

## ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

<b>I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ</b>	
1.	Датум и орган који је именовao комисију
	28.05.2020. Наставно-научно веће Природно-математичког факултета Универзитета у Новом Саду
2.	Састав комисије са знаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:
1.	др Софија Форкапић, научни сарадник, научна област: природно-математичке науке, грана науке: физика, научна дисциплина: физика високих енергија (нуклеарна физика), 17.12.2014., ПМФ Универзитета у Новом Саду, председник комисије
2.	проф. др Наташа Тодоровић, редовни професор, уже научна област Нуклеарна физика, 14.2.2016., ПМФ Универзитета у Новом Саду, ментор
3.	др Бојан Миљевић, научни сарадник, научна област природно-математичке науке, грана науке: физика, научна дисциплина: кондензована материја (физика чврстог стања, нанофизика, физика материјала), 23.12.2015., Технолошки факултет Универзитета у Новом Саду, ментор
4.	др Игор Челиковић, научни сарадник, научна област: природно-математичке науке, грана науке: физика, научна дисциплина: физика високих енергија (нуклеарна физика), 26.03.2015, Институт за нуклеарне науке "Винча", члан
5.	проф. др Јована Николов, ванредни професор, уже научна област Нуклеарна физика, 14.2.2019., ПМФ Универзитета у Новом Саду, члан
6.	проф. др Вања Радолић, ванредни професор, 23.3.2016., Одјел за физику, Свеучилиште Јосип Јурај Штросмајер у Осијеку, Хрватска, уже научна област Физика, члан
<b>II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b>	
1.	Име, име једног родитеља, презиме:
	Предраг (Милена) Кузмановић
2.	Датум рођења, општина, држава:
	30.07.1993. Шабац, Србија
3.	Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив

Природно-математички факултет Универзитета у Новом Саду, Физика: модул Нуклеарна физика, мастер физичар

4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија 2017. докторске академске студије –физика

5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:

-

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: -

### III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Корелација радиолошких и структурних карактеристика грађевинских материјала

### IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Докторска дисертација је написана на укупно 271 страна и подељена је у 2 дела (теоријски - 6 поглавља и експериментални - 6 поглавља), са укупно 13 поглавља (рачунајући и закључак):

#### Предговор

- 1. Природна радиоактивност.** Историјат открића радиоактивности, Извори јонизујућег зрачења: Природни извори зрачења, извори изазвани људском делатношћу и НОРМ материјали, произведени извори зрачења. НОРМ материјали. Радионуклиди у грађевинским материјалима. Радиоактивна равнотежа.
- 2. Ефекти јонизујућег зрачења на људски организам.** Дозиметријске величине за процену утицаја зрачења на људски организам. Опис директних и индиректних начина интеракције зрачења са људским организмом.
- 3. Радон.** Главне карактеристике сва три радонова изотопа. Еманација и ексхалација радона. Транспорт и ексхалација радона из грађевинских материјала. Акумулација радона у мерној комори. Коефицијент еманације радона. Коефицијент дифузије радона. Методе мерења радона (активне и пасивне). Активне технике мерења радона. Алфа спектрометар RAD7. Радон монитор AlphaGuard PQ 2000 PRO. Уређај AlphaE. Уређај RTM 1688-2. Пасивна мерна техника мерења радона канистерима са активним угљем.
- 4. Мерење нивоа радиоактивности.** Кратак опис мерења концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  методом гама спектрометрије.
- 5. Методе структурне карактеризације грађевинских материјала.** Рендгенско зрачење. Рендгенографска структурна анализа (XRD). Рендгенска флуоресцентна анализа (XRF). Одређивање текстуралних карактеристика грађевинских материјала. Методе апсорпције воде. Живина порозиметрија.
- 6. Процена радијационог ризика од гама зрачења и радона из грађевинских материјала.** Хазард индекси и дозе зрачења. Спољашњи хазард индекси. Гама индекс. Радијумски еквивалентни индекс активности. Јачина апсорбоване дозе. Годишња ефективна доза. Мерење јачине дозе. Ризик од настанка канцера током живота. Унутрашњи хазард индекси. Алфа индекс. Алфа дозни еквивалент. Годишња ефективна доза од радона. Монте Карло симулације.
- 7. Прикупљање и припрема узорка.**
- 8. Сировине и грађевински материјали са повећаним нивоом радиоактивности.** Гранит. Процена јачине апсорбоване дозе коришћењем Монте Карло симулација. Фосфогипс и природни гипс. Сировински материјали у керамичкој индустрији. Керамичка и опекарска глина. Фелдспат. Кварцни песак. Цирконијумски минерали. Керамичке плочице. Структурна и хемијска карактеризација керамичких плочица произведених у Србији. Мерење ексхалације радона из керамичких плочица.
- 9. Сировине и грађевински материјали опште употребе.** Мерења радиоактивности типичних грађевинских материјала и процена радијационог ризика од употребе. Процена брзина ексхалације радона, унутрашњих концентрација радона, као и годишњих ефективних доза од удисања радона. Мерење дозе гама зрачења из грађевинских материјала и унутрашње концентрације радона у једној типичној кући у Србији.

**10. Употреба фосфогипса у производњи опеке.** Радијациони аспекти примене фосфогипса у производњи опеке уз процену радијационог ризика од потенцијалне употребе. Процена јачина апсорбованих доза гама зрачења из узорака коришћењем Монте Карло симулација. Минералозна и хемијска карактеризација сировинских материјала, као и узорака опеке.

**11. Варијације коефицијента еманације радона.** Утицај величине мерне коморе на вредности коефицијента еманације радона. Испитивање ефеката цурења и повратне дифузије на вредности коефицијента еманације. Поређење добијених вредности различитим активним уређајима. Одређивање коефицијента цурења мерне коморе. Варијације коефицијента еманације радона током времена мерења. Утицај спрашености (величине фракције) узорка на вредности коефицијента еманације.

**12. Утицај структуре материјала на еманацију радона.** Одређивање коефицијента еманације радона различитим мерним техникама. Уочавање недостатака коришћених експерименталних поставки које доводе до варијација у вредностима коефицијената еманације радона. Одабир најадекватније методе мерења еманације радона. Одређивање укупне ефективне порозности селектованих узорака грађевинских материјала, различитим мерним техникама. Одређивање расподеле удела отворених пора у укупној ефективној порозности по полупречницима. Минералозна и хемијска карактеризација селектованих узорака. Довођење у везу структурних и радиолошких карактеристика селектованих грађевинских материјала.

**13. Закључак.** Приказ главних закључака из експерименталног дела докторске дисертације.

Докторска дисертације садржи укупно 128 слика и графикана, 94 табеле, 271 референцу и 3 прилога.

## **V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Докторска дисертација подељена је у више поглавља, али се могу уочити два главне целине. Првих 6 поглавља дају теоријске основе из дате теме и она чине прву целину. Друга целина су наредних 6 поглавља која су фокусирана на истраживачки рад и дају детаљан приказ и анализу добијених експерименталних резултата. На крају су дата још 3 поглавља која садрже закључна разматрања, прилоге, као и коришћене референце.

