

**РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ**  
**ДЕПАРТМАН ЗА ХИДРОГЕОЛОГИЈУ**

08.09.2017.

1/187

На **09/17-ој** седници Департмана за хидрогеологију одржаној дана **07. 09. 2017.** године једногласно је донета

**О Д Л У К А**

да се предложи Већу Геолошког одсека да усвоји Извештај комисије за оцену и одбрану теме докторске дисертације и кандидата, **Марине Ћук, мастер инж. геологије,** под називом:

**ХИДРОГЕОХЕМИЈА ПРИРОДНИХ РАДИОАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА У  
ПОДЗЕМНИМ ВОДАМА СРБИЈЕ**

Комисија је у следећем саставу:

*др Петар Папић, ред. проф. Рударско-геолошког факултета у Београду*  
*др Веселин Драгишић, ред. проф. Рударско-геолошког факултета у Београду*  
*др Игор Јемцов, ван. проф. Рударско-геолошког факултета у Београду*  
*др Јана Штрбачки, научни сарадник Рударско-геолошког факултета у Београду*  
*др Јован Ковачевић, виши научни сарадник Геолошког завода Србије у Београду*

Шеф Департмана за хидрогеологију

проф. др Весна Ристић Вакањац

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ  
БЕОГРАД, БУЛЕВАР 57

ПРИЈАВЉЕНО:	18.07.2017.		
Оригинал	Број	Потпис	Бројаност
	1/149		

**UNIVERZITET U BEOGRADU**

**Rudarsko-geološki fakultet**

### **NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU**

**Predmet:** Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Marine Ćuk, master inženjera geologije za hidrogeologiju

Odlukom Nastavno-naučnog veća Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, od 26.6.2017. godine (br. 1/122), određeni smo za članove komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije kandidata Marine Ćuk, master inženjera geologije, pod nazivom

#### **Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije**

Na osnovu pregleda doktorske disertacije komisija podnosi Nastavno-naučnom veću Rudarsko-geološkog fakulteta sledeći

### **R E F E R A T**

#### **1. UVOD**

##### **1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije**

-Marina Ćuk upisala je školske 2011/2012. godine doktorske akademske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu na studijskom programu Hidrogeologija. Položila je sve ispite predviđene planom i programom studija u predviđenom roku sa prosečnom ocenom 10.

-Od oktobra 2011. godine je zaposlena kao istraživač-pripravnik na Departmanu za hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta, u okviru projekta Ministarstva nauke, prosvete i tehnološkog razvoja: Simultana bioremedijacija i soillifikacija degradiranih prostora, za očuvanje prirodnih resursa biološki aktivnih supstanci i razvoj i proizvodnju biomaterijala i dijetetskih proizvoda

(Projekat III 43004/2: Zaštita geo i bio sredina kao prirodnih resursa i izvora biološki aktivnih supstanci). U naučno zvanje istraživač-saradnik izabrana je oktobra 2012. godine.

-U septembru 2013. god. izradom Projekta doktorske disertacije i javnom odbranom istog, definisane su naučna metodologija i predmetna oblast istraživanja, što je omogućilo postavljanje osnovne strukture doktorske disertacije.

-U februaru 2014. god. doktorandkinja je podnela zvanični predlog teme za izradu doktorske disertacije.

-Odlukom Nastavno-naučnog veća Rudarsko-geološkog fakulteta od 20.02.2014. god. (br. 1/76) imenovana je tročlana Komisija za ocenu podobnosti teme, kandidata i mentora predložene teme doktorske disertacije u sastavu: dr Petar Papić, red. prof. (mentor, Univerzitet u Beogradu: Rudarsko-geološki fakultet), dr Veselin Dragišić, red. prof. (mentor, Univerzitet u Beogradu: Rudarsko-geološki fakultet), i dr Zoran Nikić, red. prof. (Univerzitet u Beogradu: Šumarski fakultet).

-Nastavno-naučno veće Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, na svojoj sednici održanoj 10.04.2014. god., shodno članu 175. stav 4. Statuta Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, donelo je odluku o usvajanju izveštaja Komisije za ocenu podobnosti teme, kandidata i mentora predložene teme doktorske disertacije. Prema ovoj odluci, doktorandkinji se odobrava izrada doktorske disertacije pod naslovom: „**Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije**“, a za mentora se imenuje **dr Petar Papić, red. prof. (Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet)**.

-Na osnovu člana 47. stav 5. tačka. 3. Statuta Univerziteta u Beogradu ("Glasnik Univerziteta u Beogradu", broj 162/11- prečišćeni tekst, 167/12 i 172/13) i čl. 14. – 21. Pravilnika o većima naučnih oblasti na Univerzitetu u Beogradu ("Glasnik Univerziteta u Beogradu", broj 134/07, 150/09, 158/11, 164/11 i 165/11), a na zahtev Rudarsko-geološkog fakulteta, broj: 1/146 od 25.04.2014. godine, Veće naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu, na sednici održanoj 12.05.2014. godine, donelo je odluku o davanju saglasnosti na predlog teme doktorske disertacije Marine Ćuk pod nazivom: „Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije“.

