ЗАПИСНИЦИ
СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА

(2025) 68-1

Главни и одговорни уредник: др Урош Ђурић

ISSN: 0372-9966
eISSN: 3042-3546
UDC: 55 (70169095)

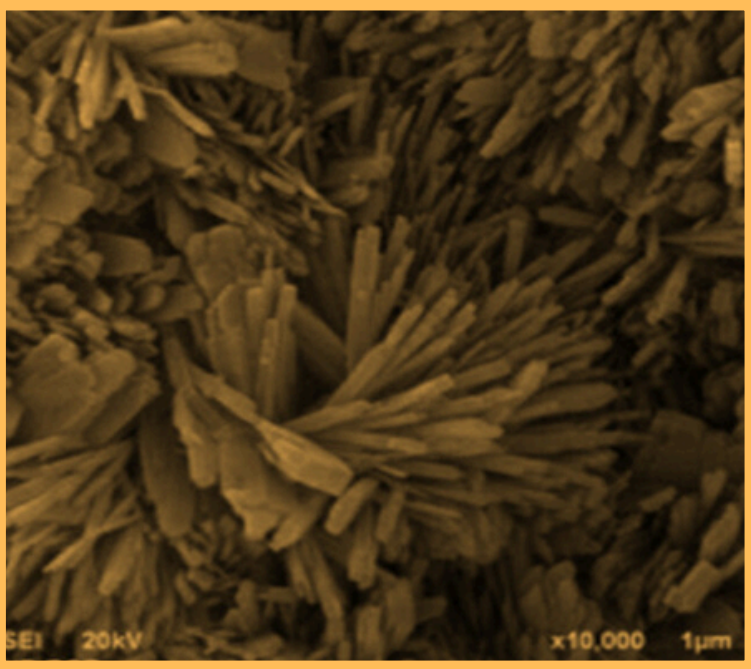
У ОВОМ БРОЈУ ИЗДВАЈАМО

Историјат српске геологије
(стр. 5-14)
А. Грубић

Геологија у култури и уметности
(стр. 15-23)
Л. Беко

3Д воксел литолошко моделирање у ГИС окружењу: утицај обима и просторног распореда истражних бушотина
(стр. 25-37)
К. Мицић

Допринос познавању зеолитског туфа Топоница–Косовска Каменица: Ерионит – присутан или одсутан?
(стр. 39-52)
А. С. Радосављевић-Михајловић и сар.



Српско геолошко друштво
Београд - 2026.

ISSN: 0372-9966
eISSN: 3042-3546
UDC: 55 (70169095)

Записници
Српског геолошког друштва
(за 2025. годину)
вол. 68. св. 1.

Српско геолошко друштво
Београд, 2026

Zapisnici
Srpskog geološkog društva
(for the year 2025)
vol. 86 iss. 1

Serbian Geological Society
Belgrade, 2026

Записници Српског геолошког друштва (за 2025 г) волумен 68, свеска 1

Цитирана форма: **Записници СГД (2025) 68-1**

ISSN: 0372-9966 eISSN: 3042-3546 UDC: 55 (70169095)

Главни и одговорни уредник
Ванр. проф. др Урош Ђурић (Универзитет у Београду, Грађевински факултет)
(Председник Српског геолошког друштва)

Уредници
Проф. др Милош Марјановић (Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет)
Ванр. проф. др Владимир Живановић (Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет)
др Тивадар Гаудењи (Географски институт „Јован Цвијић" САНУ)
Марија Вулетић (Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет)

Помоћни уредници
др Драгана Ђурић (Природњачки музеј у Београду)
др Филип Арнаут (Универзитет у Београду, Институт за физику)
Проф. др Невенка Ђерић (Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет)
Проф. др Даница Срећковић - Батоћанин (Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет)
Ванр. проф. др Ивана Васиљевић (Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет)
др Олег Мандић (Природњачки музеј у Бечу, Аустрија)
Проф. др Слободан Радусиновић (Завод за геолошка истраживања, Црна Гора)

Издавач
Српско геолошко друштво
Каменичка 6, P. Box 227, 11001 Београд, Србија, тел. +381.11.2632.166
http//www.sgd.rs мејл: office@sgd.rs

Излазе две свеске једног волумена годишње.

Тираж: 100 примерака

Штампа: Ривер Принт, Мите Ценића 1, Београд

Zapisnici Srpskog geološkog društva (for 2025) Volume 68, Issue 1

Cited form: **Zapisnici SGD (2025) 68-1**

ISSN: 0372-9966 eISSN: 3042-3546 UDC: 55 (70169095)

Editor in Chief
Assoc. Prof. Uroš Đurić, PhD (University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering)
(President of the Serbian Geological Society)

Editors
Prof. Miloš Marjanović, PhD (University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology)
Assoc. Prof. Vladimir Živanović, PhD (University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology)
Tivadar Gaudenyi, PhD (Geographical Institute "Jovan Cvijic" SASA)
Marija Vuletić (University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology)

Associate Editors
Dragana Đurić, PhD (Natural History Museum of Belgrade)
Filip Arnaut, PhD (University of Belgrade, Institute of Physics)
Prof. Nevenka Đerić (University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology)
Prof. Danica Srećković Batoćanin, PhD (University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology)
Assoc. Prof. Ivana Vasiljević (University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology)
Oleg Mandić, PhD (Natural History Museum, Vienna, Austria)
Prof. Slobodan Radusinović, PhD (Geological Survey of Montenegro, Montenegro)

Publisher
Serbian Geological Society
Kamenička 6, P. Box 227, 11001 Belgrade, Serbia, tel. +381.11.2632.166
http//www.sgd.rs • e-mail: office@sgd.rs

Two issues of one volume published annually.

Circulation: 100 copies

Printing: River print, Mite Cenića 1, Belgrade, Serbia

Садржај

Ђурић, У.: Нова ера Записника Српског геолошког друштва – дигитална трансформација и очување научног суверенитета……1-3

Грубић, А.: Историјат српске геологије……5-14

Беко, Л.: Геологија у култури језика и уметности ……15-23

Мицић, К.: 3Д воксел литолошко моделирање у ГИС окружењу: утицај обима и просторног распореда истражних бушотина……25-37

Радосављевић-Михајловић, А. С., Михајловић, К., Јелић, И., Михајловић, С., Стојановић, Ј., Кашић, В., Вуковић, Н.: Допринос познавању зеолитског туфа Топоница–Косовска Каменица: Ерионит – присутан или одсутан?……39-52

Костић, Б., Животић, Д., Симић, В.: Геолошке карактеристике и 3Д модел лежишта бората Побрђе……53-63

Живановић, В., Атанацковић, Н., Магазиновић, С., Стојадиновић, С., Гардијан, С.: Значај интегралног приступа ликвидацији хидрогеолошких објеката на примеру изворишта „Хомоље Нересница“ код Кучева……65-71

Table of Contents

Đurić, U.: A new era of the journal Zapisnici Srpskog geološkog društva – Digital transformation and the preservation of scientific sovereignty……1-3

Grubić, A.: The history of Serbian geology……5-14

Beko, L.: Geology in the Culture of Language and Art……15-23

Micić, K.: 3D voxel-based lithological modelling in GIS: the influence of borehole scope and spatial pattern……25-37

Radosavljević-Mihajlović, A. S., Mihajlović, K., Jelić, I., Mihajlović, S, Stojanović, J., Kašić, V., Vuković, N.: Contribution to the Knowledge of Zeolitic Tuff Toponica–Kosovska Kamenica: Erionite – Present or Absent?……39-52

Kostić, B.: Životić, D., Simić, V.: Geological characteristics and 3D modeling of the Pobrđe borate deposit……53-63

Živanovic, V., Atanacković, N., Magazinović, S., Stojadinović, S., Gardijan, S.: The importance of an integrated approach to the decommissioning of hydrogeological objects on the example of the “Homolje Neresnica” groundwater source near Kučevo……65-71

Zapisnici SGD, 68-1, 1-3 (2026)
PREFACE / УВОДНИК
doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.18877559

A new era of the journal Zapisnici Srpskog geološkog društva – Digital transformation and the preservation of scientific sovereignty

Uroš ĐURIĆ[1]*

[1]University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Bulevar kralja Aleksandra 73, Belgrade, Serbia.
*Corresponding Author e-mail: udjuric@grf.bg.ac.rs

Abstract: The redesigned volume 68 of the Zapisnici SGD marks the beginning of a new phase in the journal's development, integrating tradition with modern digital standards. Significant changes have been introduced in format and design, including the adoption of the A4 format and improved readability of digital content. The implementation of the Open Journal Systems platform enhances the transparency and efficiency of the peer-review process, while the introduction of an eISSN and the Online First option enables faster availability and citation of papers. Indexing in the EBSCO database and the M53 categorization confirm the journal's national scientific relevance. The adoption of volume-based numbering provides greater flexibility in publishing. Special emphasis is placed on the electronic edition and publishing papers in Serbian, contributing to the preservation of professional terminology and the development of a language corpus relevant for applications in artificial intelligence. These changes strengthen the journal's visibility and future development.

Keywords: Zapisnici SGD; journal developments; scientific publishing; Serbian geology.

Нова ера Записника Српског геолошког друштва – дигитална трансформација и очување научног суверенитета

Урош ЂУРИЋ[1]*

[1]Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија.
*Контакт одговорног аутора: udjuric@grf.bg.ac.rs

Апстракт: Редизајнирани волумен 68 Записника СГД означава почетак нове фазе развоја часописа, у којој се традиција интегрише са савременим дигиталним стандардима. Уведене су промене у формату и дизајну, укључујући А4 формат и побољшану читљивост дигиталних садржаја. Имплементација платформе Open Journal Systems унапређује транспарентност и ефикасност рецензије, док eISSN и Online First омогућавају бржу доступност и цитираност радова. Индексирање у EBSCO бази и категоризација М53 потврђују научни значај часописа. Увођењем нумерације по волуменима омогућена је већа флексибилност публиковања. Посебан акценат стављен је на електронско издање и публиковање радова на српском језику, чиме се доприноси очувању стручне терминологије и развоју језичког корпуса значајног за примену у вештачкој интелигенцији. Ове промене јачају видљивост и будући развој часописа.

Кључне речи: Записници СГД; унапређење часописа; научно издаваштво; геологија Србије.

CC BY

doi: 10.5281/zenodo.18877559

Реч уредника

Поштоване колегинице и колеге, чланови Српског геолошког друштва, уважени аутори и читаоци,

Пред вама је редизајнирани волумен 68 Записника Српског геолошког друштва, издање које означава почетак нове епохе у развоју нашег часописа. Основано 1891. године, наше Друштво је одувек било стожер геолошке мисли на Балкану. Данас, у 2026. години, пред новим уредништвом постављен је изазов да тра-дицију интегрише у динамично, дигитално окружење савремене светске науке и научне публицистике.

Са великим задовољством вам представљамо кључне промене које смо имплементирали како бисмо осигурали изврсност, видљивост и одрживост ваших научних постигнућа.

Часопис је добио потпуно нови дизајн корица, који визуелно кореспондира са престижом наше инсти-туције. Преласком на А4 формат са једностубачним преломом, ускладили смо се са светским стандардима који приоритет дају прегледности дигиталног приказа, читљивости на мобилним уређајима и јасном приказу ваших прилога, комплексних геолошких карата, модела, теренских или микроскопских фото-графија.

Увођењем платформе Open Journal Systems (OJS), процес предаје и рецензије радова постаје делимично аутоматизован и транспарентан. Додела eISSN броја и увођење опције Online First омогућавају да ваш рад буде доступан и цитабилан одмах након позитивне рецензије, без чекања на комплетирање целокупне свеске.

Потписивање споразума са EBSCO индексном базом представља стратешки искорак ка глобалној научној сцени. Као круна ових напора, Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије је у 2025. години категорисало наш часопис као М53 – научни часопис националног значаја, чиме је потврђен квалитет наших рецензентских и уређивачких процеса.

Од овог броја, прелазимо на међународно признат систем нумерације по волумену. Уместо досадашњег означавања "за годину", уводимо Волумен 68, који сведочи о деценијама нашег публиковања. Предлог овакве систематике дат у ранијим Записницима (Gaudenyi, 2023). Ова структура нам омогућава флексибилност да, у складу са потребама струке и приливом квалитетних радова, публикујемо више све-зака у току једне године, чиме додатно убрзавамо научну комуникацију.

У духу одрживости и брзине протока информација, донета је одлука о примарном форсирању електронског издања. Тираж штампаног издања је оптимизован и биће реализован у минималном обиму, превасходно за потребе обавезног примерка, индексирања и метрике Народне библиотеке Србије, док ће онлајн платформа бити централно место дистрибуције радова и саопштења.

Уредништво је донело стратешку одлуку да се радови домаћих аутора примарно публикују на српском језику. Ова одлука није само чин очувања традиције, већ визионарски потез у контексту развоја вештачке интелигенције и великих језичких модела (LLM). Да би AI модели будућности могли прецизно да оперишу у домену геологије на нашим просторима, неопходан им је квалитетан, рецензиран корпус текстова на српском језику. Неговањем стручне терминологије на српском језику, осигуравамо да наша наука не постане пуки превод страних концепата и термина, већ аутентична база знања која је директно применљива у домаћој геолошкој пракси.

Верујемо да ове промене постављају чврсте темеље за будућност нашег часописа. Позивамо вас да својим истраживањима и радовима допринесете богатству Записника и да заједно наставимо пут који су започели наши претходници пре више од једног века.

У (н)овој свесци Записника представљен је сажет преглед историјата српске геологије А. Грубића (Grubić, 2026). Л. Беко је на интересантан начин приближила значај геологије у култури језика и уметности (Beko, 2026). К. Мицић је предочила утицај обима и просторног распореда истражних бушотина при 3Д воксел литолошком моделирању (Micić, 2026). Тим истраживача из Института за технологију нуклеарних и других минералних сировина представили су резултате анализа познавању зеолитског туфа Топонице (код Косовске Каменице) (Radosaveljević-Mihajlović et al., 2026).

Б. Костић и сарадници представили су геолошке карактеристике и 3Д модел лежишта бората Побрђе (Kostić et al., 2026). Група аутора са Департмана за хидрогеологију Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду представила је значај интегралног приступа ликвидацији хидрогеолошких објеката на примеру изворишта „Хомоље Нересница“ (Živanović et al., 2026).

У име Уредништва,

ванр. проф. др Урош Ђурић,
(главни и одговорни уредник)

Литература - References

Beko, L. (2026). Geology in the Culture of Language and Art. Z*apisnici SGD*, 68(1), 15-23.

