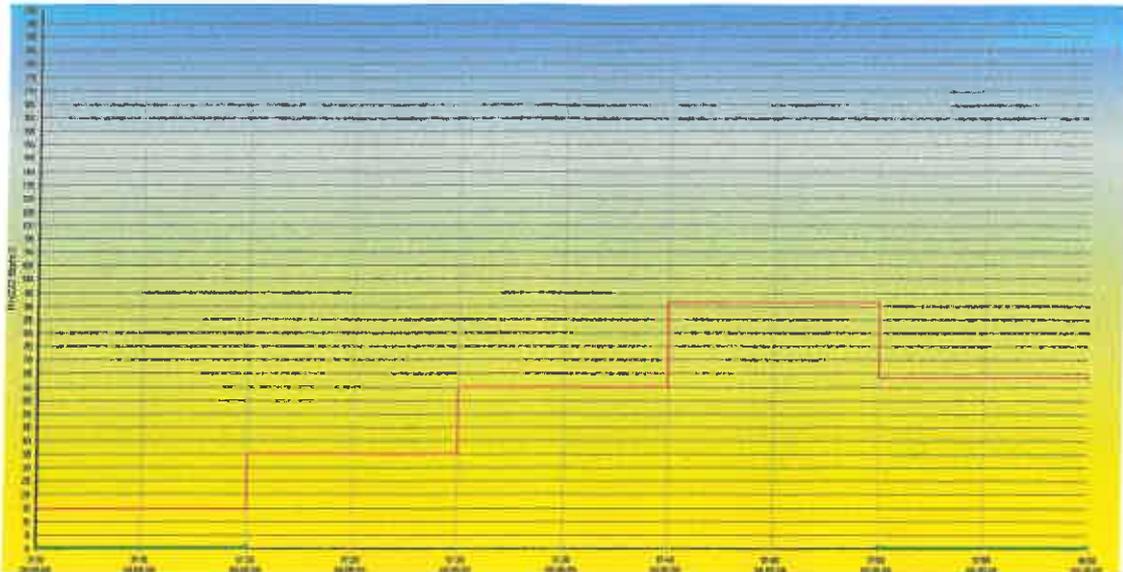


Слика 10.3.1.2. Концентрација активности радона у ваздуху у центру Бање Горња Трепча ( $Bq/m^3$ )

Терен на коме лежи **Богутовачка Бања** је од серпентинина, кречњака и магматских стена. Контакти између стена су тектонски, а термални извори избијају на месту укрштања раседа на малим дубинама до 23m. Убраја се у слабо сумпоровите воде, о чему сведочи карактеристичан мирис. Богате су још и: хидрокарбонатима, сулфатима, оксидима гвожђа, силицијума и алуминијума, натријума, магнезијума и калцијума.

Концентрација активности радона у води,  $C_{\text{вот}}$  је вредности од  $8 \times 10^9 Bq/m^3$ , табела 10.3.1. Годишња ефективна доза коју становништво прими путем ингестије радона,  $E$  је  $2,5 \times 10^{-3} mSv/god.$  Радон је у минералној води Богутовачке Бање присутан у траговима.

Концентрација активности радона у ваздуху на базену, у хотелу, је у интервалу од  $10 Bq/m^3$  до  $94 Bq/m^3$ , слика 10.3.1.3., а годишња ефективна еквивалентна доза удахнутог радона је  $0,06 mSv/god.$ , што се може видети из табеле 10.3.1.3.



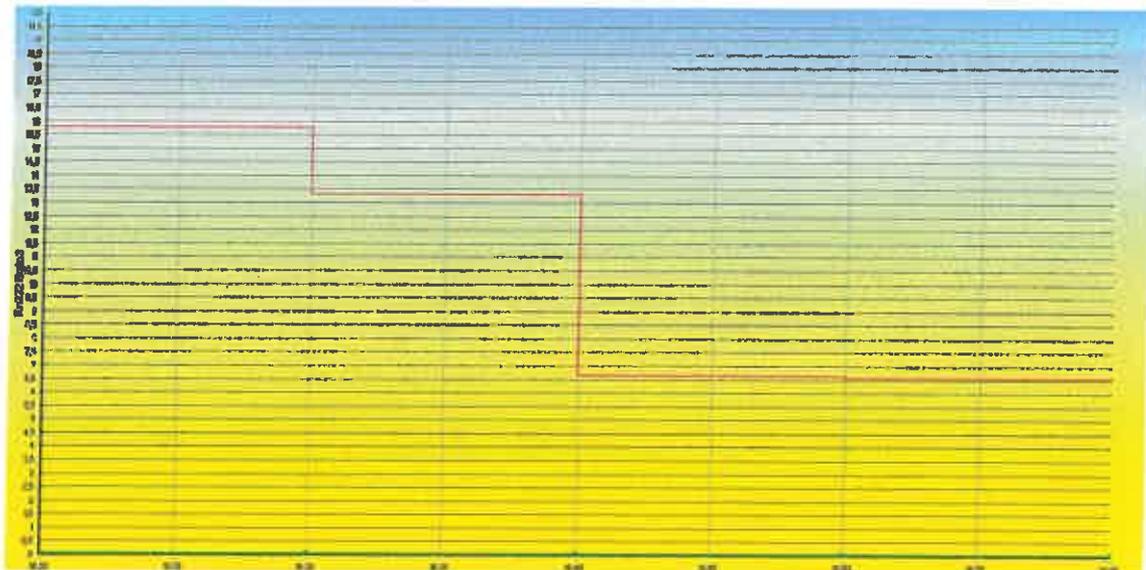
Слика 10.3.1.3. Концентрација активности радона у ваздуху базена Богutowачке Бање ( $Bq/m^3$ )

Концентрација активности радона полако достиже максималну вредност од  $94Bq/m^3$  а затим по истој законитости и опада.

Минералне воде Новопазарске Бање по хемијском саставу су сумпоровито киселе хипертерме, натријум-хидрокарбонатног типа, а које потичу из јединствене термалне карстне издани. Топла минерална вода проласком кроз еруптивне стене у дубини и кретањем дуж раседа доспева у кредне седименте и у површинском делу меша се са подземном хладном водом.

Концентрација активности радона у води је изузетно ниска  $7 \times 10^8 Bq/m^3$ . У табели 10.3.1. то је вредност  $C_{\text{сонт}}$ , на основу које је одређена ефективна доза радона унетог ингестијом на годишњем нивоу од  $2,1 \times 10^{-3} mSv/god.$

Измерена концентрација активности радона у ваздуху,  $C_v$  на базену је максималне вредности од  $16Bq/m^3$ , слика 10.3.1.4., а годишња ефективна еквивалентна доза удахнутог радона је  $0,01mSv/god.$ , табела 10.3.1.

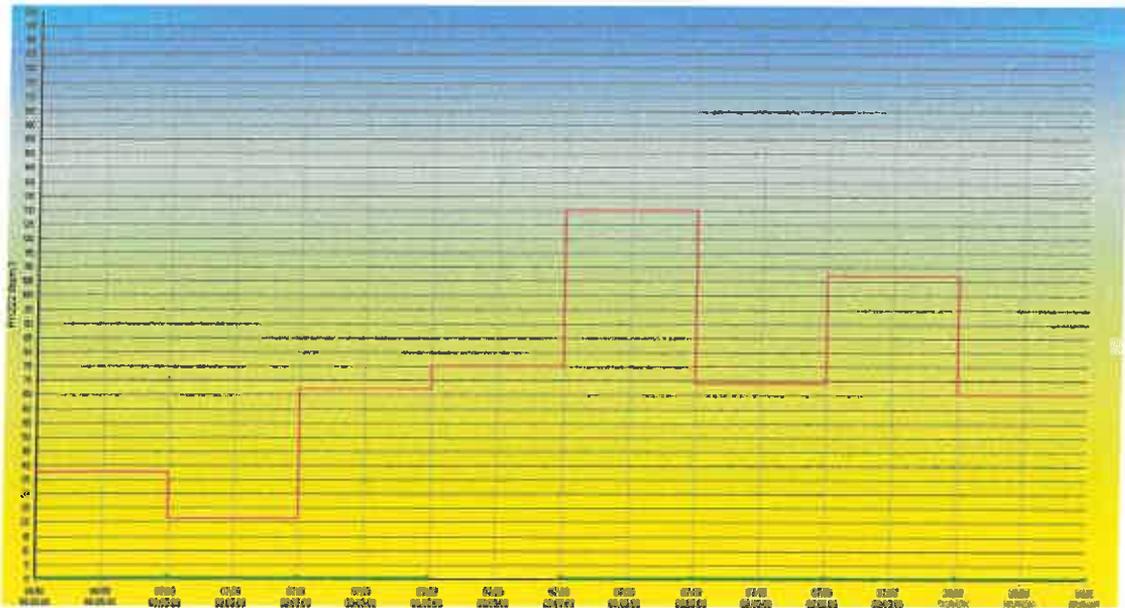


Слика 10.3.1.4. Концентрација активности радона у ваздуху базена Новопазарске Бање ( $Bq/m^3$ )

Минерална вода **Матарушке Бање** је најјача сумпоровита вода у Србији. Термоминарална вода долази са великих дубина (око 1000m), пење се раседном пукотином између вулканских стена и стиже до дубине од 3m испод површине земље, услед дубинских термичких активности, где наилази на слојеве шљунка и хумуса. Али нигде не избија сама на површину и зато су издани уствари ископани и каптирани бунари. Припада групи алкално киселих хипертерми, слабо сланих у зависности од места експлоатације.

Концентрација активности радона у води,  $C_{\text{сонт}}$  је  $12 \times 10^3 Bq/m^3$ , а на основу које је прорачуната и годишња ефективна доза радона унетог водом у организам од  $3,7 \times 10^{-3} mSv/god.$ , табела 10.3.1.

Концентрација радона у ваздуху,  $C_v$  у купатилу у хидроблока у интервалу је од 9 до  $107 Bq/m^3$ , слика 10.3.1.5. Израчуната вредност ефективне еквивалентне дозе удахнутог радона је на годишњем нивоу  $0.06 mSv/god.$  Вредности су представљене у табели 10.3.1.