-U junu 2017. god. doktorandkinja je podnela zahtev za imenovanje komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije Nastavno-naučnom veću Rudarsko-geološkog fakulteta.

- Na osnovu člana 30. Zakona o visokom obrazovanju, člana 111. Statuta Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu i člana 57. Pravilnika o doktorskim studijama na Rudarsko-geološkom fakultetu, Nastavno-naučno veće Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, na svojoj sednici održanoj 22.06.2017. god. donelo je Odluku (br. 1/122) o imenovanju Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije Marine Ćuk, master inž. geologije, pod naslovom „ Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije“ u sastavu: dr Petar Papić, red. prof. (mentor, Univerzitet u Beogradu: Rudarskogeološki fakultet), dr Veselin Dragišić, red. prof. (Univerzitet u Beogradu: Rudarsko-geološki fakultet), dr Igor Jemcov, van. prof. (Univerzitet u Beogradu: Rudarsko-geološki fakultet), dr Jana Štrbački, naučni saradnik (Univerzitet u Beogradu: Rudarsko-geološki fakultet) i dr Jovan Kovačević, viši naučni savetnik. (Geološki zavod Srbije).

### **1.2. Naučna oblast disertacije**

Doktorska disertacija Marine Ćuk pod nazivom „Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije“, po svom sadržaju pripada tehničkim naukama i naučnoj oblasti geološkog inženjerstva, u širem smislu, dok je uža tematska oblast Hidrogeologija. Specijalistički segment kojim se ova disertacija bavi jeste hidrogeohemija i istraživanje prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama regionalnih i intermedijarnih hidrogeoloških sistema. Za mentora doktorske disertacije imenovan je dr Petar Papić, redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Rudarsko-geološkog fakulteta, zbog istaknutih naučnih doprinosa u hidrogeologiji, a posebno u užoj naučnoj oblasti Hidrogeohemije, kojom se i bavi predmetna disertacija.

### **1.3. Biografski podaci o kandidatu**

Marina Ćuk rođena je 18.06.1987. godine u Zrenjaninu. Pohađala je Zrenjaninsku gimnaziju, prirodno-matematički smer, koju je završila 2006. godine. Iste godine upisala je Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, smer za hidrogeologiju. Osnovne akademske studije završila je u roku, sa prosečnom ocenom 8.87 i u septembru 2010. godine odbranila je završni rad pod nazivom „Ekološki aspekt korišćenja geotermalnih voda“, sa ocenom 10.

Školske 2010/2011. godine upisala je master akademske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, na smeru za hidrogeologiju. Master akademske studije je završila u roku, sa prosečnom ocenom 9.91 i u septembru 2011. godine je odbranila završni master rad pod nazivom „Arsen u podzemnim vodama Vojvodine“, sa ocenom 10. Školske 2011/2012. upisala je doktorske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, na smeru za hidrogeologiju.

Od oktobra 2011. godine je zaposlena kao istraživač-pripravnik na Departmanu za hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta, u okviru projekta Ministarstva nauke, prosvete i tehnološkog razvoja (Projekat III 43004). U naučno zvanje istraživač-saradnik izabrana je oktobra 2012. godine.

Autor je i koautor 24 naučna rada koji su objavljeni u domaćim i stranim časopisima, od kojih je pet sa SCI liste.

Član je Srpskog geološkog društva i Međunarodne asocijacije hidrogeologa (IAH).

## **2. OPIS DISERTACIJE**

### **2.1. Sadržaj disertacije**

-Doktorska disertacija pod nazivom „Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije“ napisana je na 177 strana u skladu sa uputstvom za oblikovanje doktorske disertacije od strane Univerziteta u Beogradu. Disertacija sadrži 82 ilustracije (grafikoni, crteži ili sheme) i 42 tabele. Disertacija sadrži sledeće delove: naslovnu stranu na srpskom i engleskom jeziku, stranu sa podacima o mentoru i članovima komisije, rezime na srpskom i engleskom jeziku sa ključnim rečima, pet poglavlja, spisak korišćene literature, priloge, biografiju doktoranda i izjavu o autorstvu, izjavu o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada i izjavu o korišćenju.