Gaudenyi, T. (2023). 125th Annivesary of the Journal "Zapisnici Srpskog geološkog društva". *Zapisnici SGD* za 2022, 159-168.

Grubić, A. (2026). The history of Serbian geology. *Zapisnici SGD*, 68(1), 5-14.

Kostić, B., Životić, D. & Simić, V. (2025). Geological characteristics and 3D modeling of the Pobrđe borate deposit. *Zapisnici SGD*, 68(1), 53-63.

Mićić, K. (2026). 3D voxel-based lithological modelling in GIS: the influence of borehole scope and spatial pattern. *Zapisnici SGD*, 68(1), 25-37.

Radosavljević-Mihajlović, A. S., Mihajlović, K., Jelić, I., Mihajlović, S, Stojanović, J., Kašić, V. & Vuković, N. (2025). Contribution to the Knowledge of Zeolitic Tuff Toponica–Kosovska Kamenica: Erionite – Present or Absent? *Zapisnici SGD*, 68(1), 39-52.

Živanovic, V., Atanacković, N., Magazinović, S., Stojadinović, S. & Gardijan, S. (2026). The importance of an integrated approach to the decommissioning of hydrogeological objects on the example of the "Homolje Neresnica" groundwater source. *Zapisnici SGD*, 68(1), 65-71.

Zapisnici SGD, 68-1, 5-14 (2026)
REVIEW PAPER/ ПРЕГЛЕДНИ РАД
doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.18878994

The history of the Serbian geology

Aleksandar GRUBIĆ[1]*

[1]University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Đušina 7, 11000 Belgrade, Serbia.
*Corresponding Author e-mail: info@sgd.rs

Abstract: The Author presents the history of geology in Serbia and the Republika Srpska in a concise form. He begins with knowledge about the Earth in the Middle Ages among Serbs. Then, he continues in chapters to write about the work of foreign geologists in Serbia and the transfer of geological knowledge to our society by domestic authors. This is followed by the emergence of the first geological centers and the influence of J. Pančić's lectures on students' interest in our science, as well as the formation of a domestic school and staff with J. Žujović. Particularly noteworthy are: the progress of geology between the two world wars and the rapid development of science and the profession after World War II. Its ups and downs were connected with the state of the country until today. This also includes the separation, organization and activity in the geology of the Republika Srpska, which helps readers assess the importance of research.

Keywords: history; geology; Serbia; Republika Srpska.

Article history: <Manuscript received 23 October 2025. - Accepted 4 February 2026>

Историјат српске геологије

Александар ГРУБИЋ[1]

[1]Универзитет У Београду – Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, 11000 Београд, Србија.
*info@sgd.rs

Апстракт: Аутор у сажетој форми излаже историју геологије у Србији и Републици Српској. Почиње са знањима о Земљи у средњем веку међу Србима. Затим, наставља по поглављима да пише: о раду страних геолога у Србији и преносу знања из геологије у нашу средину од стране домаћих аутора. Следи настанак првих геолошких центара и утицај предавања Ј. Панчића на интерес студената за нашу науку, као и формирање домаће школе и кадрова са Ј. Жујовићем. Посебно се издвајају: напредак геологије између два светска рата и нагли развој науке и струке после Другог светског рата. Њени успони и падови, повезани су са стањем у држави све до данас. Ту је укључено и одвајање, организација и делатност у геологији Републике Српске.

Кључне речи: историја; геологија; Србија; Република Српска.

Хронологија: <Рад примљен 23. октобар 2025. - Прихваћен 4. фебруар 2026>

1. Увод

У домаћој геолошкој литератури нема целовите, континуирано и прегледно изложене историје српске геологије. Све што је о томе објављено или је непотпуно и фрагментарно или је састављено као опширна тема о неком сегменту те историје. Писац ових редова имао је у виду да је концизно приказана ова тема неопходна сваком геологу. Млађем, да се снађе у обиљу збивања током неколико векова а старијем као потсетник. Нестрпљив је у очекивању одговора на питање: колико је у праву? Или је све обрнуто?

2. Предисторија

У касном средњем веку, између X и XV столећа, међу Србима постојале су две врсте знања о Земљи и њеним стенама – практична и теоријска. Практична су потицала из искуства, која су долазила из рударства, металургије, грађевинарства, каменорезачког, кречарског, грнчарског, опекарског, јувелирског и других заната. Ова знања су била еснафска и већином су традиционално негована у породицама. Нарочито развијено је било познавање минерала и руда, трагање за њима у разним теренима и праћење при експлоатацији у „рупама", како су тада називали руднике. Према „Законику о рудницима" (1412) Деспота Стефана Лазаревића тај (геолошки) посао у рударству се називао „узбој".

Теоријска знања о Земљи су долазила из тзв. хексаемеролне литературе, односно из световно-сакралних списа познатих под називом „Шестодневи" (Хексаемерони). На српски је преведено више али само четири спадају у значајније. Њихови аутори су били: Јован Егзарх (превод из 1263, од Теодора Граматика), Василије Велики (1439, превод Никона Јерусалимског), Георгије Писида (1385, превод Димитрија Зографа) и Јован Златоусти (1633, превод Дамаскинов). По својим тумачењима и утицају истицале су се беседе (хомилије) Василија Великог. У ширим изводима биле су доступне српском читаоцу још из еклектичког бугарског „Шестоднева" Јована Егзарха (од почетка X века), а касније и из новијих превода и преписа. Из ових списа преводиоци, преписивачи, читаоци (нарочито из племићких породица) и слушаоци (у манастирима) обавештавани су о томе како, уз помоћ античких филозофских идеја и природњачких тумачења, могу да се објасне библијска казивања о Земљи, односно о њеном постанку, саставу, небу, копну, води, ваздуху, мору, органском свету, минералима, металима, фосилима у ћилибару и др. Ти списи су били засновани на „Библији" а позивали се на гледишта Платона, стоика, Демокрита а, делом и на списима Аристотела и дугих античких природњака и филозофа. Важно је да се напомене како се само код Писиде, у његовом поетски лепо написаном „Шестодневу", налазе особито истакнути Хераклитови погледи о променама света. Ове књиге у Србији су преписиване и читане све до краја XVIII века, због турске окупације и ратова. У Аустроугарској и Далмацији, међутим, од тог столећа већ се јављају ретка стручна истраживања странаца, заснована на знању западноевропских научника. Писмени Срби ипак читају „Шестоднев" а народ слуша.

Нововековна стручна минералошка и геолошка проучавања Србије почињу са радовима странаца: италијанског полихистора Л. Ф. Марсиљија (Marsigli, 1726) на Фрушкој гори; немачког рудара и монтангеолога барона Ф. Хердера (Herder, 1835) у Србији; и француских геолога А. Буеа (Boue, 1840) и А. Викенела (Viquesnel, 1842-1844) на целом Балканском полуострву. Нарочити значај имали су забележени резултати конкретних теренских испитивања, која су извели Хердер и Буе, јер је у њиховим текстовима постављен тадашњи научни темељ свим каснијим истраживањима. Хердер је пренео у Србију знања и искуства чувене Фрајбершке монтангеолошке школе и саксонских рудара и предложио шта, како и где треба да се ради.- Буе је систематски више пута пропутовао преко Балканског полуострва (тадашње „Европске Турске") и успут бележио податке о геолошком саставу терена. Своја запажања објављивао је после тих путовања повремено а на основу свега тога урадио је синтезу „Геолошка скица Европске Турске" у оквиру обимног дела „Европска Турска" (1840). Поред осталих терена, ту се налазе и основи за геологију тадашње Србије. - Страни стручњаци, и касније, све до краја XIX века, често су учествовали у истраживању руда у Србији. У другим српским земљама радили су све до 1918. Само Бедрих Кацер (Friedriech Katzer), захваљујући свом јеврејско чешком идентитету, остао је на свом месту, као директор Геолошког завода Босне и Херцеговине, до краја живота, 1925.

Знања из фундаменталне Геогнозије XVIII века преносили су Србима домаћи полихистори скоро искључиво из немачких, вернеријанских извора: З. Орфелин (1783), А. Стојковић (1801-1803), П. Кенђелац (1811) и други. Овај последњи је излагао и своја потпуно оригинална тумачења о постанку Земље и планина.

3. Први период домаће геологије

Домаћу средњошколску наставу из Геогнозије и минералогије почео је Словак, професор А. Волни од 1794. године у Гимназији у Сремским Карловцима. Тада је за потребе наставе у тој школи оформљена и збирка минерала, стена и фосила већином са Фрушке горе. То је била прва српска природњачка и геолошка збирка, која је сачувана до данас. Значајна је јер је то и најстарија таква збирка на Балканском полуострву. Лоше је, јер није сређена.

Званични почетак државних рударских и геолошких истраживања у Кнежевини Србији почиње 1848. године успостављањем Рударског одељења Министарства финансија и отварањем рудника Мајданпек. Између 1848. и 1858. године Мајданпек је био први државни рудник и главни центар за геологију и рударство целе Србије. Страни и домаћи рударски инжењери и геолози из тог центра истраживали су све сировине и отварали руднике. Главни организатор тог посла био је рударски инжењер и, званично лиценцирани, први српски геолог Ђорђе Бранковић. Он је био и оснивач Рударског одељења Министарства финансија.

После затварања Мајданпека, од 1859. сви геолошки и рударски послови су настављени и руковођени из Рударског одељења до Првог светског рата. Током времена десиле су се две крупне промене. Ово Одељење је 1883. ушло у састав новог Министарства народне привреде а од 1891. при њему, први српски доктор геологије С. Радовановић, формирао је: „Геолошко-рударски музеј“ и „Одсек за израду детаљних геолошких карата Краљевине Србије и геолошко-рударских карата“. Радовановића, на месту званичног државног геолога у том центру, успешно је наследио 1897. Д. Антула , други српски доктор геологије. Он је још више унапредио професионална геолошка истраживања у Србији. Њихов практични рад на терену заснивао се на европским геолошким знањима из прве половине XIX века која су стицали у Београду и Бечу и домаћем искуству.

Други центар, за геолошку наставу и проучавања Србије, основао је Ј. Панчић 1853. на Лицеју када је почео да предаје предмет Минералогија и геогнозија. У оквиру тог центра он је изводио са студентима и скромна геолошка осматрања на теренима Србије и писао о томе. Систематски је радио на развоју домаће стручне терминологије и успевао да заинтересује своје слушаоце за геологију. Објавио је и први уџбеник из геологије (1867) са низом примера из наше земље. То је била важна припрема за формирање домаћих кадрова. Овај центар се развијао током времена мењајући своју организациону структуру и називе све до данас. Увек се нешто радило и на терену али главни посао у центру било је конкретно геолошко образовање домаћих стручњака.

Сличан, трећи центар, настао је на Српској православној великој гимназији у Новом Саду 1871., када је ступио у њу Александар Поповић, после завршених природњачких студија у Будимпешти. Он и његов, нешто млађи, колега Стеван Недељковић, поред предавања из геологије, предузимали су истраживања и картирања Фрушке горе. Поповић је проучавао 1774. и терене Србије. Пријавио је чак и докторат из геологије код професора Сабоа на Универзитету у Будимпешти. Двојца младих геолога радили су као прави професионалци али, на жалост, један за другим су преминули па се овај центар брзо угасио (1878). Његов битан допринос је био у високом квалитету рада истраживача на терену, разрађивању домаће стручне терминологије и критичком преиспитивању Панчићевих назива за стене и појаве.

4. Образовање домаћег кадра и окупација

Доласком Ј. Жујовића (1880), на осамостаљену Катедру Минералогије и геологије, која је заостала од распарчане Панчићеве „Јестаственице“,- почело је систематско образовање младих геолога на Филозофском

факултету Велике школе у Београду. Осим тога, на Техничком факултету слушала се примењена геологија у грађевинарству. Жујовић поред предавања, приступа изради прве Геолошке карте Србије у размери 1: 1.1.500.000 (1882, 1886), унапређује наставу оснивањем нових катедара (за минералогију и петрографију и за палеонтологију) и са ученицима и сарадницима (С. Радовановић, С. Урошевић, П. Павловић, С. Стевановић, Д. Антула и млађом генерацијом) почиње са детаљнијим проучавањем домаћих терана. Оснива Српско геолошко друштво 1891. Велика штета је била што се догодило да је пала Влада пред заседање Скупштине, на којој је требало да буде прихваћен Закон о оснивању државног Геолошког комитета (по предлогу С. Радовановић, 1893). Објављивањем резултата геолошког рада, у властитим „Геолошким аналима Балканског полуострва" од 1889. и на Српском геолошком друштву у „Записницима СГД", - формирана је добро утемељена београдска геолошка школа. Резултати заједничких напора поменутих истраживача синтезно су објављени на прекретници деветнаестог и двадесетог века. Реч је о Жујовићевој монографија „Геологија Србије" у два тома (1893, 1900), затим, о студији Ј. Цвијића о структури планина Балканског полуострва (1900) и приказу свих рудишта у Србији од Д. Антуле (1900). Ова веома значајна дела сведоче о тадашњем доста уравнотеженом односу наше фундаменталне и примењене геологије. Тако је домаћа геологија равноправно пратила савремене токове наше науке у Европи. Велика шета је било што је Ј. Жујовић из политичких разлога пензионисан.

До двадесетих година XX века геологија је развијана у Универзитету, у Рударском одељењу (Д. Антула), Природњачком музеју српске земље (П. Павловић) и Сеизмолошком заводу (Ј. Михаиловић). Тада је било свега неколико активних професионалних геолога, остало су били заправо геолошки педагози. У „Одсеку за израду детаљне геолошке карте" на Заводу за геологију Универзитета снимане су детаљне геолошке карте (1:100.000) у Источној Србији (прво у Ђердапу, 1901-1902; затим, касније и у другим деловима), у западној Србији (Крупањ, Шабац и Ваљево) и у околини Београда (1909-1911). У то време одбрањена је и прва домаћа геолошка докторска дисертација у Београду (В. Петковић, 1908).

Постепено су увођени и у друге разне делатности елементи примењене геологије. Пружане су услуге рудницима за њихове потребе. Инструментално су праћени потреси у Србији и околним земљама. Прикупљан је минерални, стенски, рудни и фосилни материјал са терена, обрађиван и сређиван у Музеју. Вођене су расправе и доношени хидрогеолошки закључци о водоснабдевању Београда, итд. Знања из монтангеологије, међутим, инжењери су стицали и даље само на студијама у средњој Еропи.