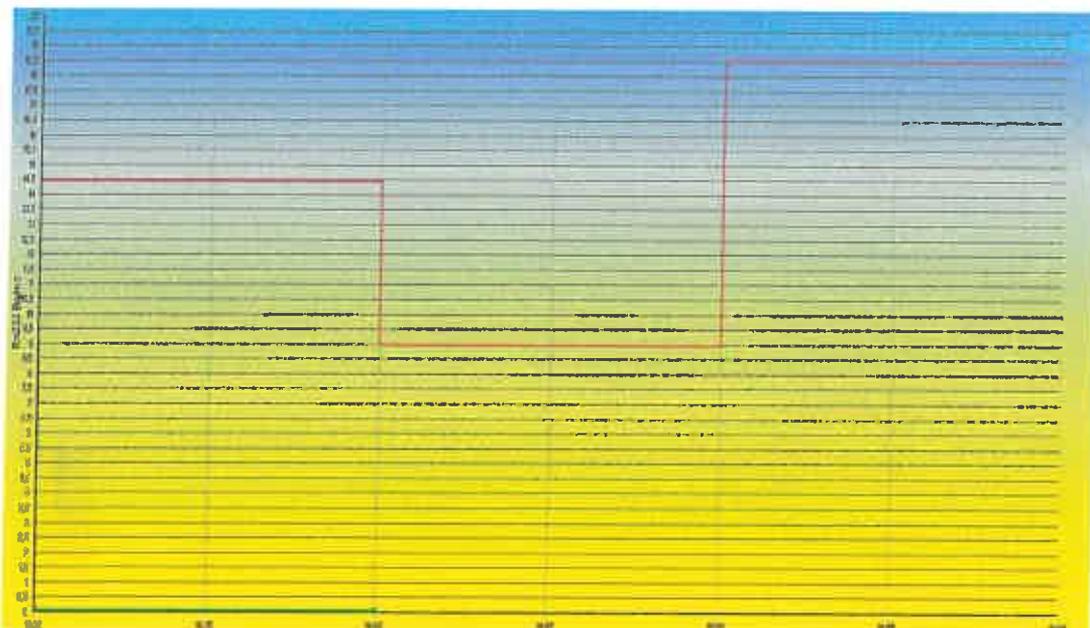
Слика 10.3.1.5. Концентрација активности радона у Матарушкој Бањи ( $Bq/m^3$ )

Лековита својства минералних вода **Луковске Бање** услед присуства великог броја различитих елемената убрајају је у ред најбогатијих бањских центара у Србији. Посебна одлика Бање је постојање 24 извора минералних извора различитих температура и хемијског састава. Термалне воде се појављују на контакту са првом хидрогеолошком баријером-границом кредног комплекса и серпентинина. Постојање кредног комплекса има улогу спроводника али и изолатора термоминералних вода, а серпентинини улогу баријере. Сви они функционишу као дубоки колектори минералних вода. Присутне магматске стене су добри преносиоци температуре и тако загревају изданске воде.

Концентрација активности радона у води је мала. Њена коригована вредност,  $C_{\text{соп}}$  износи  $14 \times 10 Bq/m^3$ . Одређена је и годишња ефективна доза радона унетог у организам путем воде у вредности од  $4,3 \times 10^{-3} mSv/god.$ , табела 10.3.1.

Концентрација активности радона мерена је у ваздуху и у хидроблоку и код гејзера. Концентрација активности радона у ваздуху у хидроблоку је у опсегу од 9 до  $19 Bq/m^3$ , са годишњом ефективном еквивалентном дозом изузетно ниском од свега  $0,006 mSv/god.$  Концентрација активности радона у ваздуху код гејзера је у распону

од  $8\text{Bq/m}^3$  до  $21\text{Bq/m}^3$ , слика 10.3.1.6. и у табели 10.3.1. означена је као  $C_v$ . Годишња еквивалентна ефективна доза удахнутог радона је у код гејзера  $0,02\text{mSv/god}$ .



Слика 10.3.1.6. Концентрација активности радона у ваздуху ког гејзера у Луковској Бањи ( $\text{Bq/m}^3$ )

Јошаничка Бања има пет извора са обиљем вреле воде, који избијају из пукотинских издана. Глави извор је најтоплији, температуре  $78,5^\circ\text{C}$  и најиздашнији. Минерална вода бање садржи највише натријума, калијума и калцијума, као и хидрокарбоната, сулфата и хлора. Припада групи алкалних сумпоровитих хипертерми.

Радон је у води присутан у малој концентрацији од свега  $10 \times 10^9 \text{Bq/m}^3$ , табела 10.3.1. Мала концентрација активности радона у води условиће и ниску вредност годишње ефективне дозе радона унетог ингестијом од  $3,06 \times 10^{-3} \text{mSv/god}$ .

У табели 10.3.1. дате су вредности концентрације активности радона мерене у ваздуху,  $C_v$  код чесме, опсега од 4 до  $44 \text{Bq/m}^3$ , као и вредност годишње еквивалентне ефективне дозе удахнутог радона, EED од  $0,006 \text{mSv/god}$ .

**Врњачка Бања**, највеће и најпознатије бањско лечилиште у Србији, обилује топлим и хладним минералним изворима богатим природним минералима, од којих се неки користе за балнеолошку терапију. 'Топла вода' је једини извор на свету који има температуру људског тела,  $36,5^{\circ}\text{C}$ , а користи се за купање и пиће. Интензивна магматска и вулканска активност условила је сложену грађу терена на коме лежи Врњачка Бања. На свом путу до избијања вода са собом носи елементе садржане у магматским стенама киселог и базног карактера, и на површину избијају кроз пукотинске издане. Бању карактерише шест познатих извора, који се према хемијском саставу сврставају у слабо алкалне, угљенокиселе минералне воде, а карактерише их и присуство сумпора.

Радон је у овим минералним водама присутан у траговима, нашта указује и јако ниска концентрација активности радона у води,  $C_{\text{сорт}}$  од свега  $5 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . Годишња ефективна доза коју становништво прими путем ингестије радона је  $1,5 \times 10^{-3} \text{mSv/god.}$  Подаци се налазе у табели 10.3.1.

Концентрација активности радона мерена у ваздуху у центру Врњачке Бање, код Римског извора је варијала од 5 до  $33 \text{Bq/m}^3$ , а годишња удахнута еквивалентна ефективна доза радона је  $0,003 \text{mSv/god.}$ , табела 10.3.1.

**Куршумлијска Бања** је позната и по лековитом блату, и по изворима сумпоровитих, угљенокиселих, алкалних, гвожђевитих лековитих минералних вода. Осим у терапијске сврхе, термоминералне воде користе се и за топлификацију бањског комплекса. Бања се налази на ободу вулканогеног комплекса планине Радан, где је услед дуготрајне вулканске активности дошло је до формирања хидрогеотермалних минерала: кварца, барита, калцита, пџитра, лимонита, опала и маркасита. Постојање раседних зона указује да су се хидрогеотермални флуиди кретали ка површини, где избијају кроз пукотине. Термалне воде, које на самим извориштима имају температуру и до  $66^{\circ}\text{C}$  у себи садрже водониксулфид. Због сличности у хемијском саставу хладних и топлих вода намеће се закључак о јединственом матичном издану, као да су последица примарне акумулације воде.

Температура термалне воде издана је била 60°C. Концентрација активности радона,  $C_{\text{соп}}$  у термалној води овог издана мала,  $11 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . Одређена годишња ефективна доза радона унетог водом у организам је  $3,4 \times 10^{-3} \text{mSv/god.}$ , табела 10.3.1.

Концентрација активности радона у ваздуху на самом издану термалне воде у центру Куршумлијске Бање варира је од минималне вредности од  $5 \text{Bq/m}^3$  до максималних  $15 \text{Bq/m}^3$ , а израчуната еквивалентна доза удахнутог радона на годишњем нивоу је  $0,002 \text{mSv/god.}$ , табела 10.3.1.

На северу Косова и Метохије налази се Бања Бањска, богата изворима топле минералне воде. Издани из којих вода избија из земље након пробијања кроз стене углавном магматског порекла су пукотински и углавном каптирани. Мада се још увек на неким местима може видети како топла вода несметано избија из тла. Минералне воде Бањске припадају реду натријум-хидрокарбонатних вода, са повећаном концентрацијом азота. Бања Бањска је сада много познатија по прелепом српском манастиру Бањска из XIII века него по лековитости минералних вода.

Коригована вредност концентрације радона узорковане минералне воде са импровизоване чесме у самом центру бање,  $C_{\text{соп}}$  је  $11 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . Пошто је становништво користи за пиће одређена годишња ефективна доза примљена путем ингестије радона је  $3,4 \mu\text{Sv/god.}$ , табела 10.3.1.

У центру, поред саме чесме из које избија минерална вода, измерена је концентрација активности радона у ваздуху,  $C_v$ . Посматрајући добијену вредност, од  $5 \text{Bq/m}^3$ , може се рећи да је заступљеност радона у ваздуху овог подручја испод нормалних вредности, а измерена ефективна еквивалентна доза удахнутог радона на годишњем нивоу је  $0,009 \text{mSv/god.}$ , што је дато у табели 10.3.1.

Клокот Бања се налази на југу Србије, у косметској општини Витина. Термалне воде Клокот Бање се могу сврстати у групу натријум-хидрокарбонатних вода, а по гасном саставу припадају групи угњендиоксидних вода.

Измерене концентрације активности радона у минералној води која се користи за пиће показују да је заступљен у одређеним количина,  $15 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , а израчуната је и



годишња ефективна доза примљена путем ингестије радона,  $E$  и износи  $4,6 \times 10^{-3}$  mSv/god. Вредности се налазе у табели 10.3.1.

Концентрација активности радона у ваздуху мерена је у дворишту породичне куће која поседује издане хладне,  $19^{\circ}\text{C}$ , и топле воде,  $27^{\circ}\text{C}$ . Вредност  $C_v$  је у интервалу од 9 до  $79\text{Bq/m}^3$ , а удахнута еквивалентна доза на годишњем нивоу је  $0,005\text{mSv/god.}$ , табела 10.3.1.