- Strukturu doktorske disertacije čine sledeće oblasti (poglavlja):

- I Uvod
- II Područje istraživanja
- III Metode
- IV Rezultati i diskusija
- V Zaključak

Sadržaj doktorske disertacije je sledeći:

## **I UVOD**

### **1. PROBLEMATIKA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

### **2. TEORIJSKE POSTAVKE**

- 2.1. Poreklo prirodne radioaktivnosti podzemnih voda
- 2.2. Hidrogeohemijske karakteristike prirodnih radioaktivnih elemenata
  - 2.2.1. Hidrogeohemijski ciklus kalijuma
  - 2.2.2. Hidrogeohemijski ciklus urana
  - 2.2.3. Hidrogeohemijski ciklus torijuma
- 2.3. Formiranje hemijskog sastava podzemnih voda u regionalnim hidrogeološkim sistemima
  - 2.3.1. Regionalni hidrogeološki sistemi u basenskim strukturama
  - 2.3.2. Hidrogeološke strukture u dubokim rasednim zonama

## **II PODRUČJE ISTRAŽIVANJA**

### **3. HIDROGEOLOŠKI SISTEMI U OKVIRU RAZLIČITIH GEOHEMIJSKIH SREDINA**

## **III METODE**

### **4. METODE ISTRAŽIVANJA**

- 4.1. Uzorkovanje podzemnih voda i laboratorijske metode
- 4.2. Problematika granice detekcije analitičkih metoda: sistematizacija i priprema hidrohemijjskih podataka za statističku analizu
- 4.3. Hidrohemijjsko modeliranje
- 4.4. Statističke metode

## **IV REZULTATI I DISKUSIJA**

### **5. REZULTATI HIDROHEMIJSKE ANALIZE PODZEMNIH VODA**

- 5.1. Modeliranje koncentracija ispod granice detekcije
  - 5.1.1. Modeliranje nedetektovanih koncentracija U i Th u podzemnim vodama
  - 5.1.2. Modeliranje rezultata gamaspektrometrijskih merenja
- 5.2. Osnovni hemijski sastav podzemnih voda i hidrogeohemijski procesi
- 5.3. Karakterizacija hidrohemijjskih osobina podzemnih voda prema različitim geohemijskim sredinama
- 5.4. Prostorna distribucija koncentracija U, Th i K na području istraživanja
- 5.5. Radioaktivnost podzemnih voda sa aspekta kvaliteta vode za piće

### **6. SPECIJACIJA PRIRODNIH RADIOAKTIVNIH ELEMENATA U PODZEMNIM VODAMA**

- 6.1. Uticaj pH i Eh parametara na migraciju U, Th i K u podzemnim vodama
- 6.2. Ravnotežno stanje podzemnih voda na osnovu indeksa zasićenja minerala

### **7. STATISTIČKA ANALIZA**

- 7.1. Osnovna statistička analiza
- 7.2. Određivanje background koncentracija i ekstremnih vrednosti U, Th i K
- 7.3. Korelaciona analiza svih razmatranih promenljivih

### **8. TESTIRANJE STATISTIČKIH HIPOTEZA**

- 8.1. Analiza varijanse primenom Mann-Whitney testa
  - 8.1.1. Analiza varijanse u odnosu na grupnu varijablu U 75 %
  - 8.1.2. Analiza varijanse u odnosu na grupnu varijablu Th 75 %
  - 8.1.3. Analiza varijanse u odnosu na grupne varijable K 75% i K 50%

8.2. Analiza varijanse primenom Kruskal-Wallis testa

8.2.1. Analiza varijanse hidrohemijskih tipova podzemnih voda

8.2.2. Analiza varijanse podzemnih voda izdvojenih geohemijskih sredina

## 9. ROC ANALIZA

9.1. ROC analiza uticaja izdvojenih promenljivih na pojavu povišenih koncentracija U u podzemnim vodama

9.2. ROC analiza uticaja izdvojenih promenljivih na pojavu povišenih koncentracija Th u podzemnim vodama

9.3. ROC analiza uticaja izdvojenih promenljivih na pojavu povišenih koncentracija K u podzemnim vodama

## 10. LOGISTIČKI MODEL

10.1. Univarijantna logistička regresiona analiza

10.2. Multivarijantni logistički model utvrđivanja povišenih koncentracija U, Th i K u podzemnim vodama

## V ZAKLJUČAK

### 2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U prvom poglavlju prikazani su: predmet istraživanja doktorske disertacije, osnovni ciljevi doktorske disertacije sa navedenim naučno-istraživačkim aktivnostima sprovedenim u cilju rešavanja problematike disertacije i očekivanim naučnim doprinosom. Prvo poglavlje je obuhvatilo i pregled prethodnih istraživanja i teorijskih postavki na osnovu kojih su zasnovane hipoteze doktorske disertacije. Korišćena je literatura domaćih i stranih autora u cilju objašnjenja porekla prirodne radioaktivnosti podzemnih voda, objašnjenja hidrogeohemijskih karakteristika prirodnih radioaktivnih elemenata (U, Th i K) i njihovih hidrogeohemijskih ciklusa. Poseban aspekt ovog poglavlja je fokusiran na razmatranje formiranja hemijskog sastava podzemnih voda u regionalnim hidrogeološkim sistemima, i to u basenskim strukturama i dubokim rasednim zonama u kojima je formiran najveći broj pojava podzemnih voda koje su bile predmet proučavanja disertacije.