У предговору докторске дисертације (**Уводни део**) дат је детаљан опис предмета и проблема истраживања, као и потреба за истраживањем са прегледом коришћених метода рада.

### **Теоријски део**

У **првом поглављу** приказан је кратак историјат открића природне радиоактивности, затим је дата класификација извора јонизујућег зрачења, са знацима укупног учешћа појединих извора у укупној изложености човека. Дато је објашњење и кратак опис НОРМ материјала као извора јонизујућег зрачења. Затим је дат преглед сва три радиоактивна низа која се могу наћи у природи, са посебним освртом на радионуклиде који могу бити присутни у грађевинским материјалима и који су од изузетне важности за анализирање у експерименталном делу докторске дисертације. Дат је детаљан теоријски опис трајне и прелазне радиоактивне равнотеже које могу бити успостављене међу радионуклидима.

У **другом поглављу** дата су теоријска разматрања о ефектима јонизујућег зрачења на људски организам. Дат је преглед дозиметријских величина које се користе за описивање и квантификовање директне и индиректне интеракције зрачења са људским организмом, као и ефекти који настају при интеракцији.

У **трећем поглављу** дате су главне карактеристике сва три радонова изотопа, са посебним освртом на изотоп Rn-222. Дате су главне карактеристике Rn-222. Дате су типичне вредности концентрација радона у затвореном простору и представљени начини његовог уласка у затворен простор. У овом поглављу описани су механизми еманације и ексхалације радона из грађевинских материјала. Дат је детаљан теоријски опис транспорта радона и ексхалације са површине грађевинског материјала, полазећи од Фиковог закона. Дефинисани су појмови површинске ексхалације, коефицијента дифузије, ефективне порозности, коефицијента еманације, дужине дифузије радона са типичним вредностима за поједине врсте материјала. Разматрана је дифузија радона из тла кроз грађевински материјал. Представљена је релација за процену унутрашње концентрације радона која укључује све значајне изворе радона у просторији. Приказан је утицај проветрености просторије на вредности концентрације радона у просторији. Дате су препоручене вредности унутрашњих

концентрација радона од стране Европске Комисије из 1999. као и Свестске здравствене организације из 2009. године и Европске Уније из 2014. године. Дате су теоријске основе мерења акумулације радона у мерним коморама. Разматрани су ефекти повратне дифузије и цурења који доприносе ефективној константи распада и знатно утичу на добијене резултате током мерења ексхалације радона у мерним коморама различитих запремина. Дискутован је утицај различитих запремина мерних комора које поједини аутори користе у својим истраживањима приликом мерења ексхалације радона. Приказане су релације за одређивање равнотежне концентрације радона. Дат је специфичан случај одређивања брзине површинске ексхалације радона из грађевинског материјала, када је време мерења релативно кратко. Детаљно су теоријски разматрани коефицијенти еманације и дифузије радона, са предлогом како се оптимално експериментално могу одредити. Дате су њихове типичне вредности за грађевинске материјале, са наглашавањем од чега све зависе измерене вредности. Описане су главне развијене и доступне методе мерења радона у ваздуху које се користе за процену ексхалације радона из грађевинских материјала. Описани су активни и пасивни уређаји којима су вршена мерења радона у експерименталном делу докторске дисертације (активни уређаји RAD7, AlphaGuard PQ 2000 PRO, AlphaE i RTM 1688-2, као и пасивна метода мерења радона адсорпцијом радона на активном угљу).

У **четвртом поглављу** дат је кратак опис мерења нивоа радиоактивности узорака грађевинских материјала методом гама спектрометрије. Приказан је начин одређивања концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , као и конструкција и калибрација самог гама спектрометра на Департаману за физику, ПМФ-а у Новом Саду. Описан је метод одређивања минималне детектабилне активности (МДА) радионуклида у анализираним узорцима фосфогипса, као и мерних несигурности.

У **петом поглављу** приказане су методе структурне карактеризације грађевинских материјала коришћених у експерименталном делу докторске дисертације. Дат је преглед главних особина и врсте рендгенског зрачења, а затим укратко описане рендгенска структурна анализа (XRD) и рендгенска флуоресцентна анализа (XRF). Наведене су главне карактеристике коришћених уређаја, као и начина спровођења мерења. Дефинисан је појам порозности материјала са поделом порозности материјала према величини пора. Приказане су методе одређивања апсорпције воде у складу са међународном ASTM и националном SRPS EN стандардном методом. Приказана је метода живине порозиметрије са описом мерног уређаја и процедуре мерења.

У **шестом поглављу** објашњени су основни принципи које се користе при процени радијационог ризика од изложености гама зрачењу и од удисања радона ексхалираног из грађевинских материјала. Дефинисан је радијациони ризик уз наглашавање ALARA принципа. Објашњена је намена контроле радиоактивности грађевинских материјала. Разматрани су начини процене радијационог ризика за људе у затвореном простору, као и професионално изложена лица. Размотрене су препоруке дате у појединим међународним директивама дате од стране Европске уније и Светске здравствене организације. Дат је преглед величина које се користе при процени радијационог ризика: хазард индекси и дозе зрачења. За сваку од описаних величина наведена је препоручена вредност. Приказан је и приступ процене радијационог ризика Монте Карло симулацијама, које су коришћене у експерименталном делу докторске дисертације.

#### **Експериментални део:**

У **седмом поглављу** приказани су начини прикупљања и припреме узорака за анализе у докторској дисертацији.

У **осмом поглављу** приказани су експериментални резултати радиолошке и минералолошке и хемијске карактеризације сировина и грађевинских материјала са повећаним нивоом радиоактивности. Приказана је радиолошка карактеризација 40 узорака гранита уз детаљну анализу нивоа радиоактивности и приказ корелација између појединих измерених вредности радионуклида. Процењени су хазард индекси и годишње ефективне дозе, као и концентрације радона које се могу акумулирати у затвореном простору за свих 40 анализираних узорака гранита. Добијене вредности су упоређиване са вредностима за граните у свету, као и са препорученим вредностима за појединачне анализирани параметре. Дата је процена јачина апсорбованих доза за 6 узорака гранита који се користе у Србији методом Монте Карло симулација. Добијене вредности су упоређиване са теоријски процењеним вредностима. Анализирани су утицаји варијације густине гранита на вредности јачине апсорбоване дозе, као и положаја воденог цилиндра, који је репрезентовао људско тело, у просторији стандардних димензија. Уочени су недостаци теоријског модела и дате препоруке за побољшање. Извршена је радиолошка, минералолошка и хемијска