У спровођењу готово свих тих геолошких послова главни ослонац актерима је било Српско геолошко друштво. Оно је имало традицију, институционални ауторитет, унутрашњу организацију и шаролико али веома активно и приљежно чланство спремно да прихвата разне задатке.

За време Првог светског рата у окупираној Србији радили су аустроугарски „ратни геолози", већином мађарски, на изради прегледне геолошке карте 1:200.000 и проспекцији минералних сировина. Њихови подаци објављивани су тек двадесетих година и имају различити квалитет и значај. Неки од аутора су водили рачуна о томе шта су пре њих урадили српски геолози а други су све то бахато игнорисали, на своју штету. Из Аустрије на терену су били О. Ампферер (O. Ampferer) и В. Хамер (W. Hammer) а из Немачке Ф. Космат (Fr. Kossmat) чији радови су били веома добри.

5. Период између два светска рата и окупација

После Првог светског рата Геолошки завод Универзитета ојачан је кадровски В. Петковићем и В. Ласкаревом (који је са емиграцијом стигао из Русије), а у Минералошки завод су пристигли Ј. Томић и Б. Димитријевић. У посебним групама, на Природно-математичком одсеку Филозофског факултета, извођено је школовање геолошко-палеонтолошких и минералошко-петрографских стручњака. Геологија, у виду посебних катедри и предмета, развијала се на Техничком и на новом Пољопривредно-шумарском факултету (Ј. Жујовић, М. Луковић, Б. Димитријевић). Тако је, уз регионално геолошке предмете, примењена геологија званично нашла своје место и у високом образовању. Појавио се знатно већи интерес за студије геологије.

Нове потребе и нови кадрови коначно су остварили услове (на предлог из СГД) за отварање „Геолошког института Краљевине Југославије“ (1931), који је био у надлежности Министарства просвете. У њему је млада генерација професионалних геолога (С. Милојевић, М. Протић, М. Павловић, В. Симић, В. Микинчић, К. Петковић, М. Илић) наставила систематско геолошко картирање земље (у р. 1:100.000), што је и био главни задатак Института. За струку је веома битно било што је тај Институт преузео све завршене карте размере 1:100.000, већином из Источне Србије, из универзитетског Завода за геологију, и објавио их у кратком року.

На Универзитету су се појавиле нове снаге (К. Петковић, Б. Миловановић, С. Павловић, З. Бешић, Г. Гагарин) и учестале су израде и одбране докторских дисертација. Постепено приступало се све више и пословима који су захтевали добра знања из примењене геологије (у рудницима, грађевинарству, водоснабдевању, балнеологији и др). Геологија је у целини, међутим, била стално у надлежности Министарства просвете. Овај напредак и успон у развоју домаће фундаменталне и примењене геологије прекинут је Другим светским ратом.

Пресек свих дотадашњих знања из геологије Србије нашао се синтетизован на две карте. Прво, на Геолошкој карти Краљевине Југославије 1:1.000.000 од К. Петковића (1931), и друго, у оквиру Геолошке карте ФНР Југославије 1:500.000 од В. Микинчића која је урађена и објављена тек 1953.

За време окупације домаћи геолози нису радили готово ништа. Неки су били у Немачкој у заробљеништву а њих шесторица, под управом немачког комесара, су преписивали старе извештаје и прецртавали готове карте скрајнути у малом Геолошком институту у Београду. Нешто се радило и на терену. У једном од ређих теренских задатака у околини Такова, међутим, погинуо је М. Гочанин (1942), који је био веома оригиналан геолог, али је до рата био гимназијски професор. Исте године преминули су и В. Чубриловић и М. Којић, који је био први председник СГД после Жујовића. Занимљиво је да је 1942. године геологија из надлежности тадашњег окупационог Министарства просвете пренета у Министарство рударства и то према предлогу који се појавио пред сам рат. Тако је остало и после рата у новој Држави али на основу нове одлуке.

6. Геологија у изградњи социјализма

По завршетку Другог светског рата геологија у Србији је добила нови замах. У свету и код нас десиле су се крупне промене и у фундаменталној геологији и у њеној трансмисији у примењену. Особито то је било изражено, у свим доменима примењене геологије. Ови нови процеси одвијали су се у нашим условима у два главна подручја: у школовању кадрова и у пракси.

На Универзитету, успостављене су 1945. две образовне јединице: Група за геологију и палеонтологију (К. Петковић, В. Ласкарев, П. Стевановић и др.) и Група за минералогију и петрографију (Ј. Томић, С. Павловић, М. Ристић др.) на Филозофском факултету. Убрзо (1948), међутим, те две групе су припале издвојеном Природно-математичком факултету. На њему прва генерација дипломираних геолога и минералога завршила је студије 1949.

На Техничком факултету, који се трансформисао у Техничку велику школу (1948), међутим, као одговор на нове потребе привреде, прво је формирано само Одељење за Геологију на Рударском одсеку (декретом из 1946). Затим, на новој ТВШ Одсек је прерастао у посебан Рударски факултет са два одсека (Рударским и Геолошким; 1948). Коначно издвојен је 1950/51. и самосталан Геолошки факултет (М. Луковић, Б. Миловановић, М. Илић, Д. Просен, Б. Степановић и др.). Прва и друга генерација дипломираних инжењера, школована за примењену геологију, завршила је студије 1950. године. (Ово је био занимљив случај „ударничког покрета“ на високом образовању у Београду из тог времена. Студенти друге генерације су дали „Обавезу КПЈ“ да ће наставни план од пет студијских година савладати за четири године. Неки су и успели.) Оваква организација је деловала до 1956. године када се расформирала „Техничка велика школа“ а сви њени факултети вратили се на Универзитет. Том приликом Рударски и Геолошки факултет су се интегрисали у данашњи Рударско-геолошки факултет.

За планиране државне потребе почело је интензивно образовање геолога и инжењера геолога и геофизичара. У прво време сваке године завршавало је студије неколико десетина а касније и стотинак младих стручњака. До 1980. дипломирало је око 2.000 геолога.

Почетком шездесетих година (1960-1963) изведена је и интеграција целокупног високог геолошког образовања на Геолошком одсеку Рударско-геолошког факултета у Београду. Тако је тај Одсек постао један од најснажнијих геолошких школских центара у овом делу Европе. У универзитетској настави, од самог почетка, уведени су смерови (регионална геологија, палеонтологија, истраживање лежишта минералних сировина, минералогија, петрографија са геохемијом, хирогеологија, инжењерска геологија и примењена геофизика) и усмерења на које су студенти уписивани од прве године. То је у њихово образовање унело специјализацију претерано рану за једну малу земљу. Једном постављен овај модел се и касније упорно преносио уз мање варијације.

У пракси дошло је до битне промене положаја геологије као струке у друштвеној структури, јер је 1946. преведена из сфере потрошње у сферу производње и то у целој Европи. Наступио је нови општи однос према геологији. Постала је саставни део привреде. Њојој су, опет, требали стручњаци способни да реше све проблеме који проистичу из геолошког састава тла за било какав посао.

Током педесетих година главни задатак геолога била су трагања за металичним минералним сировинама, угљевима и нафтом. Све је било подређено томе а фундаментална геологија сведена је на лични интерес појединаца. Постало је неопходно да се у рад уведу квалификовани стручњаци свих профила. Дипломирани инжењери и геолози су одмах улазили у неколико геолошких и сродних институција које су се брзо разрастале: Завод за геолошка и геофизичка истраживања Србије, Геолошки институт САНУ, Геоинститут, Геосонда, Енергопројект, Косовопројект, Институт за путеве, Централни институт за пројектовање (ЦИП), Пиродњачки музеј и др. У рударским басенима и грађевинским предузећима формиране су такође посебне геолошке службе, некада и са многобројним стручњацима (Трепча, Бор, Мајданпек, Нафтагас, Колубара, Костолац, Зајача и др).

Почетком педесетих године у Југославији остварена је делимично и стара Жујовићева идеја, из 1905. године, о конгресима „јужнословенских" геолога. Током времена то су постали веома важни научни и стручни скупови на којима се расправљало и закључивало и о битним питањима геологије у држави. До 1990. године одржано је у два круга дванаест конгреса по Републикама а онда, до 2022. још два заједничка Српско-црногорска и четири српска.

Нови кадрови, нови послови у земљи и иностранству, нова опрема, знања и искуства, и богате библиотеке омогућили су неслућени процват геологије у Србији од краја педесетих до краја седамдесетих година. На основу одлука о потреби да се изради „Комплексна геолошка карта", донетих на првим Когресима геолога у земљи, тада (1960) се приступа систематском геолошком картирању целе земље у размери 1:100.000. По званичном „Упутству" ради се, заправо, од три предвиђене, само једна: „Основна геолошка карта", у радној верзији 1:25.000. Тај посао води аутономна Савезна комисија, у оквиру Савезног геолошког завода у Београду. На њено чело самоизабрао се човек са „црвеном књижицом" М. Димитријевић, један од успелијих инжењера за примењену геологију из друге генерације.- Кроз обимне и сложене послове на том великом и дугогодишњем пројекту остварена је и веома корисна широка подршка домаћој фундаменталној геологији, која је пре тога била доста запостављена. Освајају се модерне и напредне технике рада и у многим другим геолошким дисциплинама: седиментологији, инжењерској геологији, хидрогеологији, лежиштима металичних сировина, геологији угљева, геологији нафте, геофизици, геохемији, техничкој петрографији и др. У том погледу посебно се истиче реализовање великог геофизичког пројекта дубоког сеизмичког сондирања по неколико профила у целој држави (1965-1970).

Добро образовани геолози били су веома успешни и у фундаменталној и примењеној геологији које су се у интеракцији корисно допуњавале. Ово је донело коренште промене у сфери свих потпуно осамостаљених дисциплина примењене геологије али можда највише у истраживању лежишта минералних сировина. Најјасиније то се одразило на „Симпозијуму о примени нове тектонике плоча на

лежишта минералних сировина у Југославији", одржаном 1974. године на Рударско-геолошком факултету у Београду.

Покреће се низ геолошких часописа (Годишњак САНУ, Зборник радова РГФ, Гласник Природњачког музеја, Седиментологија Геозавода, Билтен ЛМГК, Радови Геоинститута и др). Од половине седамдесетих година постепено у домаћу геологију уводе се моделовање и примена рачунарске технике, што је веома унапредило и убрзало све геолошке послове.

Веома значајну улогу, у новим послератнм условима, задобило је обновљено Српско геолошко друштво али и новоформирани Савез инжењера и техничара рударске и геолошке струке у СИТ-у. Више стотина чланова оба удружења деценијама је доприносило унапређењу и развоју домаће геологије у целини.

Геолошка истраживања у Србији су уређена посебним Законом (1972), који је обезбеђивао регуларне процедуре у тим пословима и уређивао њихово финансирање. Резултати тог обимног и квалификованог истраживачког рада нашли су се обједињени: на две геолошке карте (Геолошка карта СФРЈ 1:500.000 у анонимној редакцији Геоинститута, 1972; и Геолошка карти СР Србије 1:200.000 од Б. Миловановића и Б. Ћирића, 1966) и тринаестотомној монографији „Геологија Србије" у редакцији К. Петковића и издању Рударско- геолошког факултета у Београду (1975-1987). Састављена је Геолошка библиографија Југославије и Србије у којој се у тринајст књига налази све што је објављено и из геологије Србије до краја 2005. године (1954-1997).

Седамдесете године су донеле и три веома негативне новости. Фамозним Уставом из 1974. и једним Законом насилно је одређена „службена тајност свих геолошких података из Југославије" а други Закон је наложио организацију економије у држави на принципима измишљене "теорије удруженог рада".

Због наводне одбрамбене сигурности државе, први Закон је имао драстичне последице на све аспекте геолошких проучавања Србије а нарочито на домаћу и више него неопходну и веома битну међународну сарадњу.

По другом Закону разбијена је и уситњена целокупна радна структура у држави на аутономне субјекте тзв. „организације удруженог рада" (ООУР-и). То је радикално спроведено, под снажним утицајем себичних и аутистичких дезинтеграционих снага тог времена и у образовању и у професионалним геолошким кућама. Тако су на Рударско-геолошком факултету геолошки смерови претворени у потпуно самосталне накарадне „финансијске субјекте" који су слободно мењали наставне планове, укидали предмете и одлучивали о спровођењу наставних процеса.- Геозавод се распао на неколико потпуно независних института (за геофизику, за метале, за неметале, за инжењерску и хидрогеологију и Гемини) који су се међусобно често јављали и као конкуренти на тржишту. Геофизика се одвојила у самосталану радну организацију а нешто касније интегрисала се са Нафтагасом из Новог Сада. –Геоинститут се такође разделио али само кратко време па је то измењено.- Финансирање образовања и истраживања са државе пренето је на републичке и регионалне „самоуправне интересне заједнице" (СИЗ) па је постало уситњено, трајаво и, у знатној мери, оптерећено малверзацијама. Осим свега тога, тим Законом унапред је постављен оквир будућег распада Југославије (према закључцима Дрезденског конгеса КПЈ, 1928).

Уз све поменуто, седамдесетих година сагледавао се крај израде „Основне геолошка карте СФРЈ". Тим поводом у Републичкој самоуправној заједници Србије, на основу сумњивих „одлука" произвољних састанака, опет на предлог М. Димитријевића, уведен је рад на тзв. „Тематској геолошкој карти", уз низ закулисних манипулација (од 1978). Овом, нестручном и просто невероватном, стратешком грешком у дугорочној политици геолошког картирања државе, чланови старе Савезне комисије покушали су да замагле и релативизују своје огромно незнање. Због кога су доносили потпуно погрешне одлуке још у време увођења тзв .„Комплексне геолошке карте". Тада, уместо захтеване једне карте прмовисане су три независне карте (према одлуци те Комисије из времена 1954-1957).- Овај нови и скупи погрешан експеримент у изради „карте без карте", упркос свим упозорењима и противљењима, трајао је ипак две деценије, захваљујући већ од раније добро уходаним парцијалним и коруптивним интересима појединаца (на челу са највећим „стручњаком" из геолошког картирања у нас, М. Димитријевићем) и представника

СИЗ-а. Овоме је много погодовала и тадашња званична социјалистичка економија „удруженог рада и средстава на основу договарања и споразумевања“ са катастрофалним последицама.

Три наведене „новости“ у геологији Србије тешко су оштетиле и уназадиле све оно што се пре тога деценијама постепено и мукотрпно градило и радило у геолошком образовању и истраживању. То, међутим, био је само увод у следеће још теже последице за нашу струку и науку.