Drugo poglavlje doktorske disertacije obuhvata prikaz 155 lokacija podzemnih voda u kojima su vršena hidrohemijska ispitivanja. Kako se radi o nehomogenoj distribuciji uzorkovanih podzemnih voda na teritoriji Srbije, a u cilju definisanja uticaja geološke sredine na hidrohemijske osobine podzemnih voda, izvršeno je grupisanje pojava podzemnih voda u sledeće lito-geohemijske oblasti: Zona gornjokrednog magmatizma istočne Srbije; Oligocensko-miocenski plutonsko-vulkanski pojas, Intrakontinentalni tercijarni baseni, Ofiolitski pojas, Obodna zona Panonskog basena, Panonski basen.

Pored navedenih sredina, izdvojena su dva područja podzemnih voda vezanih za usko istažno područje, a koja nisu obuhvaćena prethodnom podelom: granitoid Plavne (karbonska starost) i granitoid Bujanovca (permo-trijaska starost).

Za svako od izdvojenih područja izvršena je šematizacija, odnosno grafički prikaz formiranja podzemnih voda ili rasprostranjenja litoloških sredina od interesa, kako bi se izvršila karakterizacija hidrogeohemijskih uslova koji vladaju u svakoj od zona.

Treće poglavlje obuhvata pregled metodologije istraživanja, koja se sastoji od prikaza terenskih i laboratorijskih metoda tokom procesa prikupljanja i analiziranja podataka, kao i statističkih metoda i hidrohemijskog modeliranja primenjenih prilikom obrade rezultata. Tokom naučno-istraživačkog rada težnja je bila usmerena na definisanje hidrogeohemijskih faktora koji utiču na distribuciju prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama, a primenjena metodologija predstavlja originalni naučni pristup kandidata.

U okviru primenjene metodologije detaljno su opisani terenski postupci izvršeni prilikom uzorkovanja podzemnih voda i određivanja fizičko-hemijskih parametara *in-situ*, kao i primenjene laboratorijske metode za određivanje hemijskog sastava podzemnih voda. Rezultati hemijskih analiza su u određenim uzorcima prikazani kao vrednosti ispod granice detekcije instrumenta: <GD (manje od granice detekcije), što je uslovalo primenu odgovarajućih metoda modeliranja takvih vrednosti. Problematika granice detekcije analitičkih metoda i sistematizacija i priprema hidrohemijških podataka za statističku analizu, kao i celokupan postupak neparametarskih statističkih metoda, detaljno su prikazani u okviru istog poglavlja.

Četvrto poglavlje doktorske disertacije obuhvatilo je predstavljanje rezultata sa diskusijom. Za obradu podataka i grafičko predstavljanje rezultata korišćeni su softverski paketi ArcGIS, GWB, ProUCL, kao i standardni softverski paketi za statističku analizu. Izvršena je detaljna analiza fizičko-hemijskih osobina podzemnih voda, kojom su definisani osnovni procesi koji utiču na formiranje hemijskog sastava podzemnih voda.

Metodologija statističke analize bila je usmerena na određivanje parametara koji imaju uticaja na distribuciju prirodnih radioaktivnih elemenata, odnosno na pojavu povišenih koncentracija U, Th i K, u cilju definisanja hidrogeohemijskog faktora. Za utvrđivanje varijabilnosti ispitivanih hidrohemijških parametara primenjena je deskriptivna statistička analiza i odgovarajući testovi za



proveru distribucije u okviru seta uzorka. Pored osnovne statističke analize, primenjene su grafičke metode (konstruisani su q-q dijagrami i box-plot dijagrami), dok je ProUCL softver primenjen usled prisustva rezultata sa vrednostima ispod granice detekcije instrumenta.

Određivanje prirodnih (*background*) koncentracija prirodnih radioaktivnih elemenata sprovedno je kako bi se izdvojile hidrohemijske anomalije. Primenom neparametarskih testova izdvojene su različite lito-geochemijske sredine i tipovi podzemnih voda u kojima dolazi do pojave povišenih koncentracijam prirodnih radioaktivnih elemenata. Dok su pomoću ROC analize i logističke regresione analize precizno definisani uslovi i izdvojeni značajni parametri koji utiču na distribuciju urana, torijuma i kalijuma u ispitivanim podzemnim vodama.

U petom poglavlju su izneta zaključna razmatranja doktorske disertacije u kome se taksativno navode pojedinačni zaoključci sa iznetim predlozima za mogućnost nastavka istraživanja.

