



Нела Вујовић¹, Јелена Зарић², Ненад Николић³
Срђан Станковић⁴, Марија Штуловић⁵
Драгана Радовановић⁶, Гвозден Јовановић⁷

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VIK25067V

ДИСТРИБУЦИЈА ГВОЖЂА У БУШОТИНИ РБ-6/П 5Д И ЗНАЧАЈ ИНТЕГРИСАНОГ ИСТРАЖИВАЊА У ВОДОСНАБДЕВАЊУ

Резиме: Велики проблем водоснабдевања јесте процес старења водозахватних објеката, као последица колмирања и корозије, који се дешава услед великог броја фактора на терену. Широк спектар фактора и озбиљан проблем захтевају мултидисциплинаран приступ у истраживању. Овај рад обухвата утврђивање садржаја гвожђа у издвојеним литостратиграфским јединицама као и дистрибуцију садржаја гвожђа по литолошком стубу, нарочито у делу издани, као потенцијалног извора гвожђа и узрочника стварања колматација на филтру бунара, и предлог могућих даљих активности на дефинисању механизма транспорта гвожђа из примарне литолошке средине, као и механизма депоновања минерала гвожђа на филтерској конструкцији.
Кључне речи: извориште, колмирање, синергија, заштита

IRON DISTRIBUTION IN BOREHOLE RB-6/P 5D AND THE IMPORTANCE OF INTEGRATED RESEARCH IN WATER SUPPLY

Abstract: One key challenge in water supply systems is the aging of groundwater wells, due to clogging and corrosion, driven by complex site conditions which require a multidisciplinary approach. This paper focuses on determining the content of iron in lithostratigraphic units, and its distribution along the lithological profile, particularly in aquifers, as a potential source of iron and the causative agent for the clogging on the well screen. This paper also indicates on the activities on the definition of mechanism of transport of iron from primary lithological medium and the processes by which iron minerals are deposited onto the filter structure.

Key words: iron content, colmatation, bacteria, integrated research

¹ *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, n.petro-nijevic@itnms.ac.rs, ORCID: 0009-0004-7451-8897*

² *Рударски институт, Београд, jelena.zaric@ribeograd.ac.rs, ORCID: 0000-0003-2066-2418*

³ *Институт за мултидисциплинарна истраживања, nnikolic@imsi.bg.ac.rs, ORCID 0000-0002-5730-7391*

⁴ *Универзитет у Београду, Биолошки факултет, Београд, srdjan.stankovic@bio.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-2034-456X*

⁵ *Универзитет у Београду, Технолошко-металурички факултет, Иновациони центар Технолошко-металуричког факултета, Београд, mstulovic@tmf.bg.ac.rs; ORCID: 0000-0002-7647-999X,*

⁶ *Универзитет у Београду, Технолошко-металурички факултет, Иновациони центар Технолошко-металуричког факултета, Београд, divsic@tmf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-2935-7711,*

⁷ *Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, g.jovanovic@itnms.ac.rs, ORCID 0000-0002-9754-2230*



1. Увод

Водоснабдевање градова квалитетном пијаћом водом сваким даном постаје све сложеније и актуелније. Услед повећаног броја становника, интензивнијих периода суша и повећаних захтева пољопривреде, као и пораста великих потрошача попут индустрије, расте и потрошња воде по становнику. За многе градове, међу њима и за Београд, главни извор воде су још увек подземне воде. На београдском изворишту каптирају се подземне воде из издани формиране у оквиру алувијалних наслага реке Саве и слојева плеистоценске старости [1], формираних од бујичних токова отопљених ледника [2]. Током експлоатације бунара долази до смањења издашности бунара услед старења бунара, као последица корозије и/или колматације. Проблем корозије се може решити уградњом материјала отпорних на корозију али процес колматације је доста сложенији и може, осим филтерске конструкције, да се прошири и на прифилтерску зону водоносне средине [3].

Опадање издашности бунара се дешава услед комбинованих хидрогеолошких, хидролошких, хидрауличких фактора, као и физичко-хемијских, механичких и биолошких процеса који се одигравају у издани. Интеракцијом наведених чинилаца долази до формирања колматација, које запушавају отворе на филтерским конструкцијама, чиме се смањује издашност бунара. На београдском изворишту спроведена су опсежна истраживања проблема старења бунара и оно што је заједничко за сва истраживања јесте регистровано присуство садржаја гвожђа у бунарима са колмираним филтерима [4]. Идеја овог рада јесте да се услед великог броја различитих фактора који утичу на проблем старења бунара, укаже на значај мултидисциплинарног приступа у испитивању овог проблема.