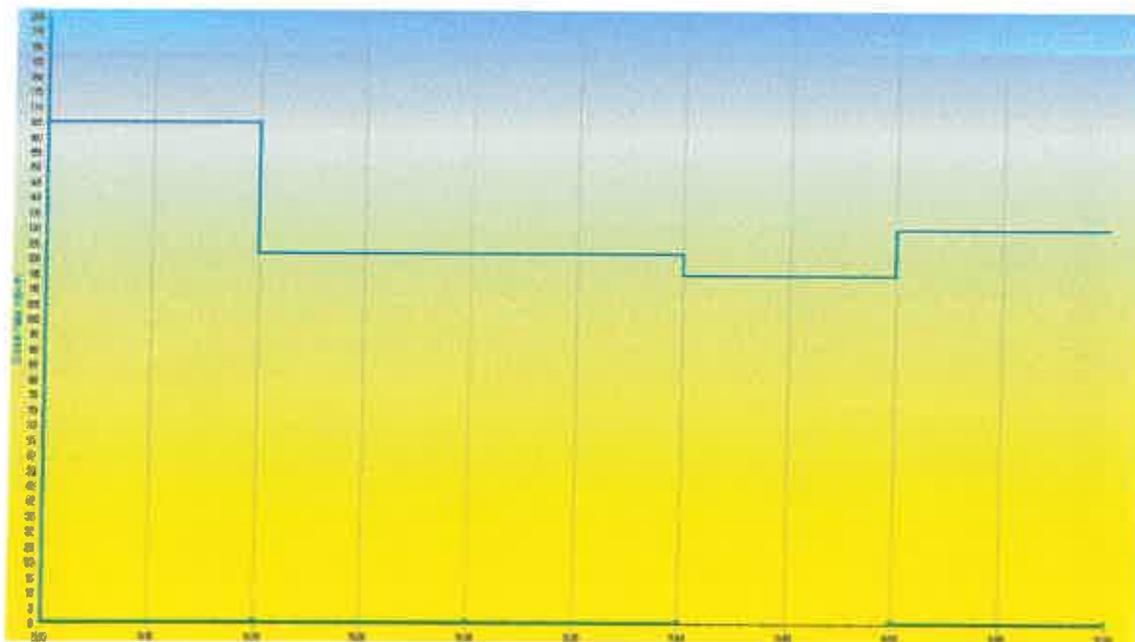
### 10.3.2. Јачине доза гама зрачења очитане Gamma TRACER-ом

Јачина доза гама зрачења мерена је истовремено када и концентрација активности радона у ваздуху и добијене вредности су систематизоване у табели 10.3.2.

Табела 10.3.2. Вредности јачине доза гама зрачења у ваздуху бањских центара овог реона

| Јачина дозе гама зрачења у ваздуху (nSv/h) |                             |               |         |          |
|--|-----------------------------|---------------|---------|----------|
| Бр.  | Локација                    | Сред.вредност | Минимум | Максимум |
| 1  | Буковичка Бања-парк         | 131           | 115     | 165      |
| 2  | Бања Горња Трепча-хидроблок | 130           | 100     | 185      |
| 3  | Богутовачка Бања-базен      | 135           | 93      | 190      |
| 4  | Новопазарска Бања-базен     | 133           | 132     | 135      |
| 5  | Маратушка Бања-хидроблок    | 140           | 110     | 180      |
| 6  | Луковска Бања-гејзер        | 95            | 85      | 110      |
| 7  | Јошаничка Бања-чесма        | 64            | 45      | 80       |
| 8  | Врњачка Бања-Римски извор   | 48            | --      | --       |
| 9  | Куршумлијска Бања-бушотина  | 22            | --      | --       |
| 10   | Бања Бањска-чесма           | 90            | --      | --       |
| 11   | Клокот Бања-извор           | 85            | --      | --       |

Вредности јачине доза гама зрачења у парку Буковичке Бање, мерене крај чесме се крећу у интервалу од минималних  $115\text{nSv/h}$  до максималних  $165\text{nSv/h}$ . Интервал очитаних вредности дат је на слици 10.3.2.1. Са слике се може уочити да распон вредности није велик.

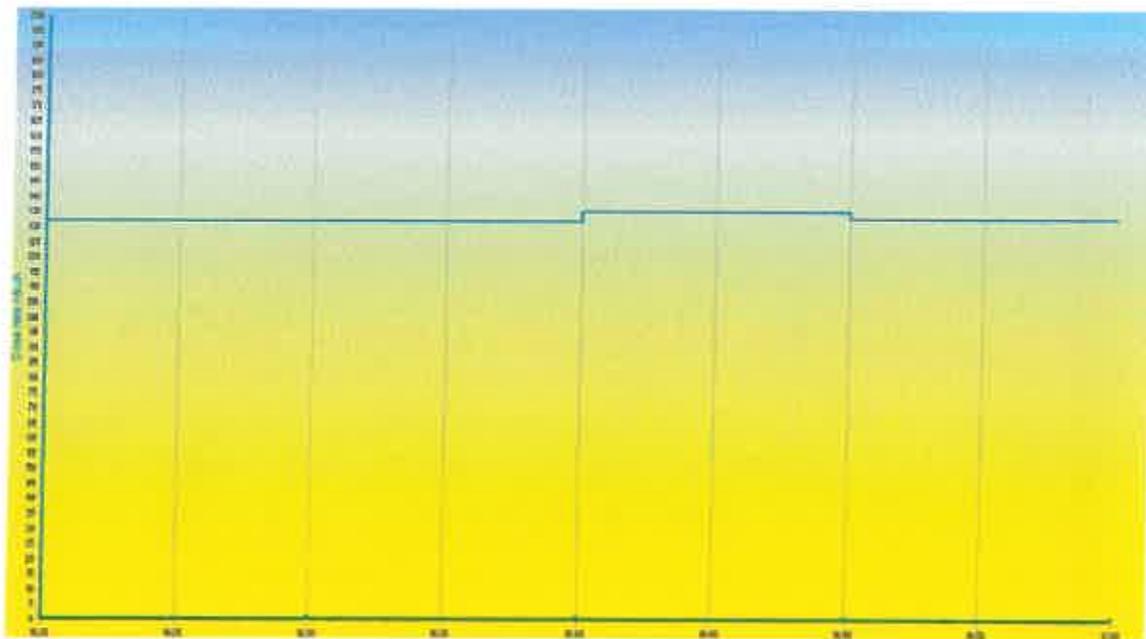


Слика 10.3.2.1. Јачина дозе гама зрачења у парку Буковичке Бање ( $\text{nSv/h}$ )

Мерења јачине дозе гама зрачења у купатилу ходроблока Бање Горња Треча су започета пре пуштања воде у каде, са почетном вредношћу од  $100\text{nSv/h}$ . Отицањем воде повећава је концентрација радионуклида у ваздуху који екхалирају из ње, тако да јачина дозе гама зрачења достиже свој максимум од  $185\text{nSv/h}$ .

Богутовачку Бању карактерише јачина дозе гама зрачења у интервалу од  $93\text{nSv/h}$  до  $190\text{nSv/h}$ , табела 10.3.2. Бању карактерише нешто виша доза гама зрачења у односу на друге бање овог реона, али је и њена вредност у границама нормалних вредности.

**Новопазарска Бања** је бања са уједначеном вредношћу јачине гама дозе зрачења, у распону од  $132\text{nSv/h}$  до  $133\text{nSv/h}$ , слика 10.3.2.2.

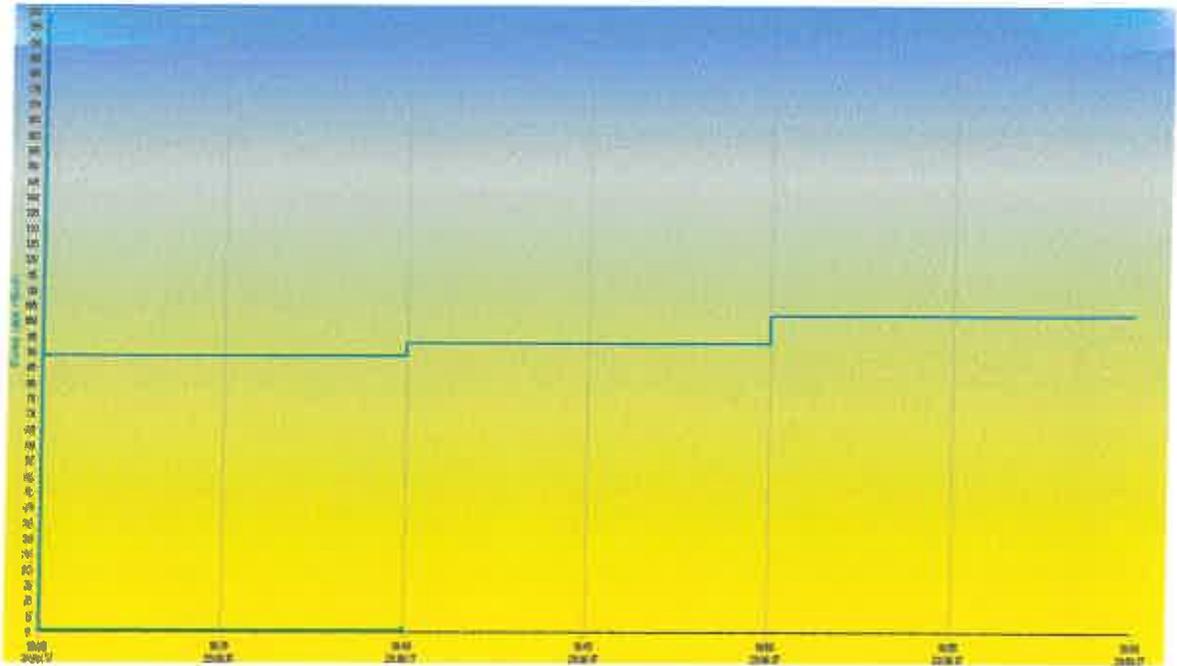


Слика 10.3.2.2. Јачина дозе гама зрачења на базену Новопазарске Бање ( $\text{nSv/h}$ )

Део у коме се налази базен се слабо проветрава и тако да константна испаравања из воде условљавају засићеност ваздуха радионуклидима.

Јачина гама дозе зрачења мерена у **Матарушкој Бањи** је у распону вредности од  $110$  до  $180\text{nSv/h}$ , табела 10.3.2. По јачини дозе гама зрачења припада групи бања са израженијом дозом зрачења.

Вредности јачине гама дозе зрачења измерене у центру **Луковске Бање** мало осцилују око средње вредности од  $95\text{nSv/h}$ , што показује слика 10.3.2.3.