### **3. OCENA DISERTACIJE**

#### **3.1. Savremenost i originalnost**

Doktorska disertacija „Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije“ doktorandkinje Marine Ćuk, ima savremen pristup problematici istraživanja u užoj naučnoj oblasti Hidrogeologije i predstavlja originalno naučno delo. Sprovedena hidrogeohemijska analiza podzemnih voda u sprezi sa neparametarskim statističkim metodama i hidrogeohemijskim modeliranjem je prvi put na ovakav način primenjena u istraživanju podzemnih voda Srbije. Važno je istaći da su na pojedinim lokacijama podzemnih voda po prvi put određeni sadržaji prirodnih radioaktivnih elemenata, a rezultati savremenih laboratorijskih metoda (ICP MS - HR) omogućili su precizno uspostavljanje osnovnih vrednosti koncentracija. Modeliranje vrednosti ispod granice detekcije instrumenta, obrada rezultata neparametarskim statističkim metodama, izrada logističkog regresionog modela i primena hidrohemijuskog modeliranja predstavljaju jedan celovit sistem koji se može primenjivati pri hidrogeohemijskim istraživanjima na različitim regionalnim područjima. S obzirom na povezivanje hidrohemijuskih osobina podzemnih voda i lito-geochemijskih sredina sa logističkom regresijom, ovako multidisciplinarni karakter doktorske disertacije može se smatrati jednim od njenih najvažnijih originalnih aspekata.

### **3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu**

U toku izrade doktorske disertacije detaljno su pregledani i korišćeni literaturni izvori što je rezultiralo spiskom od 185 navedenih publikacija. Pregled literature studiozno je realizovan i na osnovu njega moguće je sagledati aktuelno stanje u oblastima koje su bile predmet doktorske disertacije. Veći deo literature čine strani radovi koji tretiraju geohemijske i hidrogeohemijske osobine razmatranih podzemnih voda, kao i teorijske postavke primenjenih statističkih metoda, metoda hemijske termodinamike i hidrohemijškog modeliranja. Spisak literature sadrži i naučne radove u čijoj izradi je učestvovala i doktorandkinja, a koji su na određeni način verifikovali primenjene naučne metode u disertaciji kod međunarodne i domaće naučne i stručne javnosti.

### **3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda**

Metodologija istraživanja primenjena u disertaciji bazirana je na teorijskim razmatranjima hidrogeohemijskih osobina prirodnih radioaktivnih elemenata i na definisanju uslova koji utiču na migraciju razmatranih elemenata u podzemnim vodama. Utvrđivanjem fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda sa ocenom njihovog uticaja na distribuciju U, Th i K, i izdvajanjem pogodnih geoloških (lito-geohemijskih) sredina, definisani su uslovi u kojima se pojavljuju povišene koncentracije navedenih elemenata u podzemnim vodama.

U fazi obrade i interpretacije rezultata sprovedenog hidrogeohemijskog istraživanja primenjen je niz različitih metoda. Neujednačena prostorna distribucija pojava podzemnih voda uslovia je složenost ispitivanja porekla hemijskog sastava podzemnih voda, pri čemu je grupisanje pojava sa hidrogeološkog aspekta, predstavljalo jedan od veoma važnih koraka u sprovođenju istraživanja.

Savremene laboratorijske metode primenjene su pri određivanju koncentracija U i Th u podzemnim vodama (ActLabs – Kanada: HR-ICP/MS), ukupna  $\alpha$  i  $\beta$  – aktivnost i koncentracije aktivnosti radionuklida  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  su određene u Institutu za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“ i u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“. Međutim u određenom broju uzoraka su dobijene vrednosti ispod granice detekcije (GD) instrumenta. U samom radu su predstavljene različite metode modeliranja ovakvih vrednosti: metode jednostavne zamene cenzurisane vrednosti granicom detekcije i ROS metodama u zavisnosti od distribucije detektovanog niza podataka (za normalne raspodele, gama raspodele i lognormalne raspodele). Pošto je ustanovljeno da je detektovani set podataka najbliži postizanju lognormalne raspodele, kao adekvatan postupak modeliranja cenzurisanih vrednosti izdvojila se lognormalna ROS

metoda. Ograničenja analitičkih metoda su uslovila pojavu vrednosti ispod granice detekcije instrumenta prilikom određivanja ukupne  $\alpha$  i  $\beta$  aktivnost, kao i koncentracija aktivnosti radionuklida  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$ . Procentualna zastupljenost nedetektovanih podataka je bila manja od 80 %, što je predstavljalo preduslov za modeliranje nedetektovanih vrednosti ROS metodom.