Наиме, решавање питања смањења издашности бунара захтева сарадњу више научних и стручних дисциплина. Хидрогеолози се примарно баве капацитетом изворишта, пројектовањем и мониторингом ефеката експлоатације, заштитом подземних вода од прекомерног коришћења и загађења. Биолози анализирају утицај бактерија на стварање биофилмова и наслага у зони филтера, чије је присуство и доказано претходним истраживањима [5]. Са друге стране, инжењери технологије ову проблематику сагледавају кроз дефинисање механизма депоновања минерала гвожђа и услове који доприносе таложeњу чврстих материја на филтерској конструкцији, а такође геохемичари спроводе симулације геохемијских процеса у циљу разумевања механизма депоновања гвожђа у воденој средини издани. А свима је заједнички циљ очувања ресурса одговарајућег квалитета и квантитета за будуће генерације. Управо та синергија знања из више области је кључна за разумевање и ефикасно управљање процесима који доводе до колматације и старења бунара.

Истраживање у предметном раду је започето прегледом литературе и конципирањем истраживања. Претходно спроведеним истраживањима је утврђено одређивање садржаја гвожђа у издвојеним литостратиграфским јединицама као и дистрибуција садржаја гвожђа по вертикалном профилу, нарочито у делу издани, као потенцијалног извора гвожђа и узрочника стварања колматација на филтру бунара, на основу чега су конципирана даља истраживања и активности предложене у тексту. Предложене су активности дефинисања механизма транспорта гвожђа из примарне



литолошке средине, као и механизма депоновања гвожђа односно минерала гвожђа на филтерској конструкцији.

2. Методе

Истраживање хидрогеолошких услова београдског изворишта је започето под руководством професора Милана Димкића, чији допринос у овој области остаје од великог значаја. Објављено је више научних радова на међународном нивоу који се баве анализом локалних хидрауличких губитака, као и везом између хидрохемијских и микробиолошких услова у зони бунара и пораста хидрауличких отпора [6-8]. Посебно се истиче публикација из 2011. године [6], у којем је предложена методологија за одређивање критичних улазних брзина протока на основу гранулометријског састава средине, вредности редокс-потенцијала, концентрације укупног и раствореног гвожђа, као и броја активних бактеријских ћелија способних да доведу до колматације.

Истраживања улога бактерија у циклусима кружења гвожђа и мангана у природи датирају још од почетка 20. века. Један од првих који се бавио гвожђевитим бактеријама био је Elis [9], затим Colmer и сар. [10], док је Harder [11], проучавао зависност између бактерија које депонују гвожђе и геолошке средине. Проблеми берлинског водовода и компирања бунара, су представљени у раду Hesselbarth и Ludemann-а док је Бабић [12], упоредио те налазе са проблемима на београдском изворишту.

Истраживачи Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина (ИТНМС) и сарадници из Иновационог центра Технолошко-металуршког факултета и Института за мултидисциплинарна истраживања, су такође спроводили истраживања везана за популацију гвожђевитих и манганских бактерија у изданским водама београдског изворишта [13] као и истраживања везана за кинетику таложења гвожђевитих јона [14], [15]. У кабинетским условима извршена је анализа и синтеза претходних резултата. Такође је спроведена и рачунарска симулација на основу расположивих података из литературе, како би се потврдиле претпоставке везане за ове компликоване услове на терену и добиле смернице за даља испитивања. За потребе ранијих истраживања урађено је више истражних бушотина, од којих је бушотина Rb-6/P-5d одабрана за даља детаљна истраживања. Ова бушотина је урађена у зони дренажа бунара са хоризонталним дренажима (рени бунара) на београдском изворишту.