Осамдесетих година, држава улази дефинитиивно у велику дужничку кризу према страним кредиторима. (Од 2,1 милијарде долара дугова у 1970. години обавезе према конвертибилном подручју су се попеле на 18,9 милијарди долара, при чему је највиће задуживање било у другој половини седме декаде. Држава је практично банкротирала, само што то није и банкарски формално објављено из политичких разлога). Грчевити и веома компликовани преговори домаћих и међународних банкара око решавања начина отпате тог дуга трајали су три године (1981-1983). Решење је спроведено по Закону који је донет у Скупштини 3. јула 1983. о претварању тог дуга у дугрочни. Катастрофа државних финансија и политичког угледа ФНРЈ у свету, су избегнути али су остали многи унутрашњи банкарски проблеми. Све то изазивало је драстично повећану унутрашњу кризу државе, привреде и целе економије. Хаос.

Долази до општег пада стандарда живота и великих несташица. У току је даља дезинтеграција геолошких служби, затим, настају велики проблеми у финансирању геолошких истраживања, губе се кадрови, општа стагнација и назадовање струке. Релативно срећна околност је била што су геолошке куће, још из претходних година, имале послове уговорене у иностранству (Иран, Либија, Турска, Мозамбик и др.). То је омогућило да се тада али и нешто касније, бар делимично, премосте наведене тешкоће нарочито у сфери регионалне геологије и лежишта минералних сировина. Ова чињеница помогла је да, кроз мучну транзицију (после 1989), остану, колико-толико, очувани важни делови акумулираног знања, капацитета и „супстанца“ српске геологије. Као новост, полако почињу да се јављају и привате иницијативе у геологији. Отварају се успешне мале агенције и фирме које обављају геотехничке, хидрогеолошке, инжењерско-геолошке, геофизичке и друге послове за трећа лица.

7. Последњи период

Деведесете године, са дубоком државном и политичком кризом, распадом земље, успостављањем нове државе СР Југославије, затим са увођењем вишепартијског система у Србији, доношени су и нови закони 1992. Србија је била изложена транзицији, од неуспелих покушаја планске, тржишно-планске и тзв. договорне економије, да несигурним корацима пређе у тржишну привреду. То је донело нове сложене промене: у високом образовању, организацији геолошких истраживања и положају геологије у друштву.

Геолошки послови, обављани од стране самосталних законом регулисаних привредних субјеката, прешли су, опет, кроз нову законску регулативу, у сектор „услужних делатности“. Настали су потпуно нови услови за рад. За то, међутим, геолошке куће нису била припремљене па су се нашле у борби за опстанак, изложене беспоштедној конкуренцији, осипању кадрова, губљењу знања, застаревању и пропадању опреме, библиотека и фондова. Уз све то, доспеле су у сферу јаких коруптивних интереса и у озбиљну опасност од далекосежних и непредвидивих последица расписаног предлога о (криминалној) приватизацији. Што је, срећом, спречено.

У високом образовању геолога, веома тешке последице дуготрајне непримерене и атомизоване ООУР-ске организације, замењене су повратком на скоро исто стање пре увођења ООУР-а. То значи да су се у школовање вратили раније уведени смерови. Велика и важна новост из овог времена била је државна одлука о приступању „Болоњској декларацији“ о високом школству.

Распад друге Југославије (1990), галопирајућа инфлација (1993), санкције Савета безбедности УН уведене Србији (1991-1995), и дивљачко бомбардовање 78 дана земље од стране НАТО-алијансе (1990), повећали су и онако знатне тешкоће у геологији. Све то али и убрзана транзиција и приватизација, између 2000. и 2006. довели су до њеног правог колапса у Србији. Ништа нису вредели сви озбиљни скупови и округли столови, организовани од стране СГД, РГФ и СГЕИТС-а, о значају и потреби очувања домаћих

геолошких организација и стечених знања. Тај негативни тренд и агонија су настављени све до 2006. године. То је била преломна година са великим заокретима у свим доменима домаће геологије.

Те, 2006. године сви геолошки институти из Београда интегрисани су „административно- добровољно" у јединствену фирму „Геолошки институт Србије д.о.о.". Овом привременом интервенцијом држжаве заустављена је пропаст. Почела је консолидација и концентрација преосталих кадрова, опреме, фондова и знања.

Коначно, 2011. године процес стабилизације и реконструкције је завршен формирањем државног „Геолошког завода Србије" при Министарству рударства и енергетике. То је нова установа, која од тада за рачун Републике Србије обавља сва основна геолошка истраживања њене територије. Све остало је препуштено слободном међународном тржишту (2017. године, н.пр. 36 страних компанија је трагало за рудама у Србији), и кроз наше мање приватне фирме и агенције, што је такође била крупна промена у домаћој пракси. Сада је Геолошки завод Србије у Београду једна угледна, добро организована, државна институција, која преко својих одељења делује у доменима свих неопходних послова земље.

Иза свега, међутим, остала је и једна посебно тешка последица. Прелазно стање, од пет година у транзицији, погодовало је разним манипулацијама и користољубивим неправилностима које су јавно и анонимно оштро критиковане. У сложеном процесу пресељавања Геозавода у Ровињску 12, због незаинтересованости и небриге одговорних људи, крађом и запуштањем неповратно су нестали делови збирки, библиотеке, стручних фондова, архива и опреме, што је огромна и непроцењива штета.

На Рударско-геолошком факултету завршене су све припреме за прелазак на студије у складу са Болоњском декларацијом 2005. Уместо старих наставних планова, већ школске 2006/2007. године, уписани су студенти на основне академске студије (четири године). Настава је почела по новим студијским плановима и програмима из: геологије (са пет модула из: регионалне геологије, палеонтологије, минералогије и кристалографије, петрологије и геохемије, и економске геологије), хидрогеологије, геотехнике и геофизике. Мастер (једна година) и докторске студије (три године) организоване су три године касније. Кроз нове акредитације, регионална геологија и истраживање минералних сировина са нивоа модула преведени су у основне академске студије.

Кроз сва поменута тешка и смутна времена један од стално сигурних и главних стубова домаће геологије било је Српско геолошко друштво. И у најтежим условима, када се и само борило са огромним егзистенцијалним тешкоћама, стицало је унутрашњу снагу да се брине, заузима и бори за успостављање новог статуса геологије у земљи и остваривање њеног новог друштвеног положаја. На обележавању 125 година рада то је добило велико признање државе овенчавањем „Сретењским орденом другог степена" од стране Председника Репубике Србије (2016). Сем тога, реализована је изванредно урађена књига историје Друштва, која му служи за понос у Европи.

У негативном тренду стања и статуса геологије транзиционе Србије, као велико чудо, јавило се и неколико изразито позитивних појава. Деценијама прикупљано и систематизовано огромно знање из геологије Србије добило је своје синтезне облике. Омогућен је континуитет у одржавању геолошких конгреса (13. Херцег Нови, 1998; 14. Нови Сад, 2005; 15. Београд, 2010; 16. Доњи Милановац, 2014; 17. Врњачка Бања, 2018; 18. Дивчибаре, 2022). Завршено је штампање Основне геолошке карте СФРЈ на 1:100.000 (1989) у којој се на 80 листова, делимично или у целини, налази и цела наша Република. Отпочео је сисематски рад на снимању Геолошке карте Србије у размери 50.000. Благовремено и веома успешно уведена је ефикасна примена модерне тектонике плоча у решавање геолошких проблема Србије. Започета већ 1970. Године, настављена је и, управо тада, доживљава свој високо креативан и снажан успон. То се одражава на појаву неколико одговарајућих синтеза о геологији Србије (А. Грубић, 1980; М. Димитријевић, 1995). Има и другојачијих мишљења (М. Анђелковић, 1982; Б. Ћирић, 1996). Спремно и ефикасно је у Регионалну геологију уведена и концепција терана (С. Карамата, 1989, 2006). Са румунским геолозима изведен је одличан „Симпозијум о геологији Ђердапа" (1997), чији садржај и резултати снажно су одјекнули у окружењу и у Европи. У неким доменима српски геолози чак су и предњачили у региону па је

изгледало као да се ништа лоше није ни догодило са нашом струком у земљи. Али то је био само привид. Пад је био катастрофалан.

При растакању СФР Југославије деведесетих година, на основу Дејтонског споразума, дефинитивно је потврђена Република Српска. У том ентитету 1992. године оформљен је „Републички завод за геолошка истраживања Р.С." још у ратнм условима. Он се јавља као један од легитимних наследника „Геолошког завода Босне и Херцеговине", који је основан 1912. од стране Ф. Кацера и тадашње Земаљске Владе Б. и Х. Сада овај Завод има статус управне организације, у оквиру Министарства енергетике и рударства Р.С. (од 2008), за потребе државе. Седиште му је у Зворнику и делује путем 12 макро-пројеката: израда основних геолошких карата; истраживање минералних сировина; основна инжењерско-геолошка и хидрогеолошка истраживања; геохемија; геофизика; геотермалне воде; геотермална енергија; геохазард; геолошко наслеђе; и успостављање геолошког информационог система Р.С.

Осим Геолошког завода у Р.С., у ентитету предаје се на Рударском факултету у Приједору на посебном Одсеку минерално сировински део геологије. Од дугих организација које се баве геологијом има више приватних агенција и два значајна института: „Технички институт" у Бијељини и „Рударски институт" у Приједору који обављају геотехничка истраживања (први) и истраживања минералних сировина (други).

Не треба испустити из вида, у овом кратком разматрању српске гелогије, да су српски геолози имали своје значајно место у обадве академије наука и уметности од њиховог оснивања (САНУ, 1886. и АНУРС, 1994, још у ратним условима) па до данас. У АНУРС један од најактивнијих је управо Одбор за геонауке. Чланови Одбора радили су вредно и успешно па су о томе остали запажени трагови. Тешкоће о којима је овде писано нису ни њих заобилазиле.

Овде, на крају, потребно је нагласити да су домаћи геолози, кроз све наведено време, у проучавању геологије Србије, имали испомоћ и подршку колега из иностранства који су деловали обично као појединци. До Првог светског рата претежно то су били аустријски, немачки и ретки мађарски и бугарски геолози. Између два рата овде су радили углавном Немци и два Енглеза. Непосредно после Другог светског рата, кратко време, помагали су немачки и руски специјалисти за минералне сировине, а после француски докторанди са Сорбоне. Њихово учешће у раду на нашим теренима било је корисно јер су се тако укрштале методе рада различитих школа и интерпретација са нашим гледиштима и резултатима. У последње време дошло је до занимљиве инверзије, у домаћим теренима раде стране фирме са службама састављеним претежно од наших домаћих геолога.

Финансирање
Ово истраживање није имало екстерно финансирање.

Сукоб интереса
Аутор изјављује да нема било какав финансијски, професионални или лични сукоб интереса који би могао утицати на објективност резултата и тумачење података представљених у овом раду. Ниједан од аутора није у позицији која би могла изазвати сумњу у непристрасност истраживања, нити је било директног или индиректног комерцијалног, институционалног или личног утицаја на израду рукописа. Уколико дође до промене околности, аутори ће благовремено обавестити уредништво.

Одрицање од одговорности / Напомена издавача: Изјаве, мишљења и подаци садржани у свим публикацијама су искључиво мишљење појединачних аутора/аутора и сарадника и не представљају ставове СГД и/или уредника. СГД и/или уредници одричу се одговорности за било какве повреде личности или имовине које могу настати као резултат било којих идеја, метода, упутстава или производа на које се упућује у садржају.

Zapisnici SGD, 68-1, 15-23 (2026)
ORIGINAL PAPER / ОРИГИНЛАНИ РАД
doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.18879120

Geology in the Culture of Language and Art

Lidija BEKO[1]*

[1]University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, Djusina 7, 11000 Belgrade, Serbia.
*Corresponding Author e-mail: lidija.beko@rgf.bg.ac.rs

Abstract: The offered paper explores the dynamic intertwining of geology and art, focusing on how geology and geological artifacts have influenced artistic imagination from ancient times to the present day. The connection between geology and art reveals how the materiality of the Earth and its long–term processes have shaped human aesthetic imagination, turning drawings and maps not only into geological technical and physical forms but also into catalysts for art and language. The paper is divided into three parts, elaborating the idea of geo–aesthetics and linguistics through sections on Georgius Agricola, author of the Renaissance masterpiece on geology, mining, and metallurgy; then on artistic and architectural objects of great beauty and cultural significance created in or from stone; and finally on the Rosetta Stone itself as a stele of historical, linguistic, and civilizational importance. Without the ambition to encompass the full scope and significance of this multidisciplinary connection, our intention is to modestly enrich geology with the legacy of art and culture that surrounds us, awaiting us to become its interpreters for a fraction of a time.

Keywords: geology; language; art; Agricola; Rosetta Stone; Ithra.
Article history: <Manuscript received 3 July 2025. - Accepted 27 February 2026>

Геологија у култури језика и уметности

Лидија БЕКО[1]*

[1]Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, 11000 Београд, Србија.
*Контакт одговорног аутора: lidija.beko@rgf.bg.ac.rs

Апстракт: Понуђени рад истражује динамично преплитање геологије и уметности фокусирајући се на то како су од давнина до данашњих дана геологија и геолошки артефакти утицали на уметничку машту. Веза између геологије и уметности открива како су материјалност Земље и њени процеси у дугим временским интервалима обликовали људску естетску имагинацију стварајући од цртежа и мапа не само геолошке техничке и физичке форме, већ катализаторе уметности и језика. Рад је подељен на три дела елаборирајући идеју геоестетике и лингвистике и кроз одељке о Георгију Агриколи, аутору ренесансног ремек–дела о геологији, рударству и металургији, потом о уметничким и грађевинским објектима велике лепоте и културног значаја створених у или из камена, а на крају и о самом Розетском камену као стели историјског, лингвистичког и цивилизацијског значаја. Без претензија да се радом може дати и назнака обима и значаја поменутог вишедисциплинарног споја, намера нам је да наставом и овим радом геологију обогатимо легатом уметности и културе која нас окружује и очекује да јој будемо тумачи.

Кључне речи: геологија; језик; уметност; Агрикола; камен из Розете; Итра.