Слика 10.3.2.3. Јачина дозе гама зрачења код гејзера у Луковској Бањи (nSv/h)

У Јошаничкој Бањи измерена јачина гама дозе зрачења је у интервалу вредности од 45 до 80nSv/h, што је дато у табели 10.3.2.

Вредност јачине гама дозе зрачења измерена у Врњачкој Бањи, код Римског извора у самом центру је ниска и износи 48nSv/h.

У Куршумлијској Бањи веома малу вредност концентрације радона, од 15Bq/m<sup>3</sup> – табела 10.3.1., прати вредност јачине гама дозе зрачења од свега 22nSv/h., табела 10.3.2.

Бања Бањска се карактерише вредношћу јачине гама дозе зрачења од 90nSv/h, а Клокот Бања средњом вредношћу од 85nSv/h., табела 10.3.2. Бање спадају у ред бања са ниском јачином гама дозе зрачења.

#### 10.4. Статистичка анализа експерименталних резултата

Основни параметри који се из израчунатих концентрација активности радона добијају су: максимална и минимална вредност, као и средња аритметичка средина. Даљом статистичком анализом дефинисани су и параметри лог нормалне расподеле: геометријска средина, стандардна девијација и геометријска стандардна девијација, као и поклапање са постојећом лог нормалном расподелом. Истраживањем је обухваћено 18 бањских центара у Србији. Бање су подељене у три реона, према геолошкој структури тла на коме се налазе. Основни статистички параметри који карактеришу добијене вредности сумирани су у табелама: 10.4.1.-реон Карпато-балканоида, 10.4.2.-реон Српског Кристаластог језера и 10.4.3.-Шумадијско-копаоничко-косовски реон.

Табела 10.4.1. Основне статистичке вредности концентрације присутног радона у води и ваздуху у бањама реона Карпато-балканоида

| Карактеристичне вредности        | $C_{uv}$ | $C_{corr} (x10^3)$ | $C_v$ |
|----------------------------------|----------|--------------------|-------|
| Број мерења                      | 4        | 4                  | 7     |
| Аритметичка средина ( $Bq/m^3$ ) | 4498     | 68,3               | 385   |
| Максимум ( $Bq/m^3$ )            | 9769     | 149                | 1446  |
| Минимум ( $Bq/m^3$ )             | 817      | 13                 | 21    |

Табела 10.4.2. Основне статистичке вредности концентрације присутног радона у води и ваздуху у бањама реона Српског Кристаластог језера

| Карактеристичне вредности        | $C_{uv}$ | $C_{corr} (x10^3)$ | $C_v$ |
|----------------------------------|----------|--------------------|-------|
| Број мерења                      | 4        | 4                  | 5     |
| Аритметичка средина ( $Bq/m^3$ ) | 652      | 14,5               | 59    |
| Максимум ( $Bq/m^3$ )            | 1343     | 21                 | 88    |
| Минимум ( $Bq/m^3$ )             | 312      | 7                  | 25    |

Табела 10.4.3. Основне статистичке вредности концентрације присутног радона у води и ваздуху у бањама Шумадијско-копаоничко-косовски реона

| Карактеристичне вредности        | $C_{uv}$ | $C_{сopг} (x10^3)$ | $C_v$ |
|----------------------------------|----------|--------------------|-------|
| Број мерења                      | 11       | 11                 | 11    |
| Аритметичка средина ( $Bq/m^3$ ) | 670      | 10,5               | 51    |
| Максимум ( $Bq/m^3$ )            | 1023     | 16                 | 107   |
| Минимум ( $Bq/m^3$ )             | 308      | 5                  | 15    |

С'обзиром да су испитивања вршена на малом броју локација, статички обрађени параметри који дефинишу лог нормалну расподелу за сва три реона сумирани су у табели 10.4.4. Минерална вода у којој се читавала концентрација активности присутног радона узоркована је на 19 мерних места, на две локације у Нишкој Бањи. Концентрација активности радона у ваздуху праћена у Нишкој Бањи на 4 мерна места, у Соко Бањи на 2 локације и у Сијаринској Бањи на 2 локације, тако да је укупно на 23 локације праћена концентрација присутног радона у ваздуху.

10.4.4. Карактеристичне статистичке вредности концентрације присутног радона у води и ваздуху у бањама Србије

| Карактеристичне вредности             | $C_{uv}$ | $C_{сopг} (x10^3)$ | $C_v$ |
|---------------------------------------|----------|--------------------|-------|
| Број мерења                           | 19       | 19                 | 23    |
| Аритметичка средина ( $Bq/m^3$ )      | 1523     | 23,47              | 153,9 |
| Стандардна девијација ( $Bq/m^3$ )    | 2400     | 36,4               | 305   |
| Максимум ( $Bq/m^3$ )                 | 9769     | 149                | 1446  |
| Минимум ( $Bq/m^3$ )                  | 308      | 5                  | 15    |
| Медијана                              | 817      | 13                 | 65    |
| Поклапање са лог нормалном расподелом | 0,01     | 0,01               | 0,45  |
| Геометријска средина ( $Bq/m^3$ )     | 1087     | 17,46              | 85,06 |
| Геометријска стандарна девијација     | 2,876    | 2,767              | 3,514 |

Резултати добијени статистичком анализом показују да се концентрације активности радона у минералној води и ваздуху испитиваних бања налазе у оквиру

нормалних прописаних вредности, са изузетком Нишке Бање која се по концентрацији радона у води и ваздуху сврстава у групу бања радонских минералних вода:  $149 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$  и  $1446 \text{Bq/m}^3$ , респективно.

Такође су и за очитане вредности јачине гама дозе зрачења у овим бањским центрима израчунати основни статистички параметри и представљени у табелама: 10.4.5.-реон Карпато-балканоида, 10.4.6.-реон Српског Кристаластог језера и 10.4.7.-Шумадијско-копаоничко-косовски реон.

Табела 10.4.5. Основне статистичке вредности јачине гама дозе зрачења у испитиваним бањским центрима реона Карпато-балканоида

| Карактеристичне вредности   | Јачина дозе гама зрачења |
|-----------------------------|--------------------------|
| Број мерења                 | 14                       |
| Аритметичка средина (nSv/h) | 152                      |
| Максимум (nSv/h)            | 382                      |
| Минимум (nSv/h)             | 49                       |

Табела 10.4.6. Основне статистичке вредности јачине гама дозе зрачења у испитиваним бањским центрима реона Српског Кристаластог језера

| Карактеристичне вредности   | Јачина дозе гама зрачења |
|-----------------------------|--------------------------|
| Број мерења                 | 5                        |
| Аритметичка средина (nSv/h) | 118                      |
| Максимум (nSv/h)            | 198                      |
| Минимум (nSv/h)             | 12                       |

Табела 10.4.7. Основне статистичке вредности јачине гама дозе зрачења у испитиваним бањским центрима Шумадијско-копаоничко-косовски реона

| Карактеристичне вредности   | Јачина дозе гама зрачења |
|-----------------------------|--------------------------|
| Број мерења                 | 11                       |
| Аритметичка средина (nSv/h) | 98                       |
| Максимум (nSv/h)            | 190                      |
| Минимум (nSv/h)             | 22                       |

Табела 10.4.8. садржи основне статистичке параметре везане за јачину дозе гама зрачења у бањама Србије које су биле предмет истраживања. Јачина дозе гама зрачења праћена је на укупно 30 локација, од тога на 12 мерних места у Нишкој Бањи и два у Сијаринској Бањи.

Табела 10.4.8. Карактеристичне статистичке вредности јачине гама дозе зрачења у испитиваним бањским центрима Србије

| Карактеристичне вредности   | Јачина дозе гама зрачења |
|-----------------------------|--------------------------|
| Број мерења                 | 30                       |
| Аритметичка средина (nSv/h) | 126                      |
| Максимум (nSv/h)            | 382                      |
| Минимум (nSv/h)             | 12                       |

У границама нормалних вредности налазе се и јачине доза гама зрачења. Максимум од 382nSv/h, очитан је у Нишкој Бањи коју и карактерише појачано присуство радона. Изразито ниску дозу зрачења има Пролом Бања, свега 12nSv/h.

У оквиру ових истраживања праћена је и концентрација радона у ваздуху у затвореним просторијама, у породичним кућама у Нишкој и Соко Бањи, на укупно 11 места. Статистичка анализа експерименталних резултата излагања радону у породичним кућама представљена је у табели 10.4.9.

Табела 10.4.9. Карактеристичне статистичке вредности концентрације присутног радона у ваздуху у кућама

| Карактеристичне вредности                  |      |
|--|------|
| Број мерења                                | 11   |
| Аритметичка средина (Bq/m <sup>3</sup> )   | 60   |
| Стандардна девијација (Bq/m <sup>3</sup> ) | 19,1 |
| Максимум (Bq/m <sup>3</sup> )              | 89   |
| Минимум (Bq/m <sup>3</sup> )               | 37   |
| Поклалање са лог нормалном расподелом      | 0,99 |
| Геометријска средина (Bq/m <sup>3</sup> )  | 58   |
| Геометријска стандардна девијација         | 1,43 |



## **ЗАКЉУЧАК**

У тези су приказани резултати истраживања концентрације активности радона у води и ваздуху већине познатих бањских центара Србије. У одређеним случајевима проучавано је и присуство радона у породичним кућама у непосредној близини термалних извора (локалитет Нишке Бање, Соко Бање). Истраживања се концентришу на озрачивање организма радоном и његовим потомцима садржаним у минералним водама, са посебним акцентом на воде у базенима за купање, као и кадама и купатилима за инхалацију, где се највеће озрачивање јавља као последица удисања радона, који у великим концентрацијама може изазвати рак плућа. Радон, је 'аквафобик' - радије би био у ваздуху него у води, и тиме повећава своју концентрацију у њему. Зато и представља најважнији извор краткотрајног озрачивања организма током боравка у затвореним просторима. Међутим, радон унет ингестијом има погубнији утицај на организам од радона унетог инхалацијом. Инхалирани радон, делимично се избацује из организма издисајем, док радон унет ингестијом у потпуности остаје у организму и зрачи. Тако да, радон унесен у организам на овај начин има већи утицај него инхалирани ослобођени радон из исте воде. Доза озрачивања организма радионуклидима унетих водом за пиће зависи од њихове количине у води, метаболизма и кинетике у организму.