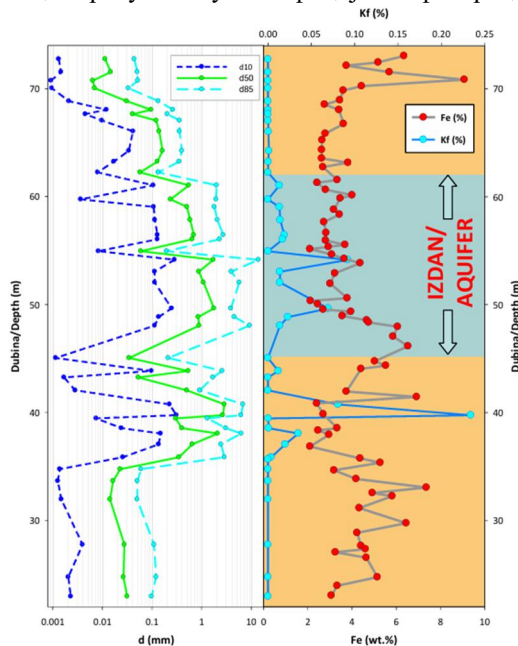
Током бушења урађено је континуирано узорковање, а затим картирање језгра бушотине Rb-6/P-5d. На основу састава седимента као и боје, селектовани су репрезентативни узорци из свих литолошки специфичних интервала и извршено је узорковање за одређивање гранулометријског састава и класификацију кластичних седимената селектованих узорака. Након одабира репрезентативних узорака урађена је припрема за анализу портабилним XRF уређајем. Потребно је напоменути да је боја узета и као потенцијални индикатор за садржај гвожђа, што је касније и потврђено. На основу ових резултата, хемијских анализа подземне воде из ове бушотине, настављено је са кабинетским радом и симулацијом могућих процеса.

Истраживачки тим је, на основу добијених резултата о садржају гвожђа и мангана [4, 13, 16], као и параметара Eh/pH и температуре, спровео моделирање у софтверу

PHREEQC (верзија 2.0), у циљу симулације услова и процеса таложења у зони филтера. PHREEQC је софтверски алат намењен симулацији геохемијских процеса, као што су растварање и депоновање минерала минерала као и моделовање транспорта метала у геолошкој средини. Софтвер иначе није намењен за моделовање утицаја бактерија у формирању минералних фаза, механизам и кинетику реакција. Базиран је на моделовању јонских равнотежа у воденој средини и омогућава бројне калкулације, укључујући: формирање хемијских једињења, услова таложења односно индекса засићења (SI)[17].

3. Резултати

На основу картирања језгра бушотине Rb-6/P-5d, израђен је прелиминарни литолошки профил наслага у близини рени бунара. Све издвојене литостратиграфске јединице подвргнуте су гранулометријској анализи, којом је утврђена величина и дистрибуција величине зрна, што је послужило за класификацију кластичних седимената и израду литолошког стуба (слика 1). На одабраним, уситњеним узорцима одређен је и садржај гвожђа, који је затим приказан као дистрибуција по дубини у односу на теренску коту (слика 1б). Поред тога, на основу гранулометријских података, за све јединице израчунати су и коефицијенти филтрације (слика 1б).



Слика 1. а) Дистрибуција величине зрна у седиментима у литолошком стубу на локацији бушотине Рб-6/П-5д, б) Садржај гвожђа и израчунати коефицијенти филтрације у седиментима у литолошком стубу [4]

Figure 1. a) Grain size distribution in sediments in stratigraphic column at well site Rb-6/P-5d, b) Fe contents and calculated filtration coefficients in stratigraphic column [4]



Резултати симулације на основу хемијских анализа из истражне бушотине Rb-6/P-5d приказани су у оквиру табеле 1. Софтверском анализом симулирани су утицај промене оксидо-редукционих услова на депоновање минерала, нарочито асоцијацију минерала гвожђа на основу доступних података хемијских анализа воде за бушотину Rb-6/P-5d. Иницијално симулација је рађена за теренски мерену вредност редокс потенцијала Eh од 115 mV, али је у обзир узета и могућност повећања потенцијала услед интеракције узорковане воде са кисеоником из атмосфере током узорковања.