Hidrohemijska analiza podzemnih voda je obuhvatila standardne grafičke metode (Piperov dijagram i dijagrame jonskih odnosa) kako bi se definisali osnovni hidrohemijski procesi koji utiču na formiranje hemijskog sastava podzemnih voda. Nakon definisanja osnovnih procesa, izvršena je karakterizacija hidrohemijskih osobina podzemnih voda prema izdvojenim lito-geochemijskim sredinama. ArcGIS softver i osnovne statističke metode su primenjeni u cilju definisanja prostorne distribucije koncentracija prirodnih radioaktivnih elemenata.

Kako se radi o elementima koje odlikuju radioaktivne osobine, izvršen je proračun godišnjih efektivnih doza koji se ostvaruje unosom flaširanih voda, na osnovu standarda Svetske zdravstvene organizacije. Proračun tolerantne koncentracije radionuklida u vodi za piće je zasnovan na određivanju ukupne količine radionuklida unetih u organizam u toku jedne godine, pri konzumiranju određenih količina vode dnevno, a uzimajući u obzir faktore konverzije doza iz pravilnika ICRP 2012 (*ICRP 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41: 1 – 130.*) i WHO 2011 (*WHO 2011. Guidelines for Drinking– water Quality. 4th ed. World Health Organization, Geneva.*).

Hidrohemijsko modeliranje je obuhvatilo specijaciju prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama i određivanje indeksa zasićenja minerala, u cilju bližeg definisanja hidrohemijskih osobina navedenih elemenata. Hidrohemijsko modeliranje sprovedeno je na rezultatima hemijskih analiza podzemnih voda primenjujući GWB softverski paket (*The Geochemist's Workbench*). GWB primenjuje termodinamičku bazu podataka razvijenu za USGS-ov PhreeqC, koja sadrži konstantne vrednosti za jonske i molekulske oblike i proizvode rastvorljivosti minerala.

Sprovedene statističke metode u sprezi sa hidrohemijskom interpretacijom podataka su predstavljale efikasan metodološki pristup istraživanja kvalitativnih osobina podzemnih voda. Za utvrđivanje osnovnih karakteristika promenljivih primenjena je deskriptivna statistička analiza, koja je obuhvatila određivanje mera centralne tendencije (aritmetička sredina, medijana, opseg, minimum i maksimum) i disperzije (standardna devijacija, varijansa, *skew* i *kurtosis*)

hidrohemijskih parametara (pH, Eh, T, Ca, Mg, Na, K, Si, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, U, Th,  $\alpha$  aktivnost,  $\beta$  aktivnost, <sup>40</sup>K). Za utvrđivanje distribucija ispitivanih varijabli primenjeni su: Kolmogorov-Smirnov i Shapiro-Wilk-ov test, pri čemu su konstruisani Q-Q dijagrami kako bi se grafički interpretirale distribucije hidrohemijskih varijabli. Korelaciona analiza svih varijabli izvršena je Spearman-ovom neparametarskom korelacijom. Ova analiza je obuhvatila utvrđivanje relacija fizičko-hemijskih parametara (pH, Eh, T), osnovnog sastava podzemnih voda (Ca, Mg, Na, K, Si, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> i Cl), ukupne  $\alpha$  i  $\beta$  aktivnosti sa koncentracijama U, Th i K. U cilju testiranja značajnosti statističkih razlika posmatranih hidrohemijskih parametara u odnosu na grupne varijable primenjeni su Mann-Whitney test (M-W) i neparametarska Kruskal-Wallis analiza varijanse (K-W). Poslednji korak u celokupnoj statističkoj analizi predstavljao je izradu prediktivnog statističkog modela za procenu verovatnoće pojavljivanja povišenih koncentracija U, Th i K upodzemnim vodama, primenom ROC analize (engl. *Receiver Operating Characteristic*) i logističke regresione analize (univarijantna i multivarijantna analiza).

### **3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata**

Važnost sprovedene metodologije ogleda se u mogućnosti njene šire primene na različite probleme u geološkim (geohemijskim) i hidrogeološkim istraživanjima, pri čemu bi jedan od aspekata mogao da obuhvati istraživanja hidrogeologije ležišta mineralnih sirovina na osnovu određenih anomalnih koncentracija elemenata u podzemnim vodama. Uspešno primenjenu metodologiju neparametarskih statističkih metoda, moguće je primeniti i prilikom rešavanja različitih multidisciplinarnih istraživanja sa krajnjim ciljem uspostavljanja logističkih regresionih modela. Primenom logističke regresione analize uspostavljeni su jednostavni modeli za predviđanje povišenih koncentracija U, Th i K (iznad izdvojenih graničnih vrednosti) u odnosu na značajne hidrogeohemijske prediktore. Na ovaj način se uprošćavaju komplikovani mehanizmi, što može da se primenjuje i na slične probleme u hidrogeologiji prilikom procenjivanja uticaja različitih faktora na određenu pojavu. Pored navedenog, moguće je primeniti i posebne metodološke delove, kao npr. modeliranje nedetektovanih vrednosti rezultata hemijskih analiza i proračun efektivnih doza na različitim uzorcima vode za piće.