Хронологија: <Рад примљен 3. јули 2025. - Прихваћен 27. фебруар 2026>

CC BY

1. Наука и култура

Наука и култура представљају изразе два највиша степена људског интелекта. Мада припадају заједничком културном наслеђу човечанства, тренутно се сматрају потпуно диспаратним, особеним, чак и супротстављеним. На штетну поделу науке и културе већ су указивале многе престижне личности, упозоравајући да она западну културу води у озбиљан проблем. Чарлс Перси Сноу, британски физичар и романописац, након предавања одржаног у Кембрицу под називом „Две културе“ 1959. године, објавио је истоимену књигу износећи свој апел у корист зближавања научника и хуманиста (Snow, 1959). „Јаз међусобног разумевања“, тврдио је Сноу, представља главну препреку и ометање напретка обе културе, умању-јући способност друштва да реши глобалне проблеме попут сиромаштва и глади. Наука и култура имају много тога заједничког: Наука покушава да разуме свет на основу знања акумулираног током времена, на основу репродуктивних резултата и доказаних и верификованих чињеница, тражећи упориште у логици и објективности. Хуманистичке науке и уметност, са своје стране, изражавају поглед на свет кроз визуелне, језичке или аудио ресурсе, путем којих изражавамо идеје, перцепције, емоције и сензације. Међутим, креативност је подједнако важна за научни метод као и за уметнички процес. Научници и уметници имају заједничку радозналост за непознато, дивљење према лепоти и страст за стварањем нечег новог. Вагенсберг (Wagensberg, 2015) сматра да је интуиција присутна у стварању и науке и уметности. Међутим, научници могу разумети без потребе за интуицијом, док уметници могу интуитивно схватити без потребе за разумевањем. За истог аутора, најрелевантнији однос између науке и уметности настаје када уметници пружају научна сазнања научницима и када научници пружају уметничка разумевања уметницима (Wagensberg, 2015).

2. Ренесансни спој науке и уметности на примеру Агриколе

Георгиј Агрикола (1494–1555), у свом капиталном делу „De Re Metallica“ (Agricola, 1950) о геолошким, рударским и металуршким студијама, поставио је висок стандард научне комуникације (слика 1). Агрикола, или Георг Бауер како му је било грађанско име, схватио је да се знање најбоље преноси не само речима, већ и цртањем или јасним визуелним приповедањем, што представља ставове који су и данас научно релевантни. Његово ремек–дело ране научне литературе указало је да би се наука добро проучила, аутор мора бити посматрач, тумач, уметник и песник, јер геологија, можда више од већине наука, захтева ову синтезу. Стога су дрворези, вероватно израђени под Агриколиним надзором од стране вештих мајстора, уметнички префињено и са уравнотеженом композицијом и реалистичним приказима, осликали живот и свет рудара, алата и пејзажа давног шеснаестог века. Чак и вековима касније, илустрације су и даље визуелно привлачне и информативне приказујући не само механичке детаље, већ и људски, митолошки и еколошки контекст рударства.

3. Уметност и духовност уклесани у камену

Мотив „уметности уклесане у камену“ метафора је која спаја људску креативност и геолошку трајност. Узимајући земљине ресурсе не само као стенски материјал већ и као коаутора, уметнички стваралаци давали су значајан допринос да планетарна еволуција и људско стваралаштво буду спојени у јасно и незаборавно заједничко постојање. Тиме и геологија престаје да буде удаљена као наука. Геологија и камена архитектура одавно су постале сведочанство људске домишљатости, културног идентитета и култа геоестетског респекта. УНЕСКО-ва светска баштина пружа о томе илустративне примере: од ружичастог града Петре, исклесаног у пешчару Јордана (Унеско, 1985), до колосалних седећих фигура у Абу Симбелу у Египту (Унеско, 1979), потом величанственог храмовног комплекса Ангкор Ват у Камбоџи (Унеско, 1992), историјских будистичких пећинских храмова Аџанте (слика 2) и Елоре, као и комплекса Тај Махал у Индији (сви заштићени одредбом УНЕСКО–а из 1983). Све наведене грађевине представљају спој људске креативности и геолошке монументалности које осликавају геоестетску сензибилност која на најбољи начин поштује платно и сарадника (Zalasiewicz et al., 2008).

Слика 1. Георгиј Агрикола: „De Re Metallica“ (1556) садржи 12 поглавља (књига) и изузетно је добро илустрована, са сликама које прате текстове о геологији, инжењерству, минералогији и рударским активностима.
Figure 1. Georgius Agricola: De Re Metallica (1556) contains 12 chapters (books) and it is extraordinarily well illustrated, with images which describe the texts about geology, engineering, mineralogy and mining activities.

Слика 2. Пећине Аџанта, смештене у близини Аурангабада у Махараштри.
Figure 2. The Ajanta Caves, nestled near Aurangabad in Maharashtra.

Плод те идеје – Светски културни центар Итра у Саудијској Арабији (слика 3) – један је од најмодернијих центара културе и обухвата библиотеку са преко 315.000 књига за све узрасте, велику изложбену салу, галерије, оперу, биоскопску салу, интегрисану уметност локалних и међународних уметника, као и музеј и архив који повезују културни живот центра са прошлошћу и самим коренима друштва из којег је настао. Лепота овог здања дубоко је укорењена у њеном физичком и симболичком пејзажу.

Пројектована је као група волуминозних облутака где се сваки сегмент органски уздиже из пустињске регионалне подлоге. Главна зграда као геолошка метафора представља прошлост која се пружа ка небу да би симболизовала будуће иновације, епиграфско знање створено унутар своје минералне матрице. Као извор светлости и историјских капија у пустињама, Итра је живи палимпсест на коме савремена уметност, културна писменост и регионална геологија учествују у константном дијалогу подстичући вишејезички говор и шапат.

Слика 3. Центар за светску културу краљ Абдулазиз (Итра) у Дахрану, Саудијска Арабија 1
Figure 3. King Abdulaziz Centre for World Culture (Ithra) in Dhahran, Saudi Arabia

4. Језик уклесан у камену из Розете

Идиом „уклесан у камену“, који је већ поменут, а који евоцира трајност и непроменљивост, није дакле само језички украс, реторски орнамент, већ део ризница мултидисциплинарног регистра који чува људске вредности кроз стену, симболе и време. Метафора црпи своју дуговечност директно из материјалности Земље – камена, геолошке основе на којој су цивилизације буквално и симболички изграђене. У том смислу, језик постаје стратификовани архив који кодира културно памћење, баш као што геолошки слојеви кодирају Земљину историју. Као што је Сапир (Sapir, 1921) постулирао, језик није само канал за мисао, већ „велика сила кохезије у људској култури“, обликујући је и бивајући обликована културним и материјалним светом.

Један занимљив пример илустрације поменутог идома је камен из Розете, који датира из 196. године пре нове ере, из времена владавине Птолемеја V Епифана. Њу је у близини Розете (Рашида) у Египту открио француски инжењер Бушар током Наполеонових похода (Енциклопедија Британика). Након капитулације Александрије 1801. године, камен је однет у Британију и од тада се налази у Британском музеју представљајући најпосећенији експонат (слика 4).

Слика 4. Камен из Розете – гранодиоритна стела са урезаним истим текстом на три писма: хијероглифско, демотско и грчко.

Figure 4. Rosetta Stone — a granodiorite stele inscribed with the same text in three scripts: hieroglyphic, demotic, and Greek.

Розетски камен, како се још назива, направљен је од ситнозрног гранодиорита – понекад се погрешно сматра базалтом – који је вероватно вађен у каменолому близу Асуана. Фрагмент чија је издржљивост сачувала натписе, омогућавајући модерно излагање и проучавање, приближно је димензија 112×76×28 cm и део је веће стеле некада изложене у храму, вероватно у Саису. Лингвистички натпис на три писма, декрет, открива културну хијерархију: хијероглифи су религијски/формални језик, демотски су свакодневни египатски језик, а старогрчки је административни/класа Птолемеја. Овај трилингвални натпис, који је кључан за декодирање египатских хијероглифа, омогућио је да се декодира целокупно древно поље египтологије.

Камен из Розете на најбољи начин демонстрира вишедисциплинарност трагедије и тријумфа живота јер сви долазимо у различитим облицима и величинама. Неки од нас су премештени много километара од наших првобитних домова, док други остају у својим родним градовима целог живота. Што дуже проучавамо геологију и уметничке артефакте, настале из камена, то више разумемо сложену причу о човеку: његову трагедију као неминован део губитка и растанка, али и његов тријумф као способност да упркос томе остави трајан и смислен траг. Чување и неговање камена, као симбола живота и уметности, постаје тако и чување саме људскости, где се трагедије преображавају у победе памћења и смисла.

Закључак

Геологија, култура и језик су међусобно конститутивни цивилизацијски блокови, а њихово раздвајање значи погрешно тумачење сложености људског живота. Данас су научне области често атомизоване у силосе оптерећене подацима. Уметност и култура не би требало у природним и техничким наукама да буду „додаци" или „метафоре", већ суштина начина на који учимо и повезујемо се. Као што је Харавеј (1988) тврдила, знање је увек ситуационо, али исто тако холистичка педагогија није ништа друго него прихватање тог феномена са осврtом да поглед на испитивану област треба да буде увек научно радознао, али и топао и емотиван. Агрикола, који се као лекар и природњак успешно бавио геологијом, рударством и минералогијом, правилно је упарио сочива научног и занатског са естетски лепим, остављајући своје ремек–дело за пример поменутих спојева. Концепт стене или камена, човека и уметности могао би поетски или метапоетски да заврши овај рад закључком да што више познајемо геологију, уметничке артефакте геологије па тиме и стене, све више негујемо њену добробит и постојање, чувамо тријумфе и отклањамо и смањујемо трагедије. Розетски камен симболички отелотворују парадокс човекове судбине, трагедију измештања и тријумф трајања. Наука, уметност и језик нису три света, већ три гласа једне исте стварности. Речи нису само средства да опишемо научно откриће – оне су често његово место рођења. Зато, да бисмо разумели стварност у њеној целокупности, морамо читати оба рукописа и језик културе и језик науке; и тишину уметности и буку доказа. Тек тада свет постаје целокупан – не само схваћен, већ и проживљен.

Финансирање

Ово истраживање је подржано од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије по основу уговора 451-03-34/2026-03/ 200126 и 451-03-33/2026-03/ 200126.

Сукоб интереса

Аутори изјављују да немају било какав финансијски, професионални или лични сукоб интереса који би могао утицати на објективност резултата и тумачење података представљених у овом раду. Ниједан од аутора није у позицији која би могла изазвати сумњу у непристрасност истраживања, нити је било директног или индиректног комерцијалног, институционалног или личног утицаја на израду рукописа. Уколико дође до промене околности, аутори ће благовремено обавестити уредништво.

Литература - References

Agricola, G. (1950). *De Re Metallica*. (Translated by: Herbert Clark Hoover & Lou Henry Hoover). New York: Dover Publications, Inc.

Encyclopaedia Britannica, Inc. (n.d.). Rosetta Stone. In Britannica. Retrieved June 30, 2025, from https://www.britannica.com/topic/Rosetta-Stone.

Haraway, D. (1988). Situated Knowledges: The Science Question in Feminism and the Privilege of Partial Perspective. *Feminist Studies*, vol. 14, no. 3, pp. 575–599.

Sapir, E. (1921). *Language: An Introduction to the Study of Speech*. New York: Harcourt, Brace and Company.

Snow, C.P. (1959). *The Two Culture and the Scientific Revolution*. Oxford University Press.

UNESCO – The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. https://www.unesco.org/en .

Wagensberg, J. (2015). Science, art and revelation: Or chromatic theory for interdisciplinary knowledge. *MÈTODE Science Studies Journal*, 5, pp. 217–221. University of Valencia. https://doi.org/10.7203/metode.0.4259

Zalasiewicz, J., Barry, L.T., Williams, M. & Cantrill, D.J. (2008). Are we now living in the Anthropocene?. *GSA Today*, 18 (2), pp. 4–8. https://doi.org/10.1130/GSAT01802A.1

1. Introduction: Science and Culture

Science and culture represent two of the highest expressions of human intellect. Although they belong to the shared cultural heritage of humanity, they are currently regarded as completely disparate, distinctive, and even opposed. Many distinguished figures have already pointed to this harmful division between science and culture, warning that it leads Western culture into serious trouble. Charles Percy Snow, a British physicist and novelist, after his 1959 Cambridge lecture entitled "The Two Cultures", published a book of the same name, making an appeal for bringing scientists and humanists closer together (Snow, 1959). The "gap of mutual understanding", Snow argued, is a major obstacle, hindering the progress of both cultures and diminishing society's ability to solve global problems such as poverty and hunger.

Science and culture have much in common: science seeks to understand the world based on knowledge accumulated over time, on reproducible results, and proven, verified facts, striving toward logic and objectivity. Meanwhile, the humanities and the arts express a view of the world by means of visual, linguistic, or audio resources, through which we convey ideas, perceptions, emotions, and sensations. However, creativity is equally important for the scientific method as it is for the artistic process. Scientists and artists share a curiosity for the unknown, an admiration for beauty, and a passion for creating something new. Wagensberg (2015) argues that intuition is present in the creation of both science and art. However, scientists can understand without the need for intuition, while artists can intuitively grasp without the need for understanding. For the same author, the most relevant relationship between science and art arises when artists provide scientific insights to scientists, and when scientists provide artistic understanding to artists (Wagensberg, 2015).

2. The Renaissance Union of Science and Art on the Example of Agricola

Georgius Agricola (1494–1555), in his seminal work De Re Metallica exhibit (figure 1) on geological, mining, and metallurgical studies, set a high standard for scientific communication (Agricola, 1950). Agricola, or Georg Bauer as his given name was, understood that knowledge is best conveyed not only through words but also through drawing and clear visual storytelling – an approach that remains scientifically relevant to this day. His masterpiece of early scientific literature showed that to study science properly, the author must be an observer, interpreter, artist, and poet, because geology, perhaps more than most sciences, demands this synthesis.

Therefore, the woodcuts – likely produced under Agricola's supervision by skilled craftsmen—were artistically refined, with balanced composition and realistic depictions, portraying the life and world of miners, their tools, and the landscapes of the distant sixteenth century. Even centuries later, the illustrations remain visually appealing and informative, depicting not only mechanical details but also the human, mythological, and environmental context of mining.