Табела 1. Резултати симулације PHREEQC софтвера
Table 1. PHREEQC software simulation results

Element	Mineral	Eh	60	90	115
		Formula	Индекс zasiћења		
Ca	Kalcit	CaCO ₃	0.77	0.75	0.73
SiO ₂	Kalcedon	SiO ₂	0.37	0.37	0.37
Fe	Fe(OH) ₃	Fe(OH) ₃	0.68	1	1.18
	Getit	FeOOH	5.95	6.28	6.46
	Hematit	Fe ₂ O ₃	12.85	13.5	13.5
	Siderit	FeCO ₃	0.49	0.49	0.33
Ni	Ni ₂ SiO ₄	Ni ₂ SiO ₄	4.93	4.93	4.84

Стога је извршена и анализа при нижим вредностима Eh (до 60 mV) као потенцијално најнижа за средине као што су издани, како би се испитала стабилност и услови таложења минералних фаза, пре свега гетита и ферихидроксида. Резултати модела показали су да се гетит и ферихидрит таложе у целом распону испитиваних вредности Eh, од 60 до 115 mV, са индексом zasiћења у опсегу од 0,7 до 1,2. То указује да би услови за њихово таложење били остварљиви и при нижим вредностима редокс потенцијала.

Вредност од 60 mV, коју смо симулирали као доњу границу, приближно одговара просечним условима у киселим рудничким водама. Стога се може закључити да је процес таложења гетита у великој мери независан од промена Eh у овом опсегу. Међутим, како софтвер не узима у обзир биохемијске утицаје, додатни допринос бактерија у процесу преципитације гвожђа није укључен у модел. Постоји могућност да је у стварности присутна и компонента биолошке оксидације, те би будућа истраживања требало усмерити ка прецизнијем раздвајању геохемијских и биохемијских процеса.

Такође познато је да на вредностима рН изнад 3, гвожђе исталожено у облику аморфног хидроксида или/и оксихидроксида, има велике адсорпционе површине и може да веже и део сулфата [19, 20] или може бити повољна површина за копреципитацију других метала. Ово би требало да буде предмет детаљних истраживања од стране мултидисциплинарног тима, јер може значајно да утиче на квалитет водоснабдевања. Када је реч о калциту и калцедону, моделирање је показало њихову стабилност током целог распона Eh вредности, што је у складу са очекивањима јер њихово таложење није осетљиво на редокс услове. Исто важи и за Ni₂SiO₄. Модел је



указао на потенцијалну могућност формирања хематита и сидерита, али у реалним теренским условима [18], где време рекристализације и кинетика играју значајну улогу, овај процес је мало вероватан. Стога се њихово присуство сматра теоретски могућим, али практично ограниченим.

4. Дискусија

На основу литолошке грађе и вредности коефицијената филтрације добијених из гранулометријске анализе, процењује се да се зона издани, коју захвата рени бунар у близини бушотине [P-5d, пружа у интервалу од приближно 12,2 до 27 метара дубине. У овом интервалу доминирају седименти са најмањим уделом фине фракције, што указује на њихову добру пропустљивост [4].

Подину водоносног слоја чине тзв. „шарене глине“ еоплеистоценске старости, за које не постоје тачни палеонтолошки подаци, али се претпостављају као најстарије јединице јер леже испод плеистоценских наслага. Издану зону чине полициклични плеистоценски слојеви у којима се смењују шљунковито-песковити и глиновити седименти, таложени током смењивања глацијала и интерглацијала. Најпропуснији шљунковити слојеви, смештени директно изнад „шарених глина“, представљају кључну дренажну зону рени бунара. Повлату део водоносног слоја сачињавају млађи, холоценски седименти — црвено-мрке глине (фација поводња) и песковите глине (фација речног корита). Минералогске анализе узорака из бушотине Rb-6/P-5d нису урађене, али су коришћени упоредиви подаци из бушотине РБ-6/П-3д, удаљене око 50 метара. Узорци са дубина од 16 и 21 метар, у близини дренажне зоне рени бунара, показали су присуство минерала гвожђа као што су хематит, магнетит, лимонит, хромит, илменит, пироксени и амфиболи, у укупном уделу од око 2 wt.%. Подаци добијени XRF анализом указују да се садржај гвожђа у водоносном слоју (издани) креће од 2 до 4,5 wt.%, док је у покровним глинама тај садржај значајно виши – од 3 до 9 wt.%, што у сагласности са израженијом црвено-мрком бојом глина.