С друге стране, лечење радоном је једна од најстаријих терапија којом су се људи користили и којом се и данас користе, пошто природни лековити извори који садрже радиоактивни гас радон и краткоживеће и дугоживеће продукте распада, имају интензиван утицај на људске органе.

Мерења концентрације активности радона у води и ваздуху вршена су помоћу AlphaGUARD-а, чиме се на брз и поуздан начин мери концентрација радона и тако упознаје структура терена. Како се концентрација активности радона у води није

могла одредити на самом месту узорковања, израчунавала се корекција активности радона по формули (9.1.2.3.).

За упоредно праћење јачине гама дозе зрачења коришћен је Gamma TRACER. Уређај омогућује индиректно праћење концентрације радона мерењем  $\gamma$ -зрачења његових потомака.

За дуг временски период, како би се ближе упознало кретање и осцилације у концентрацији радона у ваздуху коришћени су чврсти CR-39 траг детектори.

Током истраживања брижљиво су праћени метеоролошки параметри на мерним локалитетима, јер су они битни фактори који су могли утицати на промену концентрације активности радона. Годишње ефективне дозе радона унетог ингестијом (E) и инхалацијом (EED) одеђене су по обрасцима датим у поглављу 1.

На подручју реона Карпато-балканоида, којег карактерише присуство метаморфних, магматских и седимантних наслага, максимално присуство радона у води уочено је у Нишкој Бањи. Концентрација активности радона у води на подручју Нишке Бање је у распону од  $97 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ , колико је регистровано у узоркованој води у непосредној близини каптаже, до  $149 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ , колика је концентрација радона у води са базена хотела. Тиме се минералне воде ове бање сврставају у ред радонских вода. А најнижа концентрација активности радона у води забележена је у минералној води Гамзиградске Бање, од  $13 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ . Одређена је и годишња ефективна доза коју становништво прими услед ингестије радона, у распону од  $3,9$  до  $45,7 \times 10^{-3} \text{ mSv/god}$ .

Добијени резултати показују да концентрација активности радона у ваздуху варира, у овом реону, од  $13$  до  $1446 \text{ Bq/m}^3$ , и њена вредност првенствено зависи од порекла воде и локације изворишта. Највећа концентрација радона измерена је управо на базену хотела 'Радон', и показано је да она директно зависи од ексхалације радона из термоминералних вода. Повишене вредности концентрације активности радона у ваздуху измерене су још и у Соко Бањи- $126 \text{ Bq/m}^3$  и Гамзиградској Бањи- $152 \text{ Bq/m}^3$ . Годишња еквивалентна доза (EED) удахнутог

радона, која прати присутан радон, је и овом реону имала интервал од 0,002-шеталиште у Соко Бањи, до 0,5 mSv/god. -базен хотела у Нишкој Бањи.

Веома детаљно испитивање подручја Нишке Бање указало је и на велики утицај ветра на концентрацију радона у ваздуху: при јако ветровитом времену у непосредној близини каптаже 'Мало грло' измерена је концентрација од свега 26Bq/m<sup>3</sup>. Ветар је својим струјањем изнад површине земље редуковао концентрацију радона у ваздуху.

Измерене вредности јачине доза гама зрачења налазе се у доброј корелацији са измереним нивоима присутног радона. Значајне дозе гама зрачења у ваздуху измерене су у Нишкој Бањи, коју карактерише изразита концентрација радона у ваздуху. То се потврдило на базену хотела 'Радон', као и у тунелу где је каптирана термоминерална вода. Измерене јачине дозе гама зрачења биле су у опсегу од 133-382nSv/h. При оптималном раду базена, када нема интензивног вентилирања, измерене су највеће дозе, док су са интензивном вентилацијом ти нивои опадали. Није тешко закључити да су нивои гама зрачења у корелацији са водом која се користи у базену. Повећане концентрације радона условљавају и појачано концентрисање његових краткоживећих потомака Bi-214 и Pb-214, чији гама зраци су далеко највећа компонента у урановом низу. Очито је да подземне минералне и термоминералне воде Нишке Бање на свом путу до површине наилазе на минералне честице које садрже радијум. Ту се пре свега мисли на допринос активности који долази од гаса радона <sup>222</sup>Rn, директног потомка радијума <sup>226</sup>Ra. Разлози су у растворљивости радона у води, затим њеном продирању у мале поре разних стена и земљишта, њиховом испирању и растварању и даљем транспорту из тла на површину земље.

У Газиградској и Соко Бањи вредности јачине гама дозе зрачења одговарају прописаним нормалним вредностима: 131 и 139nSv/h, респективно.

Континуирано праћење концентрације радона у току једне полу-сезоне обављено се у Нишкој и Соко Бањи. Чврсти траг детектори су постављени по породичним, приземним кућама у просторијама у којима се проводи већи део дана. Без обзира на

варијације које су се јављале на релацији зима-пролеће, топло-хладно у оба квартала концентрације су биле у нивоу дозвољених вредности,

Реон Српског кристаластог језера карактерише слаба присутност радона како у води тако и у ваздуху. У води највишу концентрацију има Рибарска Бања од  $21 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , а најнижа вредност очитана је у Пролом Бањи свега  $7 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . У Сијаринској Бањи измерена је највиша концентрација радона у ваздуху у инхалаторијуму-  $88 \text{Bq/m}^3$ , најнижа вредност у Пролом Бањи-  $25 \text{Bq/m}^3$ . Одређене годишње ефективне дозе ингестијом унетог радона иду од минималних 2,1 до максималних  $6,5 \times 10^{-3} \text{mSv/god.}$ , а удахнутог радона су ниске и у распону од  $0,02 \text{mSv/god.}$ , у Пролом Бањи до  $0,06 \text{mSv/god}$  у Сијаринској Бањи.

Измерене вредности јачине гама дозе зрачења налазе се у оквиру прописаних нормалних вредности: највећа доза гама зрачења измерена је на подручју Врањске Бање- $198 \text{nSv/h}$ , а најнижа у Пролом Бањи- $12 \text{nSv/h}$ .

Најмања концентрација радона у води у бањама Шумадијско-копаоничког реона измерена је у Врњачкој Бањи-  $5 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ , а највећу концентрацију активности радона поседује минерална вода Бање Горња Трепча-  $16 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ . Онако ниске вредности концентрације радона у води прате и мале ефективне дозе радона на годишњем нивоу унетог ингестијом: 1,5 и  $4,9 \times 10^{-3} \text{mSv/god}$ , респективно. У овим бањским центрима радон је присутан у мањим концентрацијама и у ваздуху. Најнижу концентрацију радона мерни систем је очитао у ваздуху у Куршумлијској Бањи, свега  $15 \text{Bq/m}^3$ , највећа концентрација радона присутна је у хидроблоку Матарушке Бање  $107 \text{Bq/m}^3$ . Уопште, бање овог реона карактеришу ниске концентрације радона и у ваздуху, па су зато и годишње еквивалентне ефективне дозе удахнутог радона ниске, од 0,002 до  $0,06 \text{mSv/god}$ . Мала заступљеност радона у ваздуху последица геолошке структуре терена, али и повећане концентрације сулфата и других сумпорних једињења, као и карбоната који дају тешко растворљиве соли радијума.

У свим бањским центрима овог реона јачина дозе гама зрачења била је у граници прописаних, дозвољених вредности. То се и могло очекивати с'обзиром на мале

концентрације радона у води и ваздуху. Најнижа вредност је очитана у Куршумлијској Бањи, свега 22 nSv/h, а највиша у Богутовачкој Бањи 190 nSv/h.

Ова испитивања и истраживања утицаја радона су од значаја како за посетиоце и пацијенте бањских центара, тако и за стручно особље постојећих бањских центара. Истраживања активности радона су неопходна за примену одређених мера у случајевима њиховог појачаног присуства.

Уколико концентрације радона нису алармантне, као што је то у познатим бањским центрима у Србији, радон присутан у ваздуху купатила хидроблока или на базенима се може смањити редовним проветравањем просторија, а ризик од повећане инхалације строго контролисаним боравком у њима. Правилном и интензивном аерацијом базена и када напуњених минералним радонским водама могуће је умањити његово присуство, а и умањити ризик и спречити појаве обољења условњена инхалацијом и ингестијом повећане количине радона.

## **ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA**

*/1/CETI (JU Centar za ekotoksikološka ispitivanja), Izveštaj o ispitivanju sadržaja radionukleida u životnoj sredini Crne Gore-2005, Podgorica, 2006*

*/2/Janković-Mandić Lj., Dragović S., Radijacioni rizik usled terestričkog izlaganja za stanovništvo gradova Srbije, XXV Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 63-67, 2009*

*/3/UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, Report to General Assembly, Vol. II, pp 2-9, 2000*

*/4/Župunski Lj., Trobok M., Gordanić V., Jokić-Spasić V., Sovilj P., Uticaj izlaganja populacije prirodnom radionukleidu radijumu na povećanje rizika za razvijanje tumora unošenjem roditeljskog nukleida uranijuma putem inhalacije ili ingestije, XXV Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 43-45, 2009*

*/5/Draganić I., Kroz svet radijacija i radioaktivnosti, Geoinstitut i Zavod za izdavanje udžbenika, Beograd, 1996*

*/6/Kathren R.L., Radioactivity in the environment: sources, distribution and surveillance, Amsterdam, Harwood Academic Publishers, 1984*

*/7/Torbica N., Vuletić V., Dugoročne posledice radioaktivne kontaminacije u životnoj sredini, XXV Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 43-38,2009*