карактеризација фосфогипса као NORM материјала. Радиолошка карактеризација је извршена ради одређивања нивоа радиоактивности и одређивања ексхалације радона помоћу активног уређаја RAD7. Разматране су потенцијалне могућности коришћења фосфогипса у грађевинарству као додатка природном гипсу у адекватну теоријску процену радијационог ризика. Измерене вредности типичних радионуклида који у највећој мери доприносе укупној дози зрачења упоређиване су са измереним вредностима за фосфогипс и природни гипс у другим земљама у свету. Извршено је мерење дистрибуције радионуклида по фракцијама у балк узорку фосфогипса. Одређен је коефицијент еманације фосфогипса и природног гипса и извршена процена концентрација радона у затвореном услед потенцијалног коришћења у производњи гипс-картон плоча и употребе у ентеријеру. Приказана је минералозна и хемијска анализа појединих узорка природног гипса и фосфогипса произведеног у Србији. Извршена су мерења нивоа радиоактивности у појединим сировинским материјалима који су у Србији у употреби у керамичкој индустрији (керамичке и опекарске глине, фелдспата, кварца и цирконијумских минерала) и извршена процена радијационог ризика за професионално изложена лица у смислу хазард индекса и годишњих ефективних доза. Пре приказа добијених резултата дат је кратак опис наведених сировинских материјала, са знацима удела у керамичким материјалима. За сваку групу сировинских материјала приказана је релативна заступљеност анализираних радионуклида у узорцима. Приказана је минералозна и хемијска анализа опекарске глине Јовановића брдо која је коришћена за даља истраживања у докторској дисертацији. Добијене вредности су упоређиване са вредностима за исте врсте материјала у другим истраживањима у свету, као и са препорученим вредностима. Приказане су корелације међу појединим анализираним параметрима. Приказана је анализа 99 узорка керамичких плочица које се користе у Србији, од којих је 21 узорак произведен у Србији и извршена је процена радијационог ризика од њиховог коришћења. Успостављене су корелације међу анализираним варијаблима. Упоредивана је релативна заступљеност анализираних радионуклида у сировинским материјалима и керамичким плочицама у Србији и других 9 анализираних земаља. Приказана је минералозна анализа 5 узорка керамичких плочица произведених у фабрици Зорка Керамика из Шапца. Хемијска анализа ових 5 узорка је извршена како за бисквит, тако и за глазуру анализираних узорка керамичких плочица. Након спроведених мерења радиоактивности, минералозна анализа и хемијске анализе, обављена су мерења ексхалације радона у радонској комори за 3 селектована узорка подних керамичких плочица на Академији струковних студија Шабац. Приказана су мерења са два активна уређаја чије су вредности упоређиване. Приказана су праћења промене ефективне константе распада и брзине површинске ексхалације радона током времена. Одређен је допринос анализираних узорка керамичких плочица укупној унутрашњој концентрацији радона у просторији. Приказана су и мерења унутрашњих концентрација радона у различитим просторијама у истој установи.

У **деветом поглављу** приказана је радиолошка карактеризација сировинских материјала (песка, шљунка, цемента, грађевинског лепка и пепела) и грађевинских материјала опште употребе (бетона, малтера, опеке, сипорекса, и црепа). Измерене вредности концентрација активности анализираних радионуклида су поређене са просечним вредностима за грађевинске материјале у свету, као и са другим сличним истраживањима. На основу вредности коефицијента еманације одређених у другим истраживањима, процењене су вредности површинских ексхалација радона, и на основу тога процењене вредности унутрашњих концентрација радона. Процењен је радијациони ризик и у погледу изложености гама зрачењу и радону. Извршена су дозиметријска мерења за поједине грађевинске материјале. У једној типичној кући у Шапцу, извршена су мерења унутрашње концентрације радона, као и дозиметријска мерења уграђених грађевинских материјала.

У **десетом поглављу** разматрана је употреба фосфогипса као NORM материјала у производњи опеке. Фосфогипс је у различитим процентима додаван глини са површинског копа Јовановића брдо, те су добијени различити узорци опеке. Извршена су мерења радиоактивности сировинских материјала, као и узорка опеке, након чега је извршена процена радијационог ризика у погледу емисије гама зрачења. XRF методом извршена је анализа главних елемената присутних у узорцима опеке. Добијени резултати хемијске анализе, као и концентрација активности три главна радионуклида у узорцима извршена је процена јачина апсорбованих доза гама зрачења коришћењем Монте Карло симулација. Добијене вредности за узорке опеке поређене су са теоријски процењеним вредностима, уочена су одступања и предложене корекције за побољшање теоријског модела за процену јачина доза гама зрачења код узорка опеке. Разматран је утицај хемијског састава и густине на вредности јачине апсорбоване дозе гама зрачења, такође методом

Монте Карло симулација. Приказане су корелације између симулираних вредности јачина доза гама зрачења и концентрација активности анализираних радионуклида. XRD методом извршена је минералошка анализа, како сировинских материјала, тако и узорака опеке. Уређајем RAD7 извршена су мерења површинске ексхалације радона из узорака опеке. Одређене су вредности коефицијента еманације радона. Одређене су унутрашње концентрације радона у просторији изграђеној од анализираних узорака опеке и одређене су дозе зрачења од потенцијалног излагања радону, како при нормалној, тако и при лошој проветрености просторије. Успостављене су корелације међу анализираним параметрима. Добијени резултати су засигурно обећавајући и дају добру основу за даља истраживања, као и засигурно радиолошки безбедно коришћење фосфогипса у производњи опеке предложеним начином, као и спроведеним методама радиолошке карактеризације.

У **једанаестом поглављу** приказане су могуће варијације коефицијента еманације које се могу јавити приликом мерења. Испитивања су вршена са узорцима фосфогипа и природног гипса, за узорке у прашкастом и чврстом облику. Мерења еманације радона из узорака су извршена активним уређајима RAD7 и RTM 1688-2. Испитиван је утицај запремине мерне коморе на вредности коефицијента еманације. Коришћене су коморе различитих запремина од 1,5-30 литара. Испитиван је утицај ефекта цурења и повратне дифузије на поступак одређивања коефицијента еманације са активним уређајима. Праћене су варијације ефективне константе распада радона међу анализираним узорцима мереним у различитим мерним коморама. Представљене су и варијације брзине масене ексхалације радона за узорке мерене у коморама различитих запремина. Вршена су праћења ефективних константи распада, коефицијента еманације и брзине масене ексхалације за различите временске интервале за узорак код којег је приликом мерења наступила трајна радиоактивна равнотежа. Приказане су корелације међу анализираним величинама. Такође је приказан и утицај величине фракције узорка фосфогипса на вредности коефицијента еманације и брзине масене ексхалације. Добијени резултати у овом поглављу су указали на битне чињенице и проблематику која се може јавити приликом мерења ексхалације радона и изведени су закључци који ће служити за даља истраживања у циљу оптимизације методе мерења ексхалације радона активним уређајима.