У подинским седиментима (испод 27 метра), садржај гвожђа такође варира у распону од 2 до 7 wt.%. Ове разлике указују на процес осиромашења издани у гвожђу, услед растварања минерала и миграције раствореног гвожђа. Највиши садржај гвожђа у водоносном слоју забележен је у његовом доњем делу, што указује да је део раствореног гвожђа депонован у тим дубљим зонама. Анализа гранулометрије показује позитвну корелацију садржаја гвожђа и глинене фракције, што указује на адсорпцију гвожђа на честицама глине и/или директно таложење као аморфно Fe, што би указивало на његову колоидну природу. С обзиром да је укупни садржај гвожђа знатно већи од количине гвожђа везаног за идентификоване минерале (до 2 wt.%), претпоставља се да значајан део гвожђа постоји у колоидном облику. Резултати симулације указују на услове zasiћења у појединим зонама и потенцијалну појаву талобаг окси-хидроксида гвожђа, што може довести до постепеног или потпуног смањења пропустљивости филтерског простора. Такође су подаци указали на потребе даљих истраживања механизма реакција као и испитивања биохемијских процеса. Ови подаци су од значаја за разумевање механизма колматирања и за планирање мера превенције и санације старења бунара.



Што се тиче таложених минерала калцијума и силиката они остају стабилни током промене оксидо-редукционих услова са тенденцијом таложених

5. Предлог даљих истраживања

Што се тиче теренских радова предложена је израда истражних бушотина на одговарајућим локацијама за које се зна да се на бунарима у непосредној близини јављају наслаге које садрже гвожђе, са картирањем језгра бушотине са узимањем проба тј. непоремећених узорака из језгра бушотине на одређеним интервалима, тестом црпења и мерењем нивоа подземне воде. Такође је неопходно мерење pH/Eh у бушотини дуж вертикалног литолошког профила и узимање узорака порне воде. Пожељно је узети узорке наслага са дна речног корита реке Саве, како би могла да се направи што боља корелација са узорцима воде из бушотина, јер речна вода која прихрањује издан Рени бунара, филтрирањем до бунара пролази одређене сложене промене, а јако је тешко дефинисати услове у геолошкој средини пре него што се поремети бушењем и каптирањем. Компаративна анализа састава колматација и наслага са дна речног корита потребна је и у циљу утврђивања да ли колматације претстављају суспензије истог састава као наслаге на речном дну, механички слеplене на филтерској конструкцији које су транспортоване водом у виду суспендованих честица или су последица геоио-биохемијских процеса.

У лабораторијским условима ради детаљне анализе проблема пожељно је на селектованим узорцима урадити следеће:

- Прелиминарно одређивање садржаја гвожђа портабилним XPF (енгл. *X-ray fluorescence*) уређајем дуж језгра бушотине.
- Гранулометријска анализа (дистрибуција величине зрна – гранулометријска крива).
- Одређивање петролошко-минералшког састава (седиментолошка анализа).
- Издавање металичне фракције као потенцијалног носиоца гвожђа.
- Одређивање састава свих фракција и микрохемијска анализа појединачних минерала на SEM-EDS систему.
- Одређивање квалитативног састава глиновите фракције XRD анализом.
- Одређивање адсорбованих и структурно везаних катјона на ICP/AAS методама.
- Барел тест у колонама (утврђивање процедурних параметара).

У лабораторијским условима ради детаљне анализе проблема пожељно је да на колматацијама тј. узетим узорцима наслага са филтерске конструкције урадити следеће:

- Портабилним XRF одређивање садржаја гвожђа и пратећих елемената.
- XRD анализа у циљу одређивања квалитативног састава.
- SEM-EDS – одређивање микроструктуре наслага и микрохемијска анализа утврђених присутних фаза.
- IR/Раман спектроскопија (уколико XRD се утврди присуство аморфне фазе у наслагама).



- ТОС (укупни органски угњеник) за утврђивање присуства бактерија.

На узорцима воде из бушотине, из оближњих рени бунара и реке неопходно је мерити рН/Еh, електропроводљивост, температуру, мирис, мутноћу, ТОС/DOC одвајање суспензија, хемијски састав воде и суспензија (главни катјони и анјони, микроелементи) и садржај слободног кисеоника, као и микробиолошке анализе (утврђивање сојева бактерија у циљу детерминисања физичко хемијских услова средине).