### 3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidatkinja, Marina Ćuk, master ing. geologije, je tokom izrade disertacije u potpunosti ovladla metodologijom naučno-istraživačkog rada. Sposobna je za samostalni naučni rad što je pokazano realizacijom planiranog istraživanja od početne ideje do završetka doktorske disertacije, koje je izvedeno u redovnom roku doktorskih akademskih studija. Tokom istog perioda, kandidatkinja je objavila veći broj naučnih i stručnih radova u oblasti Hidrogeologije kao prvi autor i kao koautor.

## 4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

### 4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Primenom naučnih metoda opisanih u prethodnom delu teksta očekuje se bitan napredak i postizanje sistematičnosti naučnog saznanja u oblasti hidrogeohemije, s obzirom na to da primena neparametarskih statističkih metoda i izrada modela nalaze sve veću primenu u naučnim istraživanjima. Izrada doktorske disertacije ima svojevrsan doprinos u uvođenju ROC analize i logističke regresione analize u oblast hidrogeologije.

Izrada ove doktorske disertacije dala je doprinos prilikom definisanja hidrogeohemijskih faktora koji utiču na distribuciju prirodnih radioaktivnih elemenata u vodama. Kako bi se realizovalo navedeni osnovi cilj, ostvareni su pojedinačni naučni doprinosi:

- Definisane su osnovne koncentracije (engl. *background values* - BV) prirodnih radioaktivnih elemenata (U, Th i K) u podzemnim vodama Srbije, pri čemu su posebno izvojene potencijalne hidrohemijske anomalije. Na pojedinim lokacijama podzemnih voda po prvi put su određene radioaktivne osobine podzemnih voda.
- Izdvojeni su jonski i kompleksni oblici U, Th i K koji se javljaju u podzemnim vodama i određeni su indeksi zasićenja minerala primenom metoda hidrohemijskog modeliranja.
- Izvršena je karakterizacija hidrohemijskih osobina podzemnih voda prema izdvojenim geohemijskim sredinama.
- Ispitan je uticaj fizičko-hemijskih parametara podzemnih voda na distribuciju U, Th i K i izdvojeni su hidrohemijski tipovi podzemnih voda u kojima se javljaju povišene koncentracije navedenih elemenata, i na taj način izvršeno je definisanje hidrohemijskih

uslova u kojima se javljaju povišene koncentracije navedenih elemenata u podzemnim vodama.

- Izdvojene su lito-geohemijske sredine u kojima su formirane podzemne vode sa povišenim koncentracijama prirodnih radioaktivnih elemenata.
- Uspostavljen je logistički model na osnovu prethodno definisanih hidrogeohemijskih faktora, koji omogućava predikciju povišenih koncentracija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama.
- Imajući u vidu radioaktivne osobine ispitivanih elemenata, izvršen je proračun godišnjih efektivnih doza unosom flaširanih voda, na osnovu primene standarda Svetske zdravstvene organizacije.

#### **4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja**

Prilikom istraživanja, a u sklopu ovog doktorskog rada korišćene su najsavremenije naučne metode i softverski paketi, kao i rezultati aparatura visokog nivoa preciznosti. Uprkos tome, u rezultatima laboratorijskih analiza prisutan je određen procenat vrednosti ispod granice detekcije instrumenta (tzv. cenzurisane vrednosti). U rezultatima gamaspektrometrijskih merenja zastupljen je značajan broj nedetektovanih (cenzurisanih) vrednosti, što je otežalo interpretaciju rezultata, pa su shodno tome masene koncentracije U, Th i K predstavljale osnovni set podataka za definisanje radioaktivnih osobina podzemnih voda. Kandidatkinja je u svom radu uspešno prevazišla navedeni problem i kroz posebno poglavlje predstavila problematiku granice detekcije instrumenata, primenivši ProUCL softver koji je našao veliku primenu u analiziranju hemijskog sastava voda, razvijen od strane Agencije za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Država (*engl. Environmental Protection Agency-US EPA*). Prilikom definisanja hidrohemijskih faktora sa uticajem na distribuciju ispitivanih elemenata, moguće je očekivati određena odstupanja upravo usled prisustva velikog broja nedetektovanih vrednosti u navedenim setovima podataka.

Takođe, sa povećanjem broja uzoraka podzemnih voda, očekuje se povećanje preciznosti modela, što je navedeno u zaključnim razmatranjima doktorske disertacije.

Struktura samog rada je pregledna, razumljiva i logična. Dijagrami i slike su na adekvatnim mestima u tekstu i jasno su obeleženi, a literatura je navođena korektno i uniformnim stilom.