У **дванаестом поглављу** испитиван је утицај структуре грађевинских материјала на вредности коефицијента еманације радона. Анализе су спроведене за 12 селектованих грађевинских материјала који се користе у Србији за облагање подних површина. Најпре су извршена мерења ексхалације радона из узорка са највишом концентрацијом Ra-226 са три уређаја чије су вредности коефицијента еманације упоређиване. Мерења су спроведена како за узорак у облику плоче, тако и за издробљени узорак. Анализиране су промене ефективне константе распада, коефицијента еманације и брзине површинске ексхалације радона током времена мерења са два активна уређаја RAD7 и RTM 1688-2. Након упоређивања вредности добијених са 3 мерна уређаја, за даља мерења ексхалације радона одабрана је експериментална поставка при којој су ефекти цурења и повратне дифузије били најмање изражени. За преосталих 11 узорака уређајем RAD7 одређене су вредности коефицијента еманације радона. Методом живине порозиметрије и методама апсорпције воде извршена су мерења ефективних порозности за свих 12 селектованих узорака. Приказана је расподела удела пора према њиховој величини у укупној ефективној порозности, одређена методом живине порозиметрије. XRD методом одређена је минералошка, а XRF методом хемијска карактеризација 12 селектованих узорака. Добијени резултати структурних карактеристика (порозности, минералошких и хемијских особина) доведени су у везу са вредностима коефицијента еманације за анализиране узорке. Приказане су корелације међу одређеним величинама. Закључено је да коефицијент еманације зависи од структуре материјала, пре свега густине и порозности, али и самог начина производње.

У **тринаестом поглављу** су приказана закључна разматрања и могућности примене резултата у даљим истраживањима.

У **четрнаестом поглављу** дата су три прилога.

У **петнаестом поглављу** дат је преглед литературе коришћене приликом израде докторске дисертације.

**На основу свега изложеног, Комисија је позитивно оценила све делове докторске дисертације.**

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

M14 (1)

1. Todorović, N., Nikolov, J., 2020. Radionuclides Properties, Behavior and Potential Health Effects, Chapter 6: **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Forkapić, S., Nikolov, J., Mrđa, D., Knežević, J., 2020. *Activity concentrations of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in building materials in Serbia, radon exhalation rate and assessment of radiological impact*, Nova Science Publishers, 97-132. New York. ISBN: 978-1-53617-379-6

M21 (2)

1. **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Forkapić, S., Filipović Petrović, L., Knežević, J., Nikolov, J., Miljević B., 2020. *Radiological characterization of phosphogypsum produced in Serbia*. Radiat. Phys. Chem. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108463>
2. Knezević, J., **Kuzmanović, P.**, Mrdja, D., Todorović, N., Bikit, I., Hansman, J., 2020. *Estimation of absorbed gamma dose rate from granite by Monte Carlo simulation approach*. J. Radiol. Prot. . 40, 596–611. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab8c22>

M22 (5)

1. **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Nikolov, J., Hansman J., Vraničar A., Knežević J., Miljević B., 2019. *Assessment of radiation risk and radon exhalation rate for granite used in the construction industry*. J. Radioanal. Nucl. Chem., 321(2), 565-577. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06592-9>
2. **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Mrđa, D., Nikolov, J., Knežević, J., Hansman J., 2019. *Radiation exposure to zircon minerals in Serbian ceramic industries*. J. Radioanal. Nucl. Chem., 322(2), 949-960. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06743-y>
3. **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Miljević, B., Nikolov, J., Knežević, J., Vraničar, A., Hansman, J., 2020. *Natural radioactivity in ceramic tiles used in Serbian buildings*. Rom. J. Phys 65, 805.
4. **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Nikolov, J., Knežević, J., Miljević, B., 2020. *Radiological, structural and chemical characterization of raw materials and ceramic tiles in Serbia*, J. Radioanal. Nucl. Chem., 323(2), 861–874. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06987-8>
5. **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Filipović Petrović, L., Mrđa, D., Forkapić, S., Nikolov, J., Knežević, J., 2020. *Radioactivity of building materials in Serbia and assessment of radiological hazard of gamma radiation and radon exhalation*, J. Radioanal. Nucl. Chem. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07130-8>

M33 (1)

- Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Nikolov, J., Knežević, J., Hansman, J., Vraničar, A., 2019. *Assessment of radiation risk for building materials in Serbia*, VI International Congress “Engineering, Environment and Materials in Processing Industry“ EEM – Congress 2019, Jahorina, March 11<sup>th</sup>-13<sup>th</sup> 2019, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina.

M34 (1)

- Nikolov, J., **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Knežević, J., Forkapić, S., Filipović Petrović, L., 2019. *Radioactivity measurements of phosphogypsum produced in Serbia*. Book of Abstracts, 5th International Conference on Environmental Radioactivity Variations of Environmental Radionuclides – ENVIRA, 2019. ID57.

M63 (2)

1. **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Forkapić, S., Filipović Petrović, L., Knežević, J., Hansman, J., Vraničar, A., Miljević B., 2019. *Radijacioni aspekti primene fosfogipsa u građevinarstvu*. Zbornik radova XXX Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Divčibare 2-4.10.2019, p. 155-161, ISBN 978-86-7306-154-2, Beograd, Srbija.
2. **Kuzmanović, P.**, Todorović, N., Forkapić, S., Knežević, J., Filipović Petrović, L., Nikolov, J., Miljević B., 2019. *Određivanje emanacije  $^{222}\text{Rn}$  iz prirodnog gipsa i fosfogipsa*. Zbornik radova XXX Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Divčibare 2-4.10.2019, p. 251-257, ISBN 978-86-7306-154-2, Beograd, Srbija.

## VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

На основу анализираних и дискутованих резултата у докторској дисертацији изнети су конкретни и прецизни закључци на основу спроведене радиолошке карактеризације 348 узорака грађевинских материјала, као и минералшке, хемијске и текстуалне анализе селектованих узорака грађевинских материјала. Најзначајнији закључци у докторској дисертацији су представљени по поглављима:

1. Из свега анализираних у поглављу 8 за 40 узорака гранита може се закључити да измерене вредности концентрације радионуклида  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  двоструко премашују просечне вредности за грађевинске материјале у свету. Иако процењене вредности хазард индекса премашују препоручене вредности за већину анализираних узорака, годишње ефективне дозе гама зрачења су испод препоручене границе, што указује да је радијациони ризик од гама зрачења при употреби оваквих материјала у ентеријеру занемарљив. Спроведена процена доприноса радона унутрашњим концентрацијама за најгори могући сценарио указује да у случају нормалне проветрености у просторији, ексхалација радона из гранита нема значајан утицај на изложеност људи, док за случај лоше проветрености у просторији унутрашња концентрација радона може премашити горњу препоручену референтну вредност по директиви ЕУ од  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ , што представља значајну концентрацију радона ако се зна да грађевински материјали на приземном нивоу не представљају доминантни извор радона, већ тло испод објекта. Резултати указују да у случају слабе проветрености у просторији радон може представљати радијациони ризик и на вишим спратовима у објекту.
2. Анализом резултата јачина апсорбованих доза и годишњих ефективних доза добијених Монте Карло симулацијама за 6 узорака гранита установљено је да су симулиране вредности око 30-40% веће од теоријски процењених вредности. Закључено је да повећање вредности специфичних брзина доза у релацији (6.4а) за приближно 40% (тј. на вредности 0,17, 0,20 и 0,0134, изражено у  $\text{nGy h}^{-1}$  по  $\text{Bq kg}^{-1}$ , за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , респективно) доводе до реалније процене апсорбоване дозе за одређене концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у узорцима гранита. Међутим, резултати израчунати на такав начин, чак и из модификоване релације (6.4а), представљају релативно грубу процену апсорбоване дозе у односу на резултате симулације. Како би се приказала најреалнија ситуација и добила што тачнија метода за одређивање јачине апсорбоване дозе гама зрачења, ово може представљати добар основ за даља истраживања. Испитиван је и утицај положаја воденог цилиндра у просторији на вредности јачине апсорбоване дозе, где је уочено да су вредности више за око 20% у односу на вредности у центру просторије. Ово се у будућим истраживањима мора узети у обзир, како би се за циљну групу што тачније и прецизније одредила јачина апсорбоване дозе која потиче из датог грађевинског материјала.
3. Детаљна радиолошка карактеристика фосфогипса као NORM материјала која је реализована у овој докторској дисертацији представља прво истраживање могућности коришћења фосфогипса за производњу гипс-картон плоча уз процену радијационог ризика. Добијена просечна концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  у узорцима фосфогипса произведеног у Србији износила је око  $600 \text{ Bq kg}^{-1}$ , што је око 90 пута веће од просечне концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$  у узорцима гипсаних плоча који се користе у Србији. Измерене вредности  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  су занемарљиво ниске, као и вредности концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$  у узорцима природног гипса и гипсаних плоча, ако се изврши поређење са просечним вредностима ових радионуклида за грађевинске материјале у свету.  
Раздвајањем по фракцијама једног од анализираних узорака фосфогипса уочено је повећање концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  са смањењем величине честица у узорку фосфогипса. Уочено је смањење концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$  и до 37% за величину фракција ( $> 2 \text{ mm}$ ) у поређењу са балк узорком, што је важно за практичну употребу фосфогипса. Дакле, закључено је да је дистрибуција  $^{226}\text{Ra}$  највећа у најнижим фракцијама, које су након сушења и млевења узорка присутне у највећој мери. Према процењеним вредностима хазард индекса и годишњих ефективних доза зрачења утврђено је постојање значајног радијационог ризика од изложености гама зрачењу при потенцијалном коришћењу фосфогипса за производњу гипс-картон плоча и њихове употребе у ентеријеру. Због тога, да би се



изложеност гама зрачењу оптимизовала на прихватљив ниво, препоручује се његова употреба као додатка прородном гипсу. Мерењем ексхалације радона из једног узорка фосфогипса и једног узорка природног гипса, одређена је брзина ексхалације радона, и извршена процена унутрашњих концентрација радона. Закључује се да су све процењене вредности концентрација радона у затвореним просторијама испод или око доње границе од  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  за лошу проветреност просторије, те се може закључити да не постоји нарочита радијациона опасност од изложености радону. Добијене вредности унутрашњих концентрација радона при нормалној проветрености просторије незнатно су изнад вредности на отвореном простору. Без обзира на релативно ниске концентрације радона које би се могле створити у просторији при нормалној проветрености, самостална употреба фосфогипса се не препоручује услед постојања радијационог ризика од изложености гама зрачењу. Према минералшкој анализи у узорцима природног гипса уочене су главне фазе: гипс, басанит, анхидрид и калцит, док су у узорку фосфогипса уочене главне минералне фазе: гипс, басанит и кварц као пропратна нечистоћа. Према хемијској анализи главни елементи присутни у свим узорцима су S и Ca са уделом  $S > 20\%$  и  $Ca > 24\%$ . Остали анализирани елементи били су знатно мање заступљени. Узорци фосфогипса садрже много више Si и P као пропратних нечистоћа из хемијских третмана у поређењу са узорцима природног гипса.

4. На основу измерених вредности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у сировинским материјалима и финалним керамичким плочицама, извршена је систематична процена радијационог ризика за раднике у керамичкој индустрији, а добијени резултати показују да не постоји посебна опасност од изложености радника јонизујућем зрачењу током рада са НОРМ материјалима (каолин, фелдспат, кварц и циркон). Измерене вредности показују да релативни допринос  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  укупној концентрацији активности у керамичким плочицама зависи од релативног доприноса тих радионуклида у каолину и фелдспату, као главним полазним сировинама приликом производње.

На основу измерених вредности уочава се да је концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  значајно виша код узорака циркона (око 50 пута је виша од просечне за грађевинске материјале у свету) у поређењу са осталим сировинама које се користе у керамичкој индустрији. Код 41 анализираних узорака циркона вредности хазард индекса су драстично виши у односу на остале анализираних сировинске материјале који се користе у керамичкој индустрији и премашују препоручене вредности.

Годишње ефективне дозе процењене за изложеност радника од 800 h годишње не прелазе препоручену границу од 20 mSv годишње за све узорке, те се може рећи да не постоји виша опасност од изложеност гама зрачењу од прописане за професионално изложена лица. На основу процењених алфа дозних еквивалената и брзина масених ексхалација радона закључује се да не постоји посебна опасност од изложености радону радника који раде у керамичкој индустрији, те је придржавање стандардним мерама заштите од зрачења (ношење заштитних маски ради спречавања директне ингестије и инхалације прашкастих материјала са повишеним садржајем радионуклида) довољно за минимизирање изложености зрачењу.

Анализирано је укупно 99 узорака керамичких плочица од којих је 21 узорак произведен у керамичкој индустрији Зорка Керамика из Шапца. Измерене вредности концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  су у границама просечних вредности за грађевинске материјале у свету. Релативна заступљеност  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у узорцима из Србије је приближна онима произведеним у другим земљама у свету. Процењеном радијационог ризика од изложености гама зрачењу из анализираних узорака керамичких плочица добијени резултати показују да керамичке плочице, како из Србије тако и из других земаља, не представљају значајну опасност од зрачења за становништво, јер су добијене вредности хазард индекса као и годишњих ефективних доза гама зрачења далеко испод  $1 \text{ mSv y}^{-1}$ . Добијени резултати за керамичке плочице били су упоредиви са претходним студијама радиометријских анализа керамичких плочица произведених у Србији и другим земљама у свету, Табела 8.39. Уочене су значајне корелације међу концентрацијама активности анализираних радионуклида, хазард индекса као, годишњих ефективних доза и ризика од настанка канцера током живота.

XRD минералшком анализом керамичких плочица уочене су главне минералне фазе: кварц, мулит и фелдспат. Елементи са највећом заступљеношћу у глазури керамичких плочица су: Si, Ca, Zr, Al и K са масеним уделом  $> 1\%$ . Елементи присутни у бисквиту са масеним уделом  $>$

1% су: Si, Al, Ca, K и Fe. Уочено је да је масени удео K и Ca већи у зидним него у подним керамичким плочицама због већег удела Ca-, K- фелдспата.