- /8/Vučina J., Orlić M., Vranješ S., Radionukleidi I jonizujuća zračenja, Acta Clinica, 5(1), str 9-22
- /9/Milić G., Distribucija radona u vazduhu zatvorenog prostora u nekim regionima Kosova i Metohije, doktorska disertacija, Kosovska Mitrovica, 2003
- /10/Dorschel B., Volkmar Schuricht V., Steuer J., The physics of radiation protection 1996 Asford, England
- /11/Stolz W. and Bernhard, Dosimetry in ionizing radiation, Berlin, Germany, 1981
- /12/Kimel and Maschovich, Protection against ionizing radiation, Moscow, 1972
- /13/ Dosimetry for Radiation Accidents, Kraitov Moscow, 1979
- /14/Nikezić D., Merenje faktora ravnoteže kratkoživećih radonovih potomaka trag detektorima, XXV Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 9-19, 2009
- /15/Eisenbud M., Environmental Radioactivity, Accademic Press, San Diego, 1987
- /16/Radon: An Overview of Helth Effects, Enciclopedia of Environmental Helth, pp 745-753, 2011
- /17/Committe on Risk Assesement of Exposure to Radon in Drinking Water, Risk assesement of radon in drinking water, National Academy Press, Washington D.C., 1999
- /18/Tayyeb Z.A., Kinsena A.S., Farid S.M., A study on the radon concentrations in the water in Jedahh (Saudi Arabia) and the associated helth effects, Journal of Environmen. Rad., Vol 38 (1), pp 97-104, 1998
- /19/Nikolov J., Todorović N., Forkapić S., Bikit I., Mrđa D., Krmar M., Vesković M., Merenje radona u pijaćim vodama, XXVI Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Tara 2011, str 145-149, 2011
- /20/Somlai K., Tokonami S., Ishikawa T., Vancsura P., Gaspar M., Jobbagy V., Somlai J., Kovacs T., <sup>222</sup>Rn concentracions of water in the Balaton Highland and in the southern

- part of Hungary, and the assessment of the dose, *Radiation Measurements*, 42, pp491-495, 2007
- /21/Kendall G.M. and Smith T.J., Doses to organs and tissues from radon and its decay products, *J.Radiol.Prot.*, 22, pp 389-406, 2002
- /22/Vinson S.D., Campbell R.T., Vengosh A., Radon transfer from groundwater used showers to indoor air, *Appl. Geochemistry*, Vol 23 (9), pp 2676-2685, 2008
- /23/ ICRP, Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters, *ICRP Publication 50, Annals of the ISRP* 17(1), 1987
- /24/Rajković M., Stojanović M., Lačnjevac Č., Tošković D., Stanojević D., Određivanje tragova radioaktivnih supstanci u vodi za piće, *Zaštita materijala*, 49(4), str 44-54, 2008
- /25/WHO Regional Office for Europe, Radon, Chapter 8.3, Copenhagen, Denmark, 2001
- /26/Urošević V., Nikezić D., Vulović S., Simulacija raspodele koncentracije torona i radona unutar zatvorene prostorije, , XXV Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 87-90, 2009
- /27/Zielinski J., Carr Z., Krewski D., Repacholi M., World Health Organizations International Radon Project, *J.Toxicol. Environ. Health A.*, 69(7), pp 759-769, 2006
- /28/Ministarstvo za zaštitu prirodnih bogatstava i životne sredine, Republika Srbija, Radioaktivnost životne sredine u Republici Srbiji u 2002. godini, Beograd, 2002
- /29/Todorović N., Forkapić S., Papuga J., Bikit I., Slivka J., Analiza uticaja faktora na koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama, XXV Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 85-87, 2009
- /30/Dedić A., mag.rad., Radon u vodi, JU Univerzitet u Tuzli, Prirodno-matematički fakultet, Tuzla, 2005
- /31/ Komatina M., Medicinska geologija, Tellur, Beograd, 2001
- /32/Klimo A., Mineralne vode banjskih lečilišta Panonskog basena Srbije, *Srb.Arh.Celok.*, Vol 139(3-4), str 203-208, 2011



- /33/ www.panakomp-Banje Srbije.com**
- /34/Cook G.A., Argon, helium and rare gases, Interscience, NY, 1961**
- /35/Eisenbud M., Environmental Radiactivity, Third edition, Academic Press, San Diego, 1987**
- /36/ICRP- International Commission on Radiological Protection, Protection against Rn-222 at home and at work, Publication 65, Pergamon Press, New York, 1994**
- /37/Arcimovič L.A., Spravočnik po jadernojoj fizike, Moskva, 1963**
- /38/Gernich V., Long-term observation of the natural gamma background radiation, IRPA 1996, International Congress on Radiation Protection, Viena, 1996**
- /39/Adrović F. et al, Investigation of contents of natural radiation radionuclides in coal and ashes from Kosovian power plants, IRPA 9, International Congress on Radiation Protection, Vol 2, pp 681-684, Viena, 1996**
- /40/Adrović F., Ninković M., The Measuring of the Gamma Dose Rate in the Air at Location of the Šar-mountain, International Conference on Hazardous Waste.Sources, Effects and Management, 12-16, Cairo, Egypt, 1998**
- /41/Durrani S.A. and Ilić R., Radon Measurements by Etched Track Detectors, Applications in Radon Protection, Earth Science and the Environment, World Scientific Publishing, Singapore, 1997**
- /42/Radolić V., Mjerenje radona i radonovih potomaka u zraku pri različitim koncentracijama aerosola, magistarski rad,PMF Zagreb, 2000**
- /43/Fleischer R.L., Radon:Overview of properties, origin and transport, Part 1, Chapter1 in „Radon measurements by etched track detectors“, Durrani S.A. and Ilić R., World Scientific, Singapore, 1997**

- /44/Fleischer R.L., Alpha recoil damage: relation to isotpic disequilibrium and leaching of radionuclides, *Geochim.Cosmochim.Acta*, 52, pp 1459-1466, 1988
- /45/Fleischer R.L., Naeser C.W., Price P.B., Walker R.M., Marvin U.B., Fossil particle tracks and uranium distributions in minerals of Vaca Muerta meteorite, *Science* 148, pp 629-632, 1965
- /46/Percov L.A., Prirodni radioaktivnost biosferi, Atoizdat, Moskva, 1964
- /47/Dongarra G., Martinelli G., Migration precesses of radon towards the earth surface: implication for the prediction of seismic and volcanic events, *Sci.Meeting on Seismic Protection, Venice*, pp 141-147, 1993
- /48/Fleischer R.L., Isotopic disequilibrium of uranium: Alpha-recoil damage and preferential solution effects, *Science* 207, pp 979-981, 1980
- /49/Kigoshi K., Alpha-recoil  $^{234}\text{Th}$ . Dissolution into water and the  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  disequalibrium in nature, *Science* 173, pp 47-48, 1971
- /50/Tanner A.B., Radon migration in the ground: A supplementary review, In the *Natural Radiation Enviornment III*, National Technical Information service, Springfield, VA.CONF-780422, pp 5-56, 1980
- /51/Fleischer R.L., Alpha-recoil damage and solution effects in minerals: Isotopic disequilibrium and radon release, *Geochim.Cosmochim.Acta* 46, pp 2191-2201, 1982
- /52/Andersson P., Clavensjo B., Akerblom G., The effect of ground on the concentracion of radon and gamma radiation indoors, *Swedish Council for Building researech, Report R9: 1983*, pp 1-442, Swedish, 1983
- /53/Robe M.C., Labeled V., Explaning the variation in soil radon concentracions: a study of the influence of some intrinsic properties of a rock matrix on the radon emission factor, *Gas Chemistry, Science Reviews*, pp 535-542, 1995

- /54/Hildingson O., Radon emitted from gravel and aggregate; Testing method and consistencies for indoor environment, Swedish National Testing Institute, Tehnical Report 1983:28, pp 1-45, 1983
- /55/Markkanen M., Arvela H., Radon emanation from soils, Radiat.Port.Dosim., 45, 1-4, pp 262-272, 1992
- /56/Tanner A.B., Error in measuring radon in soil gas by means of passive detectors, Nucl.Geophys., 5, 1-2, pp 25-30, 1991
- /57/Allen J.W., Development of a portable radon detection system, Bendix fieldengineering corp., Grand Junction, Colorado, GBJX-50 (76), 1976
- /58/Committe on Risk Assesement of Exposure to Radon in Drinking Water, Risk assesement of radon in drinking water, National Academy Press, Washington D.C., 1999
- /59/Silker W.B., Kalkwarf D.R., Radon diffusion in candidate soils for covering uranium mill talings, Us.Nucl.Reg.Commission report NUREG/CR-2924, PNL-4434, pp 49, 1983
- /60/Fleischer R.L., Hart H.R. Jr., Morgo Campero A., Radon emanation over an ore body: Search for long distance transport of radon, Nucl.Instr.Mrth., 173, pp 169-181, 1980
- /61/Thomas D.M., Koyanagi R.Y., The association between ground gas radon concentrations and seismic nad volcanic activity at Kilauea volcano, Eos trans.Am.Geophys.Un.67, pp 905, 1986
- /62/Chandhuri H., Das K.N., Bhandri K.R., Sen P., Sinha B., Radon activity measurements around Bakerswar thermal spring, Rad. Measur., 45, pp 143-145, 2010
- /63/Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I., Estimation of the size of earthquake preparation zones, Pure Appl.Geophys., 117, pp 1025-1044, 1979

- /64/Fleischer R.L., Dislocation model for radon response to distant earthquakes, *Geophys.Res.Lett.*, 8, pp 477-880, 1981
- /65/Andrew J.N., Wood D.F., Mechanism of radon release to rock matrices and entry into ground water, *Trans.Min.Metall.Sect. B* 81, pp 189-209, 1972
- /66/Soonwala N.M., Teleford W.M., Diffusion of  $^{222}\text{Rn}$  and interpretation of techniques, 75th Meeting Soc. Exploration Geophysicists, Denver, Colorado, 1975
- /67/Hunyadi I., Csige I., Haki J., Hertelendi E., Vasarhelyi A., Radon enriched deep earth-gas upflow in a seismically active inhabited area, *Proc. 3rd International Colloquium on Rare Gas Geochemistry*, Amritsar, 1995
- /68/Piller G., Surbek H., Radon in crust., In the Radiology of Natural and Artificial Radionuclides, Frackverband for Strahlenschutz, V. Publication series: Progress in Radiation Protection, FS-89-48-T
- /69/O'Connor P.J., Gallangeher V., Madden J.S., et al, Assessment of the geological factors influencing the occurrence of radon hazard areas in a carstic region, *Geological Survey of Ireland, Report Series RS93/2*, 1993
- /70/Forkapić S., Bikit I., Mrđa D., Todorović N., Krmar M., Slivka J., Vesković M., Istraživanje sadržaja radionukleida u zemljištu i sadržaja  $^{210}\text{Pb}$  u lišću novosadskih parkova, XXV Sinpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 53-58
- /71/Minell H., Natural radioactivity from different ground types, In *Quaternary Economic Geology in Nordic Countries* (eds. L.K. Kauranne and L.K. Konigsson), Uppsala, Vol. 29, pp 73-78, 1990
- /72/Bigu J. et al, Study of radon gas concentration, surface radon flux and other radiation variables from uranium mine tailings areas, *Uranium 1*, pp 257-277, 1984