3. Art and Spirituality Carved in Stone

The motif of "art carved in stone" is a metaphor that unites human creativity and geological permanence. By embracing the Earth's resources not merely as raw material but as a co–author, artistic creators have made a significant contribution to fusing planetary evolution and human creativity into a clear and unforgettable shared existence. In this way, geology ceases to be distant as a science. Geology and stone architecture have long stood as testimony to human ingenuity, cultural identity, and the cult of geo–aesthetic reverence. UNESCO World Heritage offers illustrative examples of this: from the rose–red city of Petra, carved into Jordanian sandstone (UNESCO, 1985), to the colossal seated figures at Abu Simbel in Egypt (UNESCO, 1979), then the magnificent Angkor Wat temple complex in Cambodia (UNESCO, 1992), the historic Buddhist cave temples of Ajanta and Ellora exhibit (figure 2), as well as the Taj Mahal complex in India (all protected under UNESCO since 1983). All these structures represent a fusion of human creativity and geological monumentality, reflecting a geo–aesthetic sensibility that honors the canvas and collaborator in the best possible way (Zalasiewicz et al., 2008).

The fruit of this idea – the Ithra World Culture Center in Saudi Arabia exhibit (figure 3)— is one of the most modern cultural centers and includes a library with over 315,000 books for all ages, a large exhibition hall, galleries, an opera house, a cinema hall, integrated art by local and international artists, as well as a museum and archive that connect the cultural life of the center with the past and the very roots of the society from which it emerged. The beauty of this edifice is deeply rooted in its physical and symbolic landscape.

Designed as a cluster of voluminous pebbles, each segment of the Ithra Center organically rises from the regional desert base. The main building, as a geological metaphor, represents the past reaching toward the sky to symbolize future innovations – epigraphic knowledge formed within its mineral matrix. As a source of light and historical gateways in the deserts, Ithra is a living palimpsest in which contemporary art, cultural literacy, and regional geology engage in constant dialogue, inspiring multilingual speech and whisper.

4. Language Carved in the Rosetta Stone

The idiom "carved in stone", already mentioned and evocative of permanence and immutability, is not merely a linguistic embellishment or rhetorical ornament, but part of a multidisciplinary register that preserves human values through stone, symbols, and time. The metaphor draws its longevity directly from the Earth's materiality – stone, the geological foundation upon which civilizations have been both literally and symbolically built. In this sense, language becomes a stratified archive that encodes cultural memory, just as geological layers encode Earth's history. As Sapir (1921) postulated, language is not merely a vehicle for thought but "a great force of cohesion in human culture," shaping and being shaped by the cultural and material world.

A compelling illustration of this idiom is the Rosetta Stone, dating back to 196 BCE, during the reign of Ptolemy V Epiphanes. It was discovered near Rosetta (modern–day Rashid) in Egypt by the French engineer Bouchard during Napoleon's campaigns (Encyclopaedia Britannica). After the capitulation of Alexandria in 1801, the stone was taken to Britain, where it has remained in the British Museum as its most visited exhibit (figure 4).

The Rosetta Stone, as it is known, is made of fine–grained granodiorite – often mistakenly thought to be basalt—which was likely quarried near Aswan. This fragment, whose durability preserved the inscriptions for modern study and display, measures approximately 112 × 76 × 28 cm and is a portion of a larger stele once displayed in a temple, likely in Sais. The trilingual inscription—a decree—reveals a cultural hierarchy: Hieroglyphs as the religious/formal language, Demotic as the everyday Egyptian script, and ancient Greek as the administrative language of the Ptolemaic class. This trilingual text was key to deciphering Egyptian hieroglyphs and opened the entire ancient field of Egyptology to the modern world.

"Rosetta" exemplifies the multidisciplinary nature of life's tragedy and triumph: we all come in different forms and sizes. Some of us are transported thousands of kilometers from our original homes, while others remain in their hometowns for life.The longer we study geology and artistic artifacts created from stone, the more we understand the complex story of humanity: its tragedy as an inevitable part of loss and separation, but also its triumph as the ability, in spite of everything, to leave a lasting and meaningful trace. Preserving and cherishing stone, as a symbol of life and art, thus becomes the preservation of humanity itself, where tragedies are transformed into victories of memory and meaning.

Conclusions

Geology, culture, and language are mutually constitutive blocks of civilization, and separating them leads to a misinterpretation of the complexity of human life. Today, scientific fields are often atomized into data–laden silos. Art and culture should not be seen as mere "add–ons" or "metaphors" in natural and technical sciences, but rather as the very essence of how we learn and connect. As Haraway (1988) argued, knowledge is always situated, yet holistic pedagogy is nothing more than embracing this phenomenon with the understanding that the perspective on the studied field should always be scientifically curious, but also warm and emotional.

Agricola, who as a physician and naturalist successfully engaged in geology, mining, and mineralogy, rightly combined the lenses of science and craft with aesthetic beauty, leaving his masterpiece as an example of these connections. The multifaceted concept of stone or rock, humanity, and art could poetically or meta poetically

conclude this work by stating that the more we get to know geology and its artistic artifacts, the more we nurture its wellbeing and existence, preserving triumphs and reducing tragedies.The Rosetta Stone symbolically embodies the paradox of human destiny—the tragedy of displacement and the triumph of endurance.

Science, art, and language are not three separate worlds but three voices of the same reality. Words are not merely tools to describe a scientific discovery – they are often the very place of its birth. Therefore, to understand reality in its wholeness, we must read both manuscripts: the language of culture and the language of science; the silence of art and the noise of evidence. Only then does the world become whole – not just understood but truly lived.

Одрицање од одговорности / Напомена издавача: Изјаве, мишљења и подаци садржани у свим публикацијама су искључиво мишљење појединачних аутора/аутора и сарадника и не представљају ставове СГД и/или уредника. СГД и/или уредници одричу се одговорности за било какве повреде личности или имовине које могу настати као резултат било којих идеја, метода, упутстава или производа на које се упућује у садржају.

Zapisnici SGD, 68-1, 25-37 (2026)
ORIGINAL PAPER / ОРИГИНЛАНИ РАД
doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.18879177

3D voxel-based lithological modelling in GIS: the influence of borehole scope and spatial pattern

Ksenija MICIĆ[1,2]*

[1]University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Bulevar kralja Aleksandra 73, Belgrade, Serbia.
[2]University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Đušina 7, Belgrade, Serbia.
*Corresponding Author e-mail: kmicic@grf.bg.ac.rs

Abstract: Over the past decades, with the development of digital tools and technologies, geotechnical engineering practice has shifted from traditional ground modelling procedures toward data-rich 3D models capable of representing geological-geotechnical complexity more realistically. The foundation of such models is represented by the field investigation data. In this regard, a key question remains open: what investigation scope is required, and how should it be optimally distributed in space to achieve reliable model predictions and maximize the information gain? In this study, Empirical Bayesian Kriging is employed in a GIS environment to generate 3D voxel-based lithological models. Subsets ranging from 10 to 70 investigation boreholes are analyzed, grouped into different spatial distribution patterns. The accuracy of lithology prediction is evaluated against an independent set of validation boreholes and relative to a quasi-reference model based on all 94 boreholes. The standard error of prediction is used as an indicator of uncertainty, introducing a threshold-based approach. The results show increasing prediction accuracy and decreasing uncertainty with a higher number of boreholes and with their optimal spatial arrangement, especially for models with poor investigation coverage.

Keywords: lithology model; ground model; investigation boreholes; GIS; kriging; uncertainty.

Article history: <Manuscript received 21 January 2026. - Accepted 4 March 2026>

3Д воксел литолошко моделирање у ГИС окружењу: утицај обима и просторног распореда истражних бушотина

Ксенија МИЦИЋ[1,2]*

[1]Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија.
[2]Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, Београд, Србија.
*Контакт одговорног аутора: kmicic@grf.bg.ac.rs

Апстракт: Током последњих деценија, са развојем дигиталних алата и технологија, геотехничка пракса бележи помак са традиционалног моделирања тла/стена на 3Д моделе богате подацима и са могућношћу реалнијег приказа геолошко-геотехничке комплексности. Темељ оваквих модела чине подаци из теренских истражних радова. С тим у вези, кључно питање остаје отворено: колико истражних радова је потребно и како их оптимално распоредити у простору, како би се унапредила поузданост предиктивних модела и искористила информативна вредност постојећих података? У овом раду примењен је емпиријски бајесов кригинг у ГИС окружењу за генерисање 3Д воксел литолошких модела. Анализирани су подскупови од 10 до 70 истражних бушотина, груписани у различите просторне распореде. Тачност предвиђања литологије анализирана је помоћу независног сета валидационих бушотина и у односу на квази-референтни модел базиран на свих 94 бушотина. Стандардна грешка предвиђања коришћена је као индикатор непоузданости уз приступ заснован на граничној вредности. Резултати показују пораст тачности предвиђања и смањење непоузданости са растом броја бушотина и са њиховим оптималним просторним распоредом, посебно у домену модела са ограниченом густином истраживања.

Кључне речи: литолошки модел; модел подлоге; истражне бушотине; ГИС; кригинг; непоузданост.

Хронологија: <Рад примљен 21. јануар 2026. - Прихваћен 4. март 2026>

1. Увод

Тродимензионални инжењерско-геолошки модели постали су обавезни у геотехничком пројектовању и планирању подземног простора, обзиром на то да геометрија литолошких средина, као и просторна променљивост, директно утичу на исходе нумеричких анализа и инжењерске одлуке (Wang & Tian, 2024). Њихова примена, садржај и начин израде дефинисани су у оквиру смерница за употребу Еврокода 7 друге генерације: Геотехнички дизајн (Garin et al., 2024). У пракси, истражне бушотине представљају један од примарних извора знања на којем ови 3Д модели почивају, али финансијска и временска ограничења често утичу на њихов смањени обим и просторну покривеност (Wang & Tian, 2024). Ово је један од фактора који чини поузданo просторно издвајање литолошких слојева веома изазовним (Zhao et al., 2023; Qiu et al., 2024). С тим у вези, просторна интерполација и екстраполација постојећих података постаје неизбежан алат у неузоркованим зонама и формирању континуалних 3Д модела.

Тачност предвиђања не зависи само од броја бушотина, већ и од њиховог просторног распореда. Литолошка непоузданост по правилу расте са удаљеношћу од опсервираних података, а промене у густини могу значајно утицати на реалистичност и употребљивост модела (Gong et al., 2020; Wang et al., 2022; Tran et al., 2025). Ово отвара практично питање: колико је података довољно и како их оптимално распоредити у простору?

ГИС платформа, опремљена савременим геостатистичким алатима, пружа применљив оквир за систематско разматрање овог питања. Детерминистичке интерполационе методе имају ограничења у моделовању сложене просторне променљивости и квантификацији непоузданости, док алат за 3Д емпиријски бајесов кригинг омогућава аутоматизовано подешавање вариограмских параметара, што га чини погодним за бројне геолошке и геотехничке задатке. Иако примењиван у сврхе просторног предвиђања геотехничких механичких параметара, анализе квалитета подземних вода и загађености тла (Li et al., 2022; Zaresefat et al., 2024; Utepov et al., 2025), могућност његове употребе при просторном дефинисању граница литолошких средина на бази бушотина готово је неистражена (Abdelsattar & Hemdan, 2025).

У овом раду развијен је и тестиран аутоматизовани радни ток у *ArcGIS Pro* окружењу, заснован на геостатистичкој бајесовој интерполацији, и систематској процени утицаја обима и просторног распореда бушотина на резултате предвиђања у вокселизованом простору. У погледу структуре, остатак рада је организован на следећи начин: поглавље 2 садржи детаљан опис методологије литолошког моделирања у ГИС-у, као и опис студије случаја са посебним осврtом на формирање подскупова по броју и распореду истражних бушотина. У поглављу 3 дат је приказ евалуационих система који се користе за процену тачности и поузданости геостатистичког моделирања, док поглавља 4 и 5 разматрају добијене резултате, њихове импликације, као и најважније закључке.

2. Интерполационо литолошко моделирање у ГИС окружењу

Просторно издвајање литолошких јединица захтева примену процедура које подржавају мултимодалне и вишескалне податке, потпуну 3Д репрезентацију терена и итеративно параметарско унапређење модела, уз могућност интеграције са геотехничким анализама. Један од најчешће коришћених система за решавање оваквих задатака јесте *ArcGIS*, који представља напредну и свеобухватну платформу из породице Географских Информационих Система (ГИС). *ArcGIS* у геонаукама налази широку примену у интеграцији скупова просторних података, управљању комплексним алгоритмима за моделирање и примени напредних геостатистичких метода, у свему одржавајући рачунску ефикасност.

2.1 Емпиријски бајесов кригинг

Из широког спектра доступних алата, у овом раду примењен је емпиријски бајесов кригинг (ЕБК) за просторно предвиђање литологије на основу података из истражних бушотина.

Емпиријски бајесов кригинг представља геостатистички интерполациони приступ који у бајесов оквир интегрише итеративну процену параметара семивариограма, чиме је омогућено смањење степена

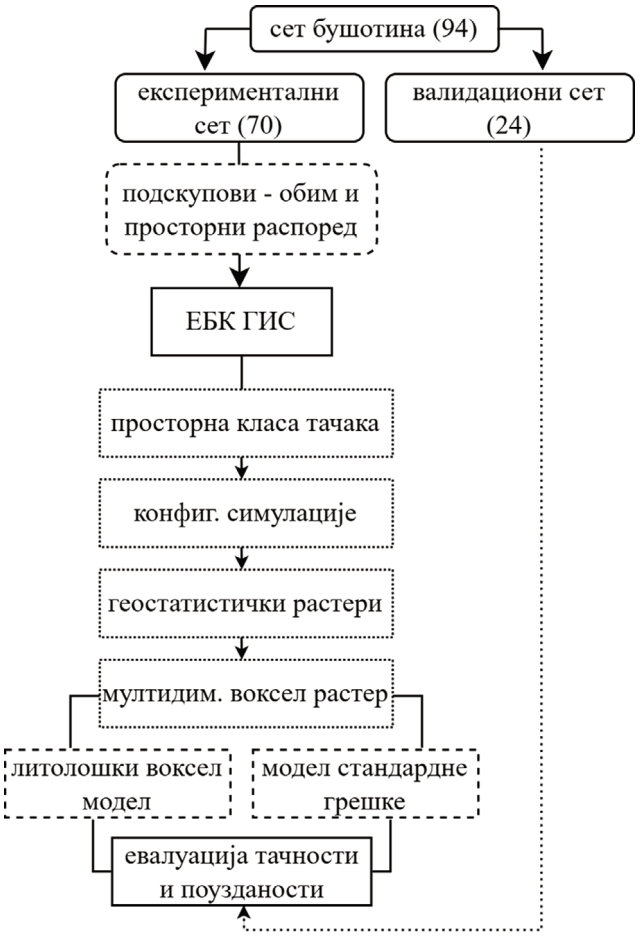
субјективности при моделирању. Семиваријограм представља основни геостатистички алат за дефинисање просторне зависности између променљивих, суштински описујући меру варијансе (Hohn, 1999). У рачунском моделу, опсервације z_i на локацијама s_i изражавају се као:

$$z_i = y(s_i) + \varepsilon_i, \qquad i = 1, \dots, K \qquad (1)$$

при чему је $y(s)$ базни Гаусов просторни процес, ε_i означава грешку мерења, а K је број посматрања (Gribov & Krivoruchko, 2020; Krivoruchko & Gribov, 2019).