Након прикупљених података, пожељно је урадити модел транспорта честице и обраду податка коришћењем софтвера и конструкција рh/Еh дијаграма, као и симулацију услова постанка наслага. И у испитиваним бунарима и бушотинама постављати плочице за обрастање бактеријама како би се спровели детаљни бактеријолошки тестови у одређеним временским интервалима.

6. Закључак

Услови у подземној средини између зоне прихрањивања и самог бунара често се знатно разликују од оних у околини филтерске конструкције. На могуће услове таложења гвожђа на филтерској конструкцији утичу локалне промене у брзини филтрације и оперативни режим рада бунара, што може довести до хемијске неравнотеже која у комбинацији са осталим хидрогеолошким, хидрауличким, хидродинамичким факторима и биолошким, физичко-хемијским и механичким процесима долази до смањења капацитета бунара колмирањем перфорација на филтерима. Након анализе и синтезе података, прелиминарни резултати нашег истраживања показали су да је у интервалу издани укупни садржај гвожђа нижи него у подини и повлати слојевима, а да се концентрације гвожђа унутар самог водоносног слоја крећу у уском распону. То указује на постојање процеса који доводе до миграције гвожђа из матичног геолошког материјала, вероватно услед растварања минерала гвожђа током дуготрајне циркулације подземних вода — делом кроз геолошки временски период, а делом током самог коришћења издани.

Иако су делимично осиромашени, седименти издани и даље представљају значајан извор гвожђа, што потврђује и појава савремених наслага гвожђа (колматација) на отворима филтера рени бунара. На основу ових податка урађене су софтверске симулације које су показале јасно присуство гвожђа у виду гетита и ферихидроксида. Симулације спроведене на основу постојећих хемијских анализа у опсегу редокс услова 115 до 60 mV указује на погодне услове таложења оксида и хидроксида гвожђа што индицира на даља испитивања биохемијских процеса у издани и њиховог утицаја на стварање колматација.

Осим што ови подаци указују на сложеност проблема смањења издашности бунара и на потребу за континуираним праћењем хидрохемијских параметара и контролу режима рада бунара, такође указују и на потребу формирања стручног тима за анализу проблема. Хидрогеолози имају кључну улогу у разумевању капацитета изворишта, динамике подземних токова и у дефинисању мера заштите подземних вода. Истовремено, биолог доприноси анализом микробиолошких фактора, пре свега утицаја гвожђевитих бакетрија на формирање колматација, док инжењер технолошке



струке је неопходан за разумевање и контролу хемијских услова, механизма таложења и избора адекватних мера санације. Незаобилазну улогу у процесу симулирања и тумачењу резултата неопходан је геохемичар.

Тек синергијом ових дисциплина могуће је доћи до целовитих и ефикасних решења за продужетак радног века бунара и очување њихове издашности. Мулти-дисциплинарни приступ није само препорука – он је предуслов за разумевање узрочно-последичних веза и дугорочно управљање водом као ресурсом од стратешког значаја.

Захвалница

Овај рад је финансијски подржан од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (Уговор бр. 451-03-136/2025-03/200023, 451-03-136/2025-03/200287, 451-03-136/2025-03/200053)