- /73/Monnin M., Seidel J.L., Radon in soil, air and ground waters related to major geophysical events: recent advances, Nucl.Instr.Meth., A314, pp 316-330, 1991**
- /74/Thinova L., Berka Z. et al, The hightened activity of radon in water analysis from Lounovice area, Czech republic, 2004**
- /75/Malmquist L. et al., Radon measurements with alpha track film. A new technique for geological surveys, exploatacion and for mapping of radiation, The Swedish Broad for Technical Development, STU Report 77-3590, 1980**
- /76/Hesselbom A., Radon in soil gas-A study of methods and instruments for determining radon concentrations in the ground, Geological Survey of Sweden, Serie C, 803, pp 1-58, 1985**
- /77/Rose A.W., Hutter A.R., Washington J.W., Sampling variability of radon in soil gases, J.Geochem.Explorat., 38, pp 173-191, 1990**
- /78/Landstrom O., Tullbprg E.L., The influence of fracture mineral/groundwater interaction on the mobility of U, Th, REE and other trace elements, Swedish Nuclear Fuel and Waste Managment Company, Technical report 90-37, pp 1-71, 1990**
- /79/Hess C.T. et al., Radon-222 in portable water supplies in Maine, Maine 04469**
- /80/Nazaroff W.W., Doyle S.M., Nero A.V., Sxto R.G., Portable water as a source of airborne <sup>222</sup>Rn in U.S. dwellings, A review and assessment, Health Phys., 52-3, pp 281-295, 1987**
- /81/Asikainen M., Kahlos H., Natural radioactivity of drinking water in Finland, Health Phys., 39, pp 77-83, 1980**
- /82/Akerblom G., Petterson B., Rosen B., Handbook on investigation of the radon situation in areas before building, The Swedish Council for Building Research and the Swedish National Board for Physical Planning and Bulding Report R88: pp 1-160, 1990**

- /83/Službeni list SRJ: Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće, broj 42, s.4, 1998
- /84/World Health Organization (WHO): Guidelines for drinking water quality, Second ed., Vol 1, Recommendations, 1993
- /85/Kulich J., More H., Swedemark G.A., Radon and radium in household water, Swedish Radiation Protection Institute, SSI-Report 88-11, 1988
- /86/Jonsson G., Persson M., Wikman H., Tell, Investigation of soil radon in the community of Osby, Lund Institute of technology, Report LUTFD2/(TFKF-3065)/1991, Swedish, 1991
- /87/Louizi A., Nikolopoulos D., Tzortzi A., Vogiannis E., Koukouliou V., Thanassas D., Serefoglou A., Georgiou E., Radon concentration measurements in waters in Greece and Cyprus, Athens, 2003
- /88/U.S.Environmental Protection Agency (EPA): National primary drinking water regulations; radionuclides, proposed rule 40 CFR parts 141 and 142, Federal Register, 56, No 138: 33050-33217, 1991
- /89/ 90/143/EURATOM: Commission Recommendation od 21 february 1991 on the Protection of the public against indoor exposure to radon L 080, 27/3/1990, 0026-0028, 1991
- /90/U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Final Draft for the drinking water criteria document on radon, Report No TR-1242-86 U.S.EPA., Washington D.C., 1991
- /91/Mjones L., Soderman A.L., Measurement protocol for radon measurements in workplaces above ground, Swedish radiation protection authority, Department of emergency preparednes and envoronmental assesement, Stockholm, Swedish, 2004
- /92/Jacobi W., Activity and potential  $\alpha$ -energy of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{222}\text{Rn}$  daughters in different aie atmosphere, Health Phys., 22, pp 441-450, 1972

- /93/Porstendorfer J., Behavior of radon daughters products in indoor air, *Radiat.Prot.Dosim.*, 7, 1-4, pp 107-113, 1984
- /94/Popović D., Todorović D., Radon indoor concentration and activity of radionucleides in building materials in Serbia, *Facta Universitatis*, Vol.4, No 1, pp 11-20, 2006
- /95/Jonson G., Solid state nuclear track detectors in radon measurements indoors and in the soil, *Nucl.Tracks Radiat.Meas.*, 19, 335-338, 1991
- /96/Jonson G., Indoor  $^{222}\text{Rn}$  measurements in Sweden with the solid-state nuclear track detector technique, *Health Phys.*, 54, pp 271-281, 1988
- /97/Alexander B., Rodman V., White S.B., Phillips J., Areas in United States with elevated screening of  $^{222}\text{Rn}$ , *Health Phys.*, 66, pp 50-54, 1994
- /98/Kearafott K.J., Preliminary experiences with  $^{222}\text{Rn}$  gas in Arizona homes, *Health Phys.*, 56, pp 169-179, 1989
- /99/Becker K., Environmental and radon dosimetry: national and international standards, In *Proc.Conf. on high level of natural radiation, Ramsar, IAEA, Vienna*, pp 281-291, 1993
- /100/Gunby J.A., Darby S.C., Miles J.C.H., Green B.M.R., Cox D.R., Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom, *Health Phys.*, 64, pp 2-12, 1993
- /101/Nero A.V., Leiden S.M., Nolan D.A., Price P.N., Rein K.L., Revzan H.R., Wollenberg H.R., Gadgil A.J., Statistically based methodologies for mapping of radon actual concentrations: the case Minnesota, *Radiat.Prot.Dosim.*, 56, pp 215-219, 1994
- /102/Miles J.C.H., Ball T.K., Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level, *Radiat.Prot.Dosim.*, 56, pp 207-210, 1994
- /103/Reiners C., Steffer C., Messersmith O., *Strahlenrisiko durch radon*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Germany, 1992

/104/Friedmann H., What did we learn from the Austrian radon project?, University of Vienna, Institute for isotope research and nuclear physics, 2002

/105/Hulka J., Thomas J., Fojtikova I., Vlaček J., Moučka L., Fronka A., Jilek K., Heribanova A., Slovak J., Barnet I., Burian I., Jiranek M., Česhak T., Radon programme in Czech Republic-results, experience and future, SURO (National Radiation Protection Institute), Praha, Czech Republic, 2004

/106/Mjones L., Soderman A.L., Measurement protocol for radon measurements in workplaces above ground, Swedish radiation protection authority, Department of emergency preparedness and environmental assessment, Stockholm, Swedish, 2004

/107/Bogucarska T., Lapenas A., <sup>222</sup>Rn gas metrology in Latvia, Radiation metrology and testing center of the Latvian national metrology center, Salaspils, Latvia, LV-2169, 2002

/108/Yonehara H., Tokomani S., Zhuo W., Fukutsu K., Ishikawa T., Yamada Y., Thoron and its decay products in living environments of Japan, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan, 2004

/109/Vučić D., Radioaktivne karakteristike uvoznih granita i mermera, XXV Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 83-86, 2009

/110/Kitto E.M., Bari A., Haines K.D., Menia A.M., Fielman M.E., Laboratory intercomparison of radon-in-water standard, International Radon Symposium, St.Louis, MO, 2009

/111/Jakupi B., Krstić G., Tonić M., Ilić R., Radon measurements in mines and dwellings in Kosovo and Metohia, Radiat.Meas., 28, pp 1-6, 1997

/112/Jonson G., About Radon-where, when and how?, Studentlitteratur Publ.Comp., Lund, Swedish, pp 1-112, 1992



- /113/Čechak T., Fronka A., Moučka L., Indoor radon concentration and outdoor/indoor pressure difference correlation, Czech technical University in Prague, Faculty of nuclear sciences and physical engineering, Czech Republic, 2003
- /114/ Janjić M., Komatina M., Nikić Z., Timotić B., Nešić D., Knežević T., Stanojević S., Anđelski H., Bogunović N., Kerkez Ž., Lekovite vode i banje Srbije, Elit-Medica, Beograd, 2008
- /115/Dimić-Borović J., Voda u tradiciji i životu Vrnjačke banje, Beograd, 2002
- /116/Komatina M., Hidrogeološka istraživanja (primenjena hidrogeologija) DP Kartonka 'Avala', Beograd, 1990
- /117/Filipović B., Dimitrijević N., Mineralne vode, Institut za HG RGF, Beograd, 1991
- /118/Stevanović P., Vrnjačka Banja - geološki sastav terena, poreklo, pojavljivanje i sastav mineralnih voda, Beograd, 1939
- /119/Filipović B., Mineralne, termalne i termomineralne vode Srbije, Udruženje banjskih i klimatskih mesta Srbije, Vrnjačka Banja i Institut za hidrogeologiju Rudarsko-geološkog fakulteta, Beograd, 2003
- /120/Kostić M., Vrnjačke mineralne vode, Vrnjačka Banja, 1966
- /121/Radovanović R., Vukotić M., Mijatović Lj., Klasifikacija mineralnih voda u odnosu na sadržaj prirodnih radionukleida, XI Jugoslovenski simpozijum o zaštiti od zračenja, Portorož, 1981
- /122/Ivanov V.V., Genetskaja klasifikacija mineralizovanih vod zemnoj kori; Voprosi hidrogeologii mineral.vod; Tom XXXIV, Izd.Nauč.-Isled.Inst. Kurotrologii i fizikoterapii, Moskva, 1977
- /123/Horvath A., Bohus L.O., Urbani F., Marx G., Piroth A., Greaves E.D., Radon concentration in hot spring waters in northern Venezuela, Journal of Environ.Radioact., 47, pp 127-133, 2000