Да би се испитао утицај ексхалације радона из керамичких плочица на укупну концентрацију радона у затвореној просторији предложен је метод мерења ексхалације радона активним радонским детекторима (алфаспектрометрима), који је валидован коришћењем различитих инструмената и детаљном анализом ефеката цурења и повратне дифузије који се могу јавити као реметилачки фактори при мерењу. На основу одређених вредности коефицијената еманације као и концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$  у узорцима плочица, које су биле око  $55 \text{ Bq kg}^{-1}$ , извршена је процена унутрашње концентрације радона од анализираних узорака. Поређењем добијених вредности са измереним вредностима концентрације радона у ваздуху просторија које су обложене датим плочицама (мерења извршена и активним и пасивним методама) процењен је допринос ексхалираног радона из плочица на мање од  $1 \text{ Bq m}^{-3}$ , одакле се закључује да керамичке плочице уграђене у просторији представљају занемарљив извор радона. Добијене вредности ексхалације радона су упоредиве са резултатима у сличним истраживањима.

У појединим просторијама обложеним анализираним подним керамичким плочицама измерена је концентрација радона око  $600 \text{ Bq m}^{-3}$ , одакле се закључује да керамичке плочице не представљају заштиту од уласка радона у просторију. Велики удео радона из земље успе ући у просторију било дифузијом како кроз бетонску подлогу тако и кроз спојеве керамичких плочица или дифузијом кроз саме керамичке плочице, што може резултирати годишњом ефективном дозом изнад  $11 \text{ mSv y}^{-1}$ .

Код једног од анализираних узорака праћена је ексхалација радона до постизања секуларне радиоактивне равнотеже. Извршена су фитовања добијених резултата према линеарном и експоненцијалном фиту, где је уочен пораст брзине површинске ексхалације радона током времена мерења, што је пропраћено порастом ефективне константе распада радона. Главни допринос ефективној константи распада даје ефекат цурења, који потиче од лоше заптивености мерне коморе на граници под-радонска комора, на чему треба порадити у будућим истраживањима, како би се оптимизовала истраживања ексхалације радона за дуже временске интервале мерења.

5. На основу гама-спектрометријског одређивања концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  великог броја грађевинских материјала процењене су вредности хазард индекса и годишњих ефективних доза. На основу добијених вредности се може закључити да је већина вредности била испод препоручених и измерених вредности за грађевинске материјале у свету, тако да се анализирани грађевински материјали могу сматрати радиолошки безбедним за употребу у ентеријеру у погледу гама зрачења.

Процењене вредности доприноса унутрашњим концентрацијама радона за анализираних 37 грађевинских материјала у случају нормалне проветрености просторије, биле су у опсегу препоручених вредности за све грађевинске материјале (испод доње препоручене вредности од  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ ). Употреба сипорекса се не препоручује за употребу у изградњи просторија са лошом вентилацијом (подруми и просторије без прозора), због могућности унутрашње концентрације радона веће од  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ , што може резултирати годишњом ефективном дозом изнад  $5,63 \text{ mSv y}^{-1}$ . Измерене вредности јачине амбијенталног еквивалента дозе које потичу од грађевинских материјала су испод просечне вредности од  $2,4 \text{ mSv y}^{-1}$ , тако да се може закључити да не постоји нарочит радијациони ризик од изложености зрачењу из грађевинских материјала у овој кући. Методом угљених канистера у једној од две просторије, у анализираној кући, у којој нема бетонске подлоге извршено је мерење концентрације радона. Измерена је вредност од око  $610 \text{ Bq m}^{-3}$ , која на годишњем нивоу резултује годишњом ефективном дозом од  $11,5 \text{ mSv y}^{-1}$ , што је скоро 5 пута већа вредност од просечне вредности од  $2,4 \text{ mSv y}^{-1}$ . Измерена вредност концентрације радона указује на потребу чешће проветрености просторије током дана која би спустила концентрацију радона а прихватљив ниво, као и спровођење адекватних мера ремедијације, како би се унутрашња концентрација радона свела испод прихватљивих  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ .

6. У поглављу 10 разматране су могућности употребе фосфогипса као додатка глини у производњи опеке. Извршена је радиолошка карактеризација сировина као и добијених

узорака након печења на 1000°C, као и стандардна опека. За све узорке извршена је процена радијационог ризика. С обзиром да у истраживањима до сада није установљена прецизна и јасна методологија процене јачина апсорбованих доза гама зрачења за узорке опеке, процена ових вредности за све узорке извршена је коришћењем Монте Карло симулација. Уочено је да се коришћењем теоријских релација не могу добити тачне вредности јачине апсорбованих доза гама зрачења, методом Монте Карло симулација је установљено да коришћена теоријска релација при процени даје за око 90% ниже вредности од оних добијених у Монте Карло симулацијама. За прецизнију процену, предложена је корекција специфичних брзина доза на 0,23 nGy h<sup>-1</sup> по Bq kg<sup>-1</sup> за <sup>226</sup>Ra, 0,26 nGy h<sup>-1</sup> по Bq kg<sup>-1</sup> за <sup>232</sup>Th и 0,018 nGy h<sup>-1</sup> по Bq kg<sup>-1</sup> за <sup>40</sup>K. Овим су добијене вредности сведене на максимално одступање од 15% у односу на симулиране вредности. Уочене су значајне корелације између симулираних вредности јачина апсорбованих доза гама зрачења и концентрација активности <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K.

Активним уређајем RAD7 одређене су вредности коефицијента еманације радона < 1%. На основу вредности коефицијената еманације радона процењене су брзине површинске ексхалације радона које су упоредиве са вредностима за типичне грађевинске материјале. Процењене вредности унутрашњих концентрација радона у потенцијално изграђеној просторији од ових материјала су испод доње границе од 100 Bq m<sup>-3</sup> и упоредиве су са раније спроведеним сличним истраживањима.

На основу XRD анализе уочене су главне минералшке фазе у узорцима опеке: кварц, анхидрид, мулит, као и геленит. Уочава се да само мали удео анхидроване фазе гипса успева да се трансформише приликом печења, формирајући минерал геленит.

Уочене су значајне корелације између брзине површинске ексхалације и коефицијента апсорпције воде, коефицијента еманације и удела фосфогипса у узорку, као и брзине површинске ексхалације радона и масеног удела Са и S у узорцима, као и осталих анализираних елемената XRF методом.

На основу свега анализираних у поглављу 10 може се закључити да употреба фосфогипса у производњи опеке са уделом фосфогипса до 40% не даје прекомерну изложеност људи зрачењу у затвореном простору. Све добијене вредности су око или испод препоручених вредности за грађевинске материјале. Добијени резултати су упоредиви са другим сличним студијама што потврђује тачност добијених резултата. Из овога се може закључити да употреба фосфогипса са садржајем <sup>226</sup>Ra око 500 Bq kg<sup>-1</sup> у производњи опеке не представља нарочиту радијациону опасност за изложеност људи јер је сам технолошки поступак производње, односно печења, довео до минимизирања радијационих ефеката, пре свега еманације радона из узорака. Према добијеним резултатима карактеризације узорака опеке може се закључити да овакав начин искоришћавања фосфогипса даје позитивне ефекте. Оваквим начином искоришћења отпадног фосфогипса смањиле би се велике количине отпада на депонијама у близини река и мора, и смањили нежељени ефекти контаминације животне средине, а добила би се и велика економска корист.