7. Литература

- [1] Папић П, Пушић М, Тодоровић М, Квалитет воде као показатељ хидрогеолошких услова – студија случаја београдског изворишта (подручје ушћа Саве у Дунав), *Water Science & Technology*, Vol. 65, No. 12, стр. 2265–2271. DOI: 10.2166/wst.2012.219, 2012.
- [2] Димкић М. (ур.): *Alluvial Aquifer Processes*, IWA Publishing, Лондон, DOI: 10.2166/9781789060904, 2021.
- [3] Мајкић Б. Л, *Старење бунара у алувијалним срединама различитог степена оксичности*, докторска дисертација, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2013.
- [4] Петронијевић Н, Николић Н, Зарић Ј, Митриновић Д, Камберовић Ж, Димкић М, Садржај и дистрибуција гвожђа у седиментима у бушотини РБ-6/П-5Д на београдском изворишту, *17. српски геолошки конгрес*, ур: Ганић М, Цветков В, Вулић П, Ђурић Д, Ђурић У, Врњачка Бања, стр. 63–69, 17–20. мај 2018.
- [5] Мајкић-Дурсун Б, Нумеричка процена старења радијалних бунара, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Америчко друштво грађевинских инжењера (ASCE), Vol. 25, No. 1, стр. 1–8. DOI: 10.1061/ASCECP.1943-5487.0000063, јануар/фебруар 2011.
- [6] Димкић М, Пушић М, Мајкић-Дурсун Б, Обрадовић В, Одређене импликације оксидних услова у алувијалним подземним водама, *Water Research and Management*, Часопис Српског друштва за заштиту вода, Vol. 1, No. 2, стр. 27–45, 2011.
- [7] Димкић М, Пушић М., Видовић Д, Исаиловић В, Мајкић Б, Филиповић Н, Нумеричка процена старења радијалног бунара, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 1, стр. 43–49, 2011.
- [8] Димкић М, Пушић М, Обрадовић В, Ђурић Д, Неколико природних показатеља старења радијалних бунара на београдском изворишту – други део, *Water Science and Technology*, Vol. 63, No. 11, стр. 2567–2574. PMID: 22049750, 2011.
- [9] Елис Д, *Iron Bacteria, Organisms and Their Identification*, Merchant Books, (оригинално издање: 1918), репринт издање, 2006.
- [10] Colmer A. R, Hinkle M. E, The autotrophic oxidation of iron by a new bacterium: *Thiobacillus ferrooxidans*, *Journal of Bacteriology*, Vol. 62, No. 5, стр. 665–673. DOI: 10.1128/jb.62.5.665-673.1951, 1951.



- [11] Хардер Е. Ц, *Iron-depositing Bacteria and Their Geologic Relations*, United States Geological Survey, Professional Papers бр. 113, Вашингтон, стр. 89, 1919.
- [12] Бабац П, Бабац Д, *Београдско извориште подземних вода – бунари са хоризонталним дренажима*, Balby International, Београд, 2005.
- [13] Барбич Ф, *Популације гвожђевитих и манганских бактерија у изданским водама београдског изворишта и њихов еколошки значај при искоришћавању ових вода*, докторска дисертација, Природно-математички факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1983.
- [14] Петронијевић Н, Радовановић Д, Штуловић М, Сокић М, Јовановић Г, Камберовић Ж, Станковић С, Стопић С, Оџија А, *Анализа механизма неутрализације киселог рудничког дренажа употребом летећег пепела као алтернативног материјала – студија случаја екстремно киселог језера Робуле у источној Србији*, *Water*, Vol. 14, No. 20, чланак бр. 3244. DOI: 10.3390/w14203244, 2022.
- [15] Петронијевић Н, Штуловић М, Сокић М, Јовановић Г, Камберовић Ж, Станковић С, Стопић С, Оџија А, *Примена флотацијских јаловина као алтернативног материјала за санацију киселог рудничког дренажа – студија случаја екстремно киселог језера Робуле (Србија)*, *Metals*, MDPI, Vol. 10, No. 1, чланак бр. 16. DOI: 10.3390/met10010016, децембар 2019.
- [16] Пет Зарић Ј, *Формирање и одрживо коришћење изворишта подземних вода у функцији генезе квартарних седимената доњег тока реке Саве*, докторска дисертација, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2019.
- [17] Штуловић М, Радовановић Д, Камберовић Ж, Кораћ М, Анђић З, *Процена лужности учвршћених производа који садрже секундарну алкалну оловну згужвану шљаку*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 16, Article 2005. DOI: 10.3390/ijerph16112005, 2019.
- [18] Furcas F. E, Mundra S, Lothenbach B, Angst U. M, *Speciation controls the kinetics of iron hydroxide precipitation and transformation*, arXiv preprint arXiv:2311.12464, November 21, 2023. arxiv.org
- [19] Kumar Vadapalli V. R, Klink M. J, Etchebers O, Petrik L. F, Gitari W, White R. A, Key D, Iwouha E, *Neutralization of acid mine drainage using fly ash, and strength development of the resulting solid residues*, *South African Journal of Science*, 104, 7-8, 317-322. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0038-23532008000400017, 2008.
- [20] Xenidis A, Evangelia M, Paspaliaris I, *Potential use of lignite fly ash for the control of acid generation from sulphidic wastes*, *Waste Management*, 22, 631–641. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(01\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00053-8), 2022.