### 4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Naučni doprinos doktorske disertacije „Hidrogeohemija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama Srbije“ kandidatkinje Marine Ćuk, verifikovan je sledećim publikacijama koje su rezultat primenjenih naučnih metoda u istraživanjima u toku izrade doktorske disertacije:

M23 (Rad u međunarodnom časopisu):

1. Ćuk M, Todorović M, Šišović J, Štrbački J, Andrijašević J, Papić P. 2016. Hydrogeochemical approach to estimate the quality of bottled waters in Serbia; Hem. Ind. 70 (3) 347–358. doi: 10.2298/HEMIND150325042C
2. Kovačević J, Todorović M, Ćuk M, Papić P. 2016. Geochemical study of U, Th and REE mineralizations in Jurassic sediments and hydrochemical characterization of groundwaters in Eastern Serbia – Case study: Plavna area. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences 11(2): 463 – 474

Rad u vidu poglavlja u knjizi M11, odnosno kao rad u tematskom zborniku vodećeg međunarodnog značaja:

1. Ćuk M, Todorović M, Papić P, Kovačević J, Nikić Z. 2015. Hydrogeochemistry of Uranium in the Groundwaters of Serbia. In: Merkel B., Arab A. (eds) Uranium - Past and Future Challenges. Springer, Cham, pp 769-776 DOI: 10.1007/978-3-319-11059-2\_89
2. Todorović M, Štrbački J, Ćuk M, Andrijašević J, Šišović J, Papić P. 2015. Mineral and Thermal Waters of Serbia: Multivariate Statistical Approach to Hydrochemical Characterization. In: Papić P- (ed). Mineral and Thermal Waters of Southeastern Europe. Part of the series Environmental Earth Sciences, Springer. pp 81-95

Rad u časopisu međunarodnog značaja verifikovanog posebnom odlukom (M24):

1. Ćuk M, Papić P, Stojković J. 2013. Natural radioactivity of groundwater in Serbia, Annales géologiques de la Péninsule Balkanique 74: 63–70. DOI: 10.2298/GABP1374063C

Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini (M63):

1. **Ćuk M, Papić P, Jemcov I.** 2016. Primena neparametarskih statističkih metoda na primeru radioaktivnih osobina podzemnih voda. XV srpski simpozijum o hidrogeologiji. Zbornik radova 333 -339; Rudarsko-geološki fakultet, Beograd; ISBN 978-86-7352-316-3

## **5. ZAKLJUČAK I PREDLOG**

Kandidatkinja Marina Ćuk, master ing. geologije zaposlena je na Departmanu za hidrogeologiju Rudarsko-geološkog fakulteta sa zvanjem istraživač-saradnik. U periodu od upisa na doktorske akademske studije do danas objavila je ukupno 24 rada koji su prošli naučnu verifikaciju, od kojih se 6 radova odnosi na uvođenje i primenu naučnih metoda predstavljenih u doktorskoj disertaciji, pri čemu su dva rada publikovana u naučnim časopisima međunarodnog značaja (kategorije „M23“). Doktorska disertacija kandidatkinje Marine Ćuk pod nazivom „Hidrogeohemija prirodnih radiokativnih elemenata u podzemnim vodama Srbije“ predstavlja savremen pristup problematici istraživanja u užoj naučnoj oblasti Hidrogeologije i predstavlja originalno naučno delo. Na osnovu prikazanih rezultata i njihove analize, može se konstatovati da je kandidatkinja ostvarila u potpunosti ciljeve i hipoteze koji su postavljeni u doktorskoj disertaciji. U izradi doktorske disertacije, primenjene su savremene metode koje se koriste u hidrogeologiji kao što je hidrohemijska analiza kvalitativnih osobina i u geostatistici – analiza prostorne distribucije podataka sa neparametarskim statističkim metodama. Celokupna sprovedena metodologija rezultirala je izradom logističkih regresionih modela, kojima se naglašava neophodnost savremenog i sistematskog pristupa prilikom rešavanja hidrogeohemijskih problema. Izrađena doktorska disertacija predstavlja doprinos u definisanju prirodnih koncentracija prirodnih radioaktivnih elemenata u podzemnim vodama, i definisanju hidrogeohemijskih uslova koji utiču na distribuciju navedenih elemenata u podzemnim vodama. Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije zaključuje da je urađena doktorska disertacija kandidatkinje Marine Ćuk napisana prema svim standardima o naučno-istraživačkom radu, kao i da ispunjava sve uslove predviđene Zakonom o visokom obrazovanju, Standardima za akreditaciju, Statutom Rudarsko-geološkog fakulteta i kriterijumima koje je propisao Univerzitet u Beogradu. Na osnovu iznesenih činjenica, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u