7. У поглављу 11 активним уређајима мерена је акумулација радона из узорака фосфогипса и природног гипса у мерним коморама различитих запремина 1,5-30 l. Мерења су извршена, како за прашкасте, тако и за узорке у чврстом стању. Уочене су значајне варијације ефективне константе распада радона која као интегралне доприносе садржи ефекат повратне дифузије и ефекат цурења радона који су утицали на варијације коефицијента еманације радона, као и брзине масене ексхалације. Уочене варијације при мерењу у комори запремине 1,5 l приписују се израженом ефекту повратне дифузије, док је за више запремине главни узрок добијених варијација изражен ефекат цурења мерних система приликом мерења акумулације радона. Јасно је уочено смањење ефективне константе распада са повећањем запремине мерног система. Мерењем цурења радона из мерних комора запремина 1,5 l, 2,5 l и 30 l активним уређајем установљено је да и ефекат цурења опада са повећањем запремине мерне коморе. Ако се упореде добијене константе цурења са одређеним вредностима ефективних константи распада, уочена неслагања су директна последица лоше заптивености мерних система, тако да се и сам људски фактор мора узети у обзир. Фитовање криве акумулације радона у мерној комори са најизраженијим ефектом повратне дифузије, комора запремине 1,5 l у којој је наступила секуларна радиоактивна равотежа, је спроведено у 10 временских интервала по 25h са циљем праћења ефективне константе распада и коефицијента еманације радона током

времена. Уочено је повећање ефективне константе распада током времена, што је резултирало смањењем коефицијента еманаације радона, као и повећањем брзине масене ексхалације, што је потврђено успостављањем значајних корелација.

Између осталог анализирана је и еманаација радона из узорка фосфогипса раздвојеног у 3 фракције. Може се закључити да се са смањењем величине фракције повећава његова способност напуштања зрна и еманирање у околни ваздух, јер да би се то десило у већим фракцијама, радон мора прво да мигрира у најситније поре па тек онда да дифундује у околни ваздух, што резултира мањим коефицијентом еманаације, односно смањеном брзином ексхалације. Дакле, уочено је повећање коефицијента еманаације и брзине масене ексхалације радона са смањењем величине фракције.

Главне предности оваквог начина мерења еманаације радона из грађевинских материјала, како за балк узорке, тако и за фракције, јесу да се у случају мерења активном методом може проценити почетна концентрација активности радона у мерном систему, као и ефективна константа распада, што пасивним методама није могуће. У случају мерења активним уређајем, варијације ефеката повратне дифузије и цурења, односно ефективне константе распада радона, могу створити анализирани потешкоће што може у великој мери утицати на вредности коефицијента еманаације, који расте са повећањем запремине мерне коморе услед слабљења ефеката цурења и повратне дифузије. Ефекат цурења зависи од самог дизајна коморе као и самог експериментатора који врши заштитавање мерне коморе и мерног система у целини.

Дакле, интегрални ефекти повратне дифузије и цурења могу бити веома изражени код узорака са високом концентрацијом активности  $^{226}\text{Ra}$ , што је био случај у овој студији. Код узорака грађевинских материјала са ниским садржајем  $^{226}\text{Ra}$  ( $< 10 \text{ Bq kg}^{-1}$ ), главни узроци лоших процена вредности коефицијента еманаације, односно њихових варијација леже и у малом акумулираном одброју у активном уређају, пропраћеним високом мерном несигурношћу, што је уочено код узорака природног гипса. Ово указује на потребу за опсежнијим истраживањима, у којима би се побољшала статистика одброја узорака са ниским садржајем  $^{226}\text{Ra}$  и прецизније одредили коефицијенти еманаације радона.

Из свега се може закључити да је при одређивању коефицијента еманаације радона из узорака грађевинских материјала потребно користити мерне коморе које су знатно веће запремине у односу на испитивани узорак како би се ефекат повратне дифузије могао занемарити. У супротном, резултат коефицијента еманаације у многоме зависи од концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$  као и запремине узорка и мерне коморе. Нарочито је битно посветити пажњу заштитавању мерне коморе, као и мерног система у целиности. Овим препорукама се може оптимизовати сам поступак мерења еманаације радона из грађевинских материјала, јер се поменути препорукама добија тачнији и прецизнији резултат коефицијента еманаације радона. Потребно је спровести додатна истраживања како би се добијене вредности упоредиле са краћим интервалима мерења нпр. до 5h, где би се уочени ефекти повратне дифузије и цурења могли занемарити, а добијене вредности упоредиле са оним датим у поглављу 11. Потребна су додатна истраживања како би се оптимизовала метода мерења ексхалације радона код узорака грађевинских материјала који садрже ниже концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$ , као што је то био случај са узорцима природног гипса у овој студији. Оптимизацијом методе мерења би се успоставиле значајније корелације за криве акумулације радона и тиме процизније одредили коефицијент еманаације радона.

- У поглављу 12 одређени су коефицијенти еманаације радона за селектоване грађевинске материјале који се најчешће користе у Србији за облагање подних површина. Извршена је XRD и XRF анализа свих узорака као и мерење порозности према методи живине порозиметрије као и методама апсорпције воде. Мерења коефицијента еманаације су спроведена користећи две различите експерименталне поставке са активним радонским уређајима, након чега су резултати упоређени и анализирани варијације коефицијента еманаације услед изражених ефеката цурења и повратне дифузије. Одређена је порозност свих узорака методама апсорпције воде и живином порозиметријом, где су уочене значајне корелације међу измереним величинама. Методом живине порозиметрије одређена је расподела удела пора у укупној запремини отворених пора према полупречницима. Добијени резултати указују да највеће уделе најситнијих пора  $< 1 \mu\text{m}$ , имају материјали који пролазе кроз процес пресовања и печења на високим температурама као што су керамичке плочице. Природни материјали као што су

мермер и гранит имају ниску укупну порозност са највећим уделом пора  $> 4 \mu\text{m}$ . Узорак бибер црепа највећи удео пора у укупној порозности садржи у опсегу  $1-0,12 \mu\text{m}$ , док остали анализирани узорци садрже уделе пора у доста ширим опсезима.

Може се закључити да материјали са вишим уделом СаО имају и више коефицијенте еманаације радона (што је забележено код узорака који не пролазе термичку обраду, као што су бетон, кошуљица, терацо плочица и мермер) за разлику од нпр. керамичких плочица или керамичке плочице отпорне на хемикалије.

Добијене вредности указују да су нижи коефицијенти еманаације радона својствени за керамичке материјале управо због садржаја најситнијих пора са највећим уделом у укупној порозности. Дакле, материјали који пролазе кроз процес витрификације, односно појаве течне фазе и растопа, резултирају релативно ниском укупном порозношћу, као и расподелом величине пора са нижим полупречницима. Ово је пропраћено присуством мулите кристалне фазе што доводи до релативно великих густина материјала (већих од  $2,2 \text{ g cm}^{-3}$ ) која утиче на то да радон остане заробљен у ситнијим порима, што је резултирало ниским вредностима коефицијента еманаације.