- /124/Vaupotič J., Indoor radon in Slovenia, Nuclear Techn. and Radiat.Prot., 18(2), pp 36-43, 2003
- /125/Radolić V., Vuković B., Šmit G., Stanić D., Planinić J., Radon in Croatian spas, Journal of Environ.radioact., 83(2), pp 198-198, 2005
- /126/Vaupotič J., Kobal I., Radon exposure in Slovenian spa, Radiat.Protect.Dsim., 97(3), pp 265-270, 2001
- /127/Szerbin P., Natural radioactivity of certian spas and caves in Hungary, Environ.Internat., 22(1), pp 389-398, 1996
- /128/IAEA, International Atomic Energy Agency, Raiation protection against radon in workplaces other than mines, Safety reports series No.33, Vienna, Austria, 2003
- /129/Aemon R., Radon and hydrotherapy: Application to French spas, Institute for Radilogical Protection and Nuclear Safety (IRSN), Fontenay-aux-Roses France, 2004
- /130/Soto J., Fernandez P.L., Quindos L.S., Gomez-Arozamena J., Radioactivity in Spanish spa, The Science of total environment, 162, pp 187-192, 1995
- /131/Nikolopoulos D., Louizi A., Vogianis E., Halvadikis C., Serefoglou A., Georgiu E., Radon exposure during tretment in some thermal spa centers in Greece, Medical Physics Department, Athens University, Athens, Greece, 2004
- /132/Ministarstvo za zaštitu prirodnih bogatstava i životne sredina Republike Srbije, Beograd, 2003
- /133/Milivojević M., Ocena geotermalnih resursa teritorije SR Srbije, van SAP-a, dok.disertacija, RTF, Beograd
- /134/Manić G., Petrović S., Manić V., Popović D., Todorović D., Radon concentracions in Spa in Serbia, Environ. Int., 32,4, pp 533-537, 2006

- /135/Vučić V., Radioaktivnost voda i gasova Niške Banje i njihovo aktiviranje, Srpska Akademija nauka, Beograd, 1950
- /136/Stefanović S., Niška Banja, Štamparija D.Gregorića, Beograd, 1941
- /137/Žunić Z., Yarmoshenko V., Birovljev A., Bochicchio F., Quarto M., Obryk B., Paszkowski M., Čeloković J., Demajo A., Ujić P., Budzanowski M., Olko P., McLaghlin P., Waligorski R., Radon survey in the high natural radiation region of Niska Banja, Serbia, J. Environ. Radioact., 92,3, pp 165-174, 2007
- /138/Žunić S.Z., Kelleher K., Čeliković I., Ujić P., Paridaens J., McLaughlin P.J., Čunić O., Milić G., Nikolić J., Simonović R., A comparison of retrospective radon gas measurement techniques carried out in the serbian spa Niška Banja, Nuclear Technology & Radiation Protection-2/2009, pp 94-99, 2009
- /139/Žunić Z., Kobal S., Vaupotič J., Kozak K., Mazur J., Birovljev A., Janik M., Čeliković I., Ujić P., Demajo A., Krstić G., Jakupi B., Quarto M., Bochicchio F., High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niska Banja (Balkan region), J. Environ.Radioact., 89, 3, pp 249-260, 2006
- /140/M.Milojević, M. Martinović, Utilization of geothermal energy in Serbia-Iskorišćenost geotermalne energije u Srbiji-, International Geothermal Conference, Reykjavik, pp 32-38, 2003
- /141/Geoinstitut Beograd, Hidrogeološka istraživanja termalnih voda Prolom Banje, Beograd, 1985
- /142/Spasić N., Vranjska Banja, Plutos, Vranje, 2003
- /143/Radenković M., Papić P., Joksić J., Nikić Z., Radioaktivnost mineralnih voda šireg područja Bukulje, XXV Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 52-57, 2009
- /144/ [www.gornjatrepča.co.rs/voda](http://www.gornjatrepča.co.rs/voda)

- /145/Nešić D., Balšić V., Janjić M., Borović-Dimić J., Balneoklimatologija Vrnjačke Banje, Vrnjačka Banja, 2004
- /146/Elaborat o rezervama termalnih voda Lukovske Banje, knjiga 1: Rezultati dosadašnjih istraživanja i prikaz opštih i hidrogeoloških karakteristika terena Lukovske Banje, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1988
- /147/Izveštaj o osnovnim hidrogeološkim istraživanjima termalnih voda u području Kuršumlje, Geozavod, Beograd, 1975
- /148/Hidrogeološke karakteristike terena šire okoline Kuršumlijske Banje sa posebnim osvrtom na pojave termomineralnih voda i mogućnosti njihovog korišćenja u balneološke i toplifikacijske svrhe, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1989
- /149/Milosavljević S., Lekovite vode Vojvodine, 3b.rad. XI Jug.Simp. HG i IG, Budva, 1996
- /150/ [www.izvorienergije.com](http://www.izvorienergije.com)
- /151/ [www.greenpeace.org](http://www.greenpeace.org)
- /152/Chandhuri H., Das K.N., Bhandri K.R., Sen P., Sinha B., Radon activity measurements around Bakerswar thermal spring, Rad. Measur., 45, pp 143-145, 2010
- /153/Kraemer F.T., Radon in unconventional natural gas from Gulf Coast geopressured-geothermal reservoirs, Environ.Sci.Technol., 20, pp 939-942, 1980
- /154/Battaglia et al., Radium isotopes in geothermal fluids in Central Italy; International Atomic Energy Agency, Vienna, 600, pp 363-383, 1992
- /155/Sakoda A., Hanamoto K., Haruki N., Nagamatsu T., Yamaoka K., A comparative study on the characteristics of radioactivities and negative air ions originating from minerals in some radon hot springs, Appl. Rad. Isot., 65, pp 50-56, 2007

- /156/Badr et al., Determining the spatial scale of variation in soil radon values using a nested survey and analysis, *Radiat. Prot. Dosim.*, 49, pp 433-442, 1993
- /157/Das N.K., Bhanari R.K., Ghose D., San P., Sinha B., Anomalous fluctuation of radon, gamma dose and helium emanating from thermal spring prior to earthquake, *Curr. Sci.*, 89, pp 1399-1404, 2005
- /158/Ramola R.S., Choubey V.M., Measurement of radon exhalation rate from soil samples of Garhwal Himalaya, India, *J. Radionucl. Chem.*, 256, pp 219-223, 2003
- /159/Das N.K., Bhanari R.K., Ghose D., San P., Sinha B., Continuous monitoring of  $^{222}\text{Rn}$  and its progeny at a remote station for seismic hazard surveillance, *Radiat. Meas.*, 41, pp 634-637, 2006
- /160/Santoyo et al., variability in the gas phase composition of fluid discharged from Los Azufres geothermal field (Mexico), *J. Volcanology and Geotherm. Resources*, 47, pp 161-181, 1991
- /161/Balcazar et al., Radon measurements in heat-producing geothermal wells, *Nucl. Tracks Radiat.*, M-19(1-4) pp 283-287, 1991
- /162/Milivojević M., "Ground Waters" the first book in Serbian text-book of hydrogeology and geothermology by Svetolik Radovanović, 100 Years of hydrogeology in Yugoslavia, RGF, Belgrade, pp 21-29, 1997
- /163/Milivojević M., Martinović M., Geothermal energy possibilities, exploration and future prospects in Serbia, *Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan*, pp 319-326, 2000
- /164/Milojević M., Martinović M., Utilization of geothermal energy in Serbia- Iskorišćenost geotermalne energije u Srbiji-, *International Geothermal Conference, Reykjavik*, pp 32-38, 2003
- /165/Milivojević M., Age of tertiary magmatism rocks in the "Vardar zone" on Serbian territory using K/Ar method and its geothermal importance, *29<sup>th</sup> Intern. Geological Congress, Kyoto*, pp 844-845, 1992

- /166/Freeston D.H., Direct uses of geothermal energy 1995 (preliminary review), Proc. World Geothermal Congress, Florenz, Bd.1, S.15-25, Auckland, 1995
- /167/AlphaGUARD PQ2000/MC50 Multiparametar Radon Monitor, Characterisation of its physical properties under normal climatic and severe environmental conditions, User manual, Genitron Instrumental, Germany, 1998
- /168/Adrović F., Ninković M., Radioaktivnost i radijacioni nivoi u okolini termoelektrane, Beograd, 2005
- /169/Šutej T., Ilić R., Najžer M., Response of track-etch dosimeters to environmental radon, Nucl. Tracks Radiat. Meas., 15, 1-4, pp 547-550, 1988
- /170/Fleischer R.L., Theory of passive measurements of radon daughters and working levels by the nuclear track technique, Health. Phys., 47, pp 263-270, 1984
- /171/Miles JCH, Temporal variation of radon levels in houses and implications for radon measurement strategies, Radiation Protection Dosimetry, 93, pp 369-375, 2001
- /172/Nikezić D., Yu N.K., Uncertainty in radon measurements with CR-39 detector due to unknown deposition of  $^{218}\text{Po}$ , Nucl.Insrt. and Meth., A 450, pp 568-572, 2000
- /173/Miles JCH and Howarth CB, Results of the 2002 NRPB intercomparison of passive radon detectors, NRPB-W44, 2003
- /174/Nikezić D., Ho J.P.Y., Yip C.W.Y., Koo V.S.Y., Yu K.N., Feasibility and limitation of track studies using atomic force microscopy, Nucl.Insrt. and Meth. B 197, pp 293-300, 2002
- /175/Banjanac R., Dragić A., Grabež B., Joković D., Markušev D., Panić B., Udovičić V., Aničin I., Indoor radon measurements by nuclear track detectors: applications in secondary schools, Facta Universitatis, Vol 4(1), pp 93-100, 2003
- /176/Fleischer R.L., Giard W.R., Morgo-Campero A., Turner L.G., Alter H.W., Gingrich J.E., Dosimetry of environmental radon: Methods and theory for low-dose integrated measurements, Health Phys., 39, pp 957-967, 1980

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а Биљана Вучковић

број индекса \_\_\_\_\_

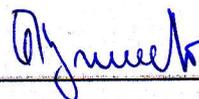
### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Истраживање концентрације активности радона у минералним и термоминералним водама Србије

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда



У Косовској Митровици, 07.02.2023.године

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Биљана Вучковић

Број индекса \_\_\_\_\_

Студијски програм Физика

Наслов рада Истраживање концентрације активности радона у минералним и термоминералним водама Србије

Ментор Проф. др Фериз Адровић

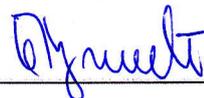
Потписани/а Биљана Вучковић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици.

Потпис докторанда



У Косовској Митровици, 07.02.2023.године



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Истраживање концентрације активности радона у минералним и термоминералним водама Србије

која је моје ауторско дело.

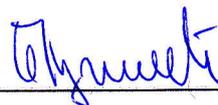
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда



У Косовској Митровици, 07.02.2023.године

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.