По својој суштини, ЕБК процедура подразумева најпре процену параметара семиваријограма методом ограничене максималне веродостојности, а потом и генерисање више безусловних симулација ради формирања емпиријских априори скупова параметара. Сваки скуп параметара затим се тежински пондерише према вероватноћи да генерише опажене податке, а финална предвиђања на неузоркованим локацијама добијају се упросечавањем појединачних предвиђања срачунатих за сваки скуп параметара појединачно. У 3Д режиму у ArcGIS Pro окружењу, логика ЕБК алгоритма је аналогна, уз прилагођавање метрике растојања и дефинисања домена претраживања тродимензионалном простору (Esri, 2025).

У овој студији, 3Д воксел литолошки модели генерисани су применом ЕБК алгоритма у *ArcGIS Pro* верзији 3.5.0 у неколико корака који су детаљно обрађени у наставку и приказани на дијаграму тока на Слици 1. Припрема улазних података за просторно предвиђање подразумева трансформацију картираних литолошких интервала из бушотина у класу просторних тачака која садржи 3Д координате и одговарајући литолошки индекс. Нумерички литолошки индекс додељен је на бази редоследа појављивања литолошких чланова у репрезентативној бушотини – почев од уста бушотине, до њеног дна, тако да први интервал носи индекс 1, а последњи 6. Након тога следи конфигурација ЕБК симулације и то: модела семиваријограма, величине анализираног подскупа и броја симулација, при чему је, по потреби, могуће извршити и трансформацију података. Вертикална анизотропија, као и просторна променљивост узимају се у обзир помоћу фактора уклањања тренда и фактора увећања висинске компоненте. Последњи корак у припреми алгоритма за прорачун јесте подешавање параметара домена претраживања: радијус претраге, шема секторизације и број суседа. Крајњи корак у формирању литолошких модела јесте рекласификација континуалних ЕБК резултата у дискретне литолошке јединице, како би се нумерички резултат интерполације трансформисао у податке са директним геолошким значењем.



Слика 1. Дијаграм тока генерисања литолошких модела у ГИС-у применом ЕБК

Продукт ЕБК симулације складишти се у оквиру такозваног геостатистичког слоја који заправо представља низ хоризонталних пресека са резултатима предвиђања. Поред тога, овај слој садржи и путању до изворног скупа података, све параметре ЕБК интерполације и релевантне метаподатке за накнадно картографисање или поновну евалуацију. Геостатистички слој се потом користи за креирање мултидимензионалног воксел растера који складишти волуметријске податке у *NetCDF* формату.

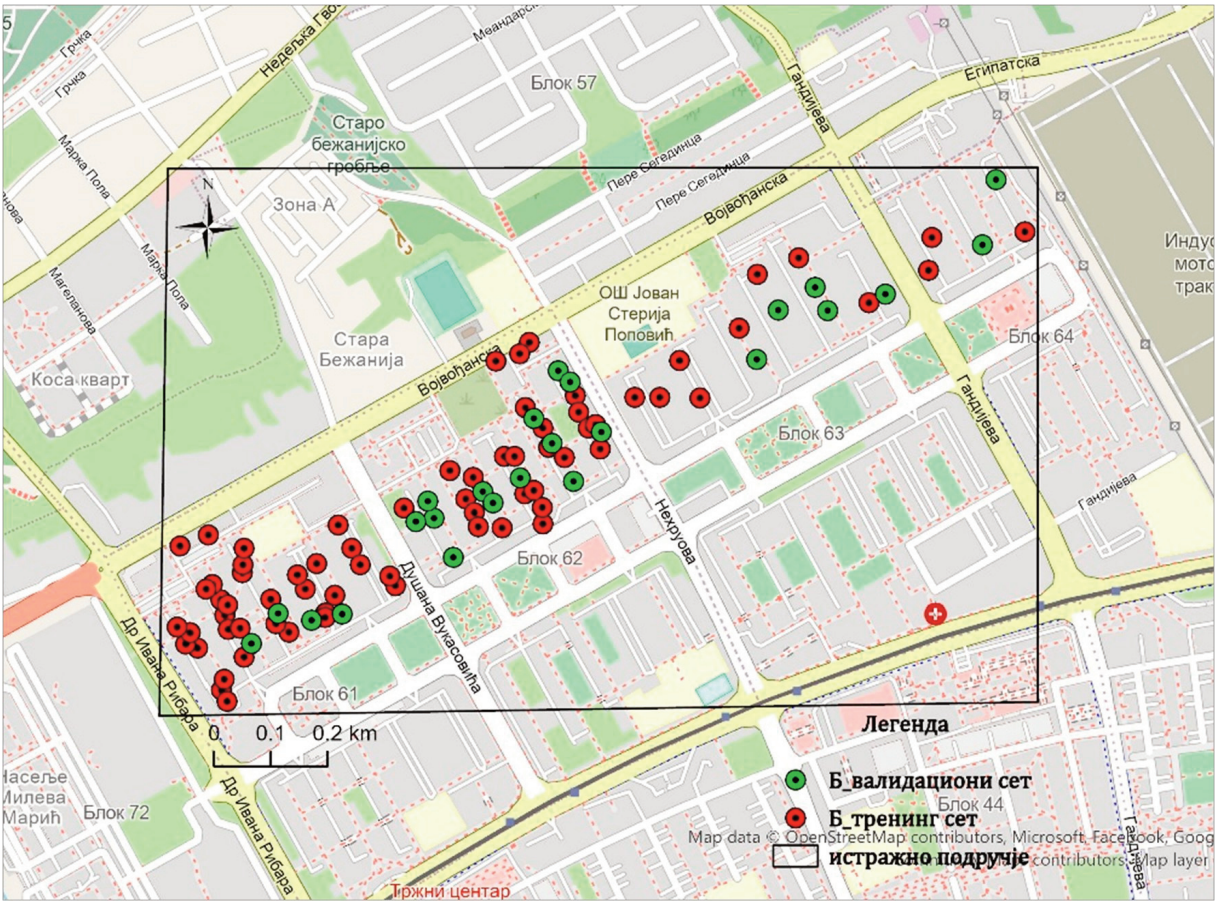
NetCDF је стандардизовани формат датотека са структуром података базираном на низовима, који је намењен складиштењу и размени различитих врста научних података (NSF Unidata, 2025; Rew & Davis, 1990). Воксел представља 3Д ћелију која може складиштити волуметријске и семантичке информације. У зависности од комплексности модела, воксели могу бити униформне или промењљивих димензија у простору (Micić et al., 2025). Воксели се у овом раду користе за репрезентацију дигиталног литолошког модела, као један од најбољих начина за приказ хетерогених геолошких информација и укључивање семантичких података (Khan et al., 2023).

Процедура моделирања је аутоматизована употребом *ArcPy*-ја, *Esri*-јеве свеобухватне *Python* библиотеке за просторну анализу, управљање и конверзију података (*Esri*, 2025).

2.2 Студија случаја

Базу ове студије чини сет података од 94 архивских истражних бушотина са подручја Новог Београда, односно локалитета блокова 61-64. Истражно подручје у оквиру којег су генерисани литолошки модели заузима површину од око 1.41 km2, представља урбану зону града, и углавном је сачињено од алувијалних седимената, са карактеристичном сменом прашинастих, глиновитих, песковитих и шљунковитих фракција. На Слици 2 дат је приказ положаја истражног подручја, као и распореда истражних бушотина.

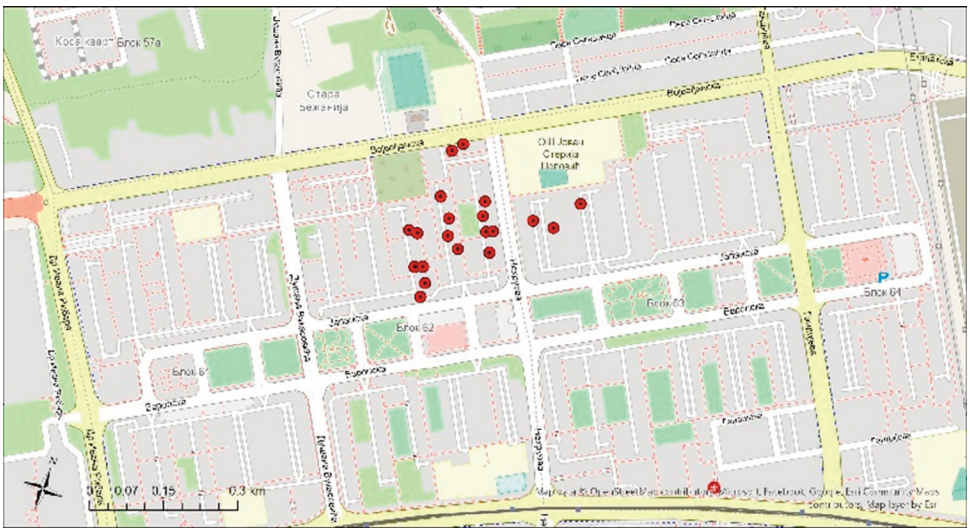
У циљу анализирања утицаја обима и просторног распореда бушотина на тачност и поузданост интерполационог моделирања, цео сет бушотина је подељен на експериментални и валидациони сет, тако да укупно 70 бушотина улази у састав првог, а независних 24 у састав другог (Слика 1). Потом је експериментални сет подељен на подскупове са растућим бројем бушотина, почев од 10, преко 20, 30, 50, до свих 70 истражних бушотина.



Слика 2. Истражно подручје са просторним распоредом истражних бушотина

За моделе од 10 до 30 бушотина, сваки просторни распоред броји по 5 могућих сценарија. За модел са 50 бушотина формиран је по један сценарио за сваки тип, обзиром на немогућност детерминације различитих типова код велике густине истраживања у односу на укупан број. Модел са 70 бушотина има један јединствени просторни распоред. Примери просторног распореда по моделима са различитим обимом бушотина приказани су на Слици 3.

а)



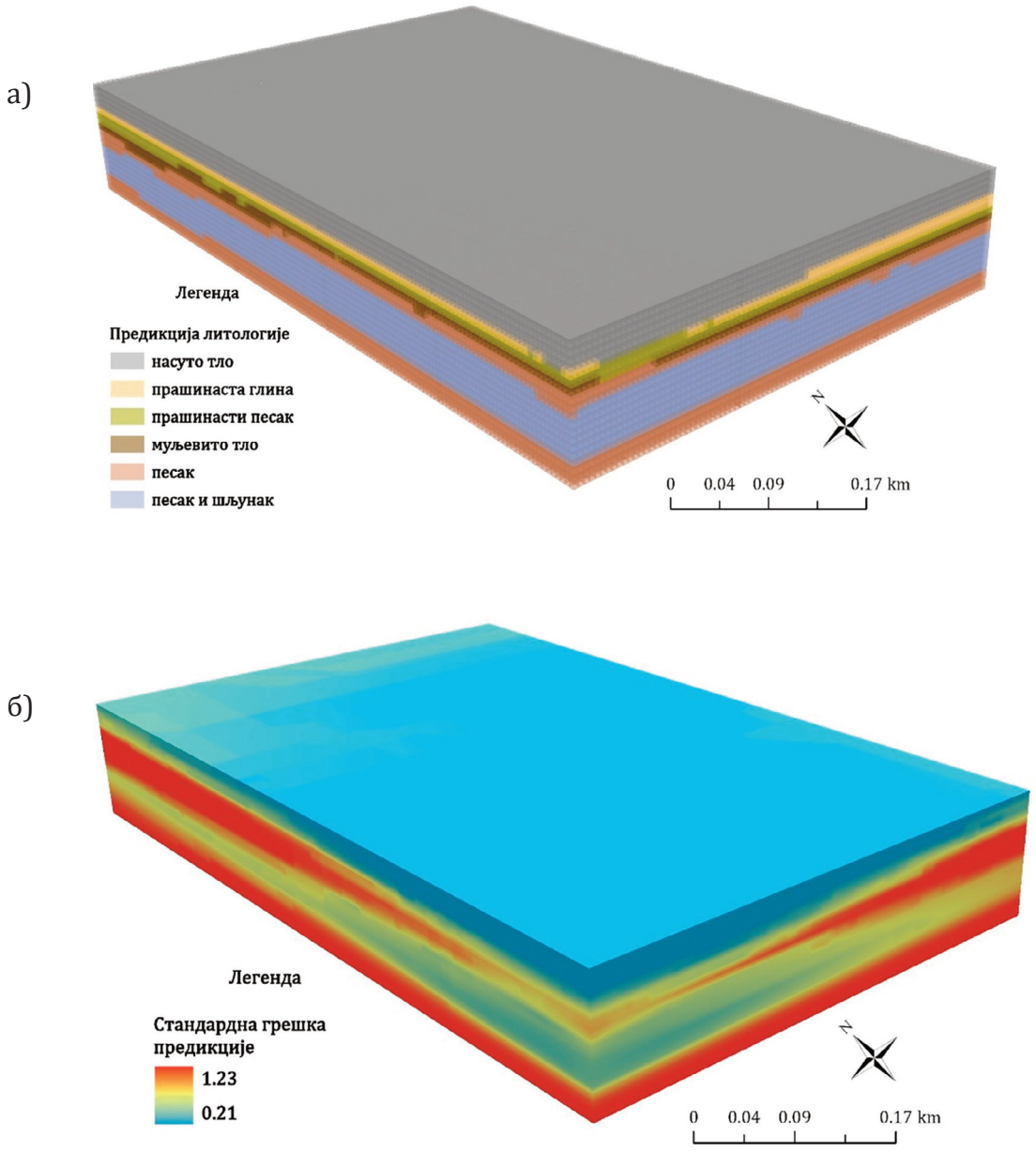
б)

ц)

Слика 3. Типови просторног распореда бушотина: а) кластерован, б) насумичан и ц) добро распоређен

Сваки могући сценарио је, дакле, улазни сет података за ЕБК симулацију, тако да се добије литолошки воксел модел, али и модел стандардне грешке предикције. На Слици 4 је дат пример генерисаних модела – литолошког воксел модела и модела стандардне грешке за 20 бушотина и насумични просторни распоред. Сви модели су у последњем делу методолошког процеса предмет евалуације предиктивне тачности и поузданости.