Већи удео хематитне фазе код материјала који се пеку на нижим температурама, као код узорка старог бибер црепа ВС може се довести у везу са повећањем порозности материјала, али и са већим вредностима коефицијента еманаације у односу на друге керамичке материјале.

Код гранита услед велике густине материјала (веће од  $2,5 \text{ g cm}^{-3}$ ) укупна порозност је ниска, што је пропраћено уделом пора са већим полупречницима. Коефицијент еманаације у овом случају зависи директно од минералшког састава, али и концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$  што је пропраћено већим коефицијентом еманаације радона.

Дакле, коефицијент еманаације у многоме зависи не само од концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$ , него и од структурних карактеристика, као што су удео величине пора у укупној порозности, минералшког и хемијског састава, односно начина производње анализираниог материјала.

Да би се успоставиле значајније корелације између коефицијента еманаације радона и укупне порозности материјала, али и одговарајућег опсега величине пора у укупној порозности, потребно је обавити још опсежнија истраживања. Додатна истраживања треба спровести са материјалима виших концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  чиме би се побољшала статистика одброја приликом мерења ексхалације радона. Потребно је мерења ексхалације радона спровести са неком од пасивних мерних техника, како би се упоредиле добијене вредности коефицијента еманаације радона.

Коришћењем материјала са садржајем радијума већим од  $100 \text{ Bq kg}^{-1}$  у будућим испитивањима би се засигурно прецизније одредили коефицијенти еманаације имајући у виду већу способност дифузије радона из најситнијих пора ка површини материјала, што је код већине анализираних материјала у овом поглављу био главни проблем који је утицао на статистику одброја, услед ниског садржаја  $^{226}\text{Ra}$ , што је закључено и у поглављу 11 код узорака природног гипса.

**Комисија је у потпуности позитивно оценила резултате и закључке спроведеног истраживања.**

#### **VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА**

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Кандидат Предраг Кузмановић је имао изузетно добар приступ анализи литературних података и планирању, постављању и извођењу експеримента, као и анализи експерименталних података. Резултате докторске дисертације представио на прегледан и систематичан начин. Резултати су приказани у виду текста, слика, табела и графика, а у складу са захтевима прописаним за научно-истраживачки рад. Добијени резултати адекватно су образложени и продискутовани. Приказани су резултати на веома концизан, прецизан и тачан начин. Изведени су закључци који одговарају постављеним циљевима ове докторске дисертације.

<p>Напомена: Докторска дисертација је у библиотеци Природно-математичког факултета прошла проверу плагијаторства применом софтвера iThenticate („Similarity Index“) и износи 7 % (према упутству све вредности испод 15% представљају оригинални научни рад).</p>
<p><b>IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b>  Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:</p>
<p>1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме</p> <p>Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата Предрага Кузмановића написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.</p>
<p>2. Да ли дисертација садржи све битне елементе</p> <p>Комисија сматра да дисертација садржи све битне елементе.</p>
<p>3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци</p> <p>Докторска дисертација је дала свеобухватну студију о радиолошким и структурним карактеристикама грађевинских материјала и сировина за њихову производњу доступних у Србији, што је пропраћено успостављањем значајних корелација међу анализираним параметрима. Разматран је велики број репрезентативних узорака појединих класа грађевинских материјала, што ће поставити добре основе за даља истраживања ове врсте у Србији и свету. Ова докторска дисертација је представила свеобухватну студију о процени радијационог ризика од коришћења грађевинских материјала у ентеријеру.</p> <p>Из свега наведеног се може рећи да је ова докторска дисертација својим закључцима несумњиво дала значајан допринос повезивању структурних и радиолошких карактеристика грађевинских материјала, што јој даје јединствен и оригиналан карактер, како у Србији, тако и у свету.</p> <p>У докторској дисертацији је по први пут спроведена карактеризација фосфогипса као NORM материјала и размотрен начин и могућности његовог рециклирања. Студија је предложила иновативно решење његовог искоришћења у производњи опеке којим се могу уклонити велике количине опасног хемијског отпада, што потврђују резултати добијени у овој студији. Веома значајан научни допринос ове докторске дисертације је и предлог корекције теоријских модела процене јачина апсорбованих доза гама зрачења за поједине врсте грађевинских материјала.</p> <p>Мерењем ексхалације радона из подних керамичких плочица установљено је да оне саме не представљају довољну баријеру за спречавање уласка радона у унутрашњост приземних објеката, што указује на дифузију радона кроз керамичке плочице и њихове спојеве. Закључено је и то да керамичке плочице у затвореном простору представљају апсолутно занемарљив извор радона. Наведени закључци су веома значајни за даља истраживања у циљу конструисања материјала са минималном радонском пропустљивошћу.</p> <p>Докторска дисертација је испитивањем утицаја порозности и минералског и хемијског састава на еманацију радона из селектованих узорака грађевинских материјала и уоченим закључцима засигурно поставила добре основе даљег испитивања њихове радонске пропустљивости.</p> <p>Из свега представљеног може се уочити да ова обимна студија даје конкретне закључке који дају велики научни допринос истраживањима у области проблема радона, ексхалације из грађевинских материјала и радиоекологије, као и од националног интереса за будућу законску регулативу и примену материјала у изградњи стамбених објеката. Из тог разлога ће добијени резултати засигурно послужити за даље студије о процени радијационог утицаја грађевинских материјала на изложеност људи.</p> <p>Све наведено потврђује и велики број публикација проистекао из докторске дисертације: 7 радова у међународним часописима са SCI листе и једно поглавље у монографији од међународног значаја.</p>

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања
Увидом у докторску дисертацију и детаљним прегледом свих резултата, Комисија <b>није уочила недостатке</b> који би утицали на резултате и закључке рада. Комисија оцењује да је докторска дисертација написана у складу са постављеним циљевима, да су одабране адекватне методе, да су резултати јасни и применљиви, а дискусија у складу са добијеним резултатима.
<b>X ПРЕДЛОГ:</b>
На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:
На основу укупне оцене дисертације и увида у самостални научно-истраживачки рад кандидата, Комисија са посебним задовољством предлаже да се докторска дисертација под насловом <b>“Корелација радиолошких и структурних карактеристика грађевинских материјала”</b> прихвати, а кандидату Предрагу Кузмановићу одобри одбрана исте.

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ  
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

\_\_\_\_\_  
др Софија Форкапић, научни сарадник,  
ПМФ Нови Сад–председник

\_\_\_\_\_  
проф. др Наташа Тодоровић, редовни  
професор, ПМФ Нови Сад–ментор

\_\_\_\_\_  
др Бојан Миљевић, научни сарадник,  
Технолошки факултет Нови Сад–ментор

\_\_\_\_\_  
др Игор Челиковић, научни сарадник,  
Институт за нуклеарне науке “Винча”  
Универзитет у Београду–члан

\_\_\_\_\_  
проф. др Јована Николов, ванредни професор,  
ПМФ Нови Сад–члан

\_\_\_\_\_  
проф. др Вања Радолић, ванредни професор,  
Свеучилиште Јосип Јурај Штросмајер у Осијеку,  
Хрватска–члан

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.