Овде је још важно напоменути да је за потребе примене вишенивојских евалуационих система конструисан такозвани квази-референтни литолошки модел, и то на бази свих 94 бушотина. Овај модел представља референтну апроксимацију која користи максималну густину података по усвојеном моделирајућем приступу, и служи у сврхе релативног поређења са моделима са редукованом густином улазних података за предвиђање.



Слика 4. Продукти ЕБК симулације: а) литолошки модел и б) модел стандардне грешке предвиђања

3. Евалуација тачности и непоузданости модела

За евалуацију тачности и непоузданости оформљена су два система, која у својој реализацији користе и специфичне али и заједничке улазне податке. Процес евалуације спроведен је у *Python* окружењу коришћењем библиотека: *numpy*, *pandas*, и *scikit-learn*.

3.1 Систем за процену тачности

Тачност предвиђања евалуира се на два начина: поређењем са независним сетом валидационих бушотина и поређењем са квази-референтним моделом, од којих сваки броји по три нивоа евалуације.

Код првог начина, процењују се тачност на бази доминантне зоне тла, тачност на нивоу воксела и стандардна класификациона метрика. Тачност на бази доминантног литолошког интервала подразумева поређење стуба валидационе бушотине и еквивалентног стуба воксел модела, тако да се воксел интервалу додели најчешћи литолошки тип у оквиру свих воксела који припадају интервалу дефинисаном према валидационом стубу. Тачност на нивоу воксела подразумева исто поређење, али без додељивања доминантног литолошког типа, већ процену тачности сваког појединачног воксела у оквиру интервала. Класификациона метрика обухвата стандардне евалуаторе попут: Коен капа коефицијента, Метјуовог коефицијента корелације, коефицијента балансиране тачности, прецизности, макро-F1 скора, итд.

Код поређења са квази-референтним моделом, најпре се оцењује глобална тачност модела на нивоу воксела. Потом се процењује воксел тачност у зонама граница слојева, при чему се воксел сматра граничним уколико у X, Y или Z правцу има бар један суседни воксел другачијег литолошког типа. На крају се анализирају зоне растуће удаљености од тренинг бушотина, у тзв. биновима од 20, 50, 100 и 200 метара.

3.2 Систем за процену непоузданости

Систем за процену непоузданости предвиђања у потпуности се ослања на анализу модела стандардне грешке произведених у *ArcGIS*-у, и укључује 4 нивоа евалуације.

Анализа непоузданости најпре подразумева прорачун глобалне статистичке метрике (максимална/минимална стандардна грешка, стандардна девијација, коефицијент варијације, итд). Након тога, аналогно процени тачности, процењује се и непоузданост у зонама граница слојева, као и у зонама растуће удаљености од валидационих бушотина, односно од извора знања. Потом се анализира удео домена високе непоузданости у моделима и то у односу на граничну вредност стандардне грешке. У овој студији, гранична вредност стандардне грешке износи 1.0 (сса једна литолошка категорија), усвојена на бази итеративног поступка и анализе резултата за добијене моделе.

4. Резултати и дискусија

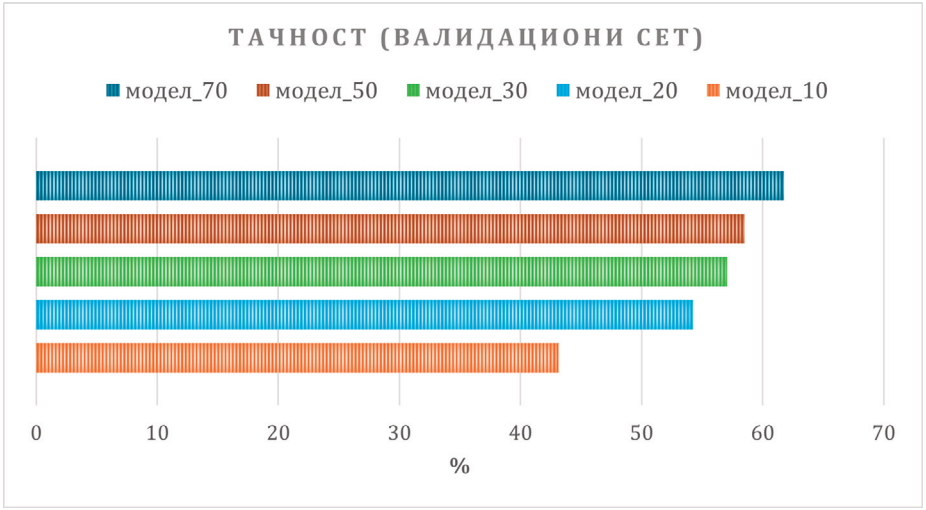
На Слици 5 приказана је просечна тачност предвиђања добијена по принципу „доминантног литолошког интервала“ у поређењу са валидационим сетом бушотина (видети потпоглавље 3.1), и глобална воксел тачност у односу на квази-референтни модел.

Дијаграми указују на пораст тачности са повећањем обима истражних бушотина коришћених за геостатистичко моделирање, и то најмаркатније у зони прелаза са минималних 10 на 20 бушотина. Остали прелази на моделе са већим бројем бушотина такође показују пораст, али знатно блажи, што се суштински може повезати са утицајем квалитета улазних података, као и процесом вокселизације.

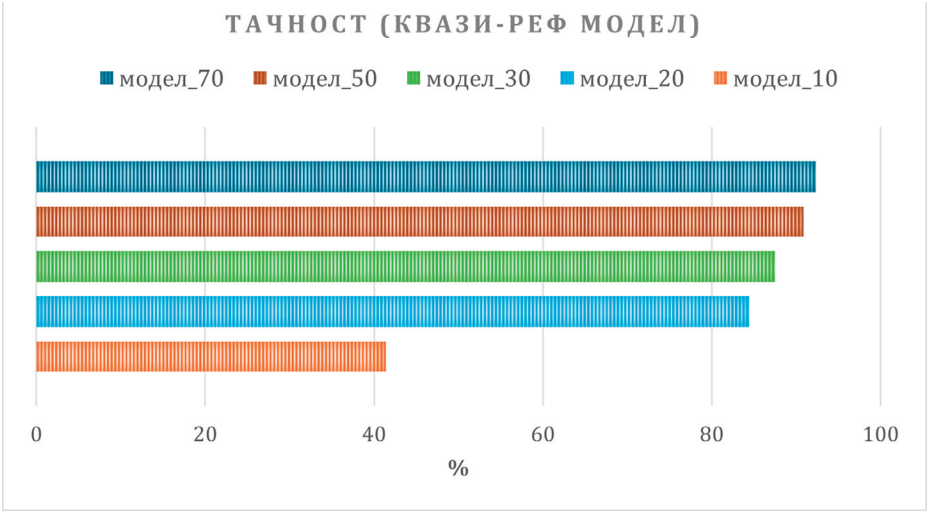
Даљом анализом променљивости добијених резултата по различитим реализацијама модела (Слика 6), јасно је да су варијације најизраженије код модела са нижим бројем бушотина, док код модела са 30 бушотина, та променљивост почиње значајно да се стабилизује. Када је реч о границама слојева и зонама растуће удаљености од извора знања, очекивано, тачност је генерално мања, а свакако опада и са смањењем обима истраживања, као што је приказано на Слици 7.

Аналогни резултати добијени су и при процени непоузданости предвиђања. Према вредностима просечне стандардне грешке по моделима (Слика 8), највећу непоузданост показује модел са најмањом гу-

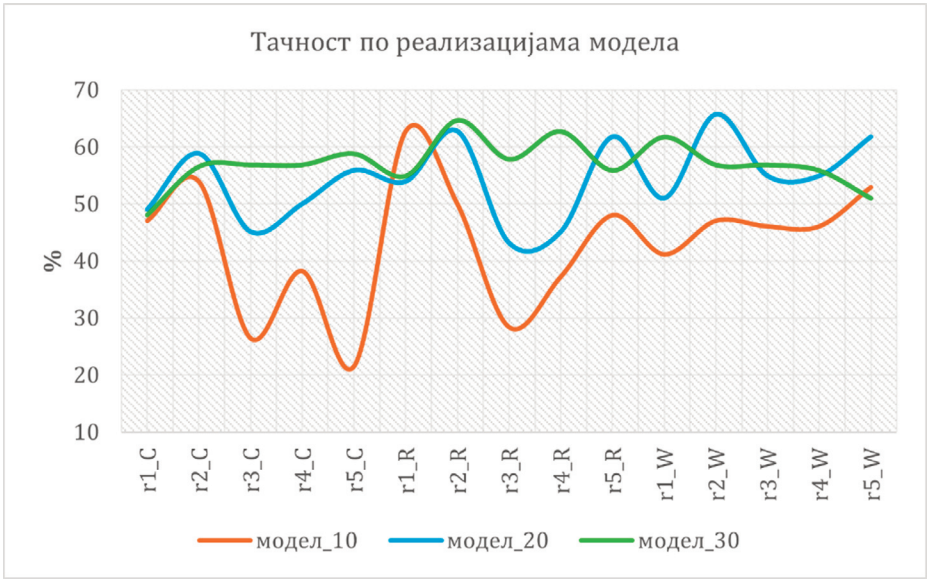
а)



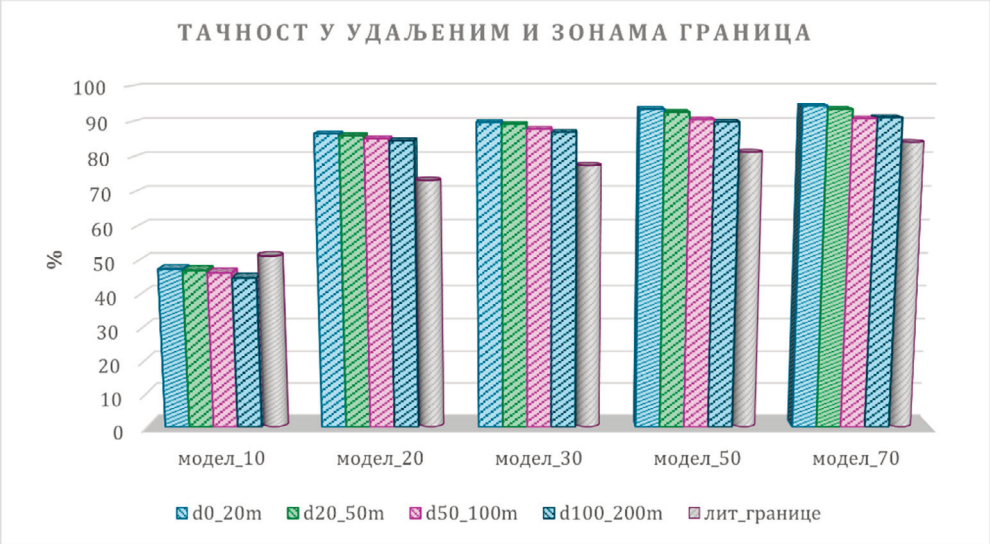
б)



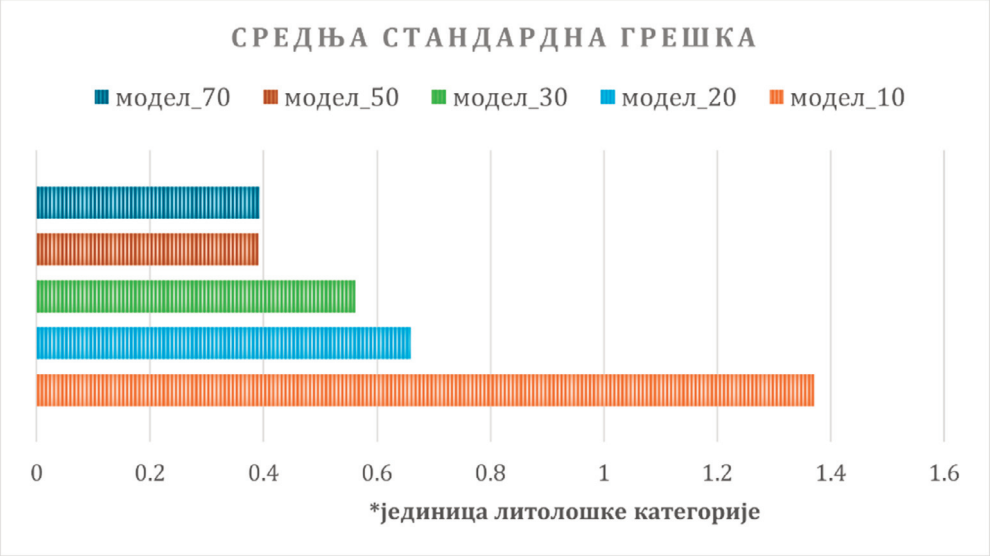
Слика 5. Тачност предвиђања у поређењу са а) валидационим сетом бушотина и б) квази-референтним моделом



Слика 6. Варијације тачности по реализацијама модела



Слика 7. Тачност у зонама растуће удаљености од тренинг бушотина и у зонама литолошких граница

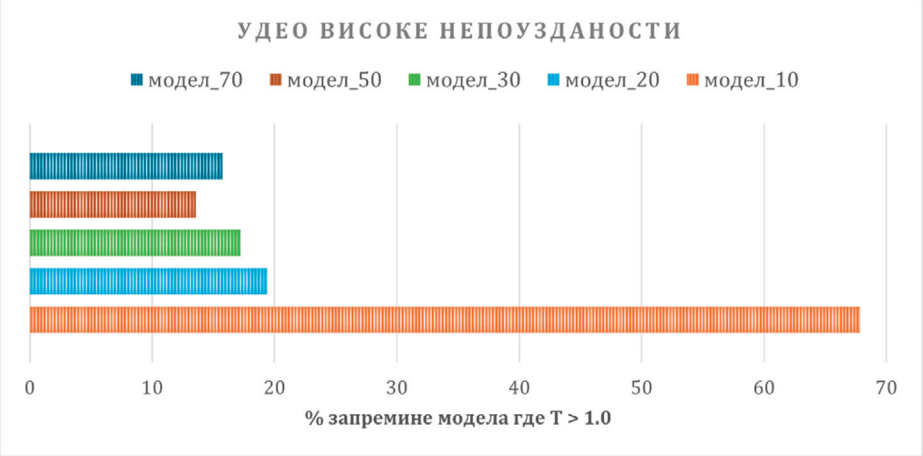


Слика 8. Стандардна грешка предвиђања као индикатор непоузданости у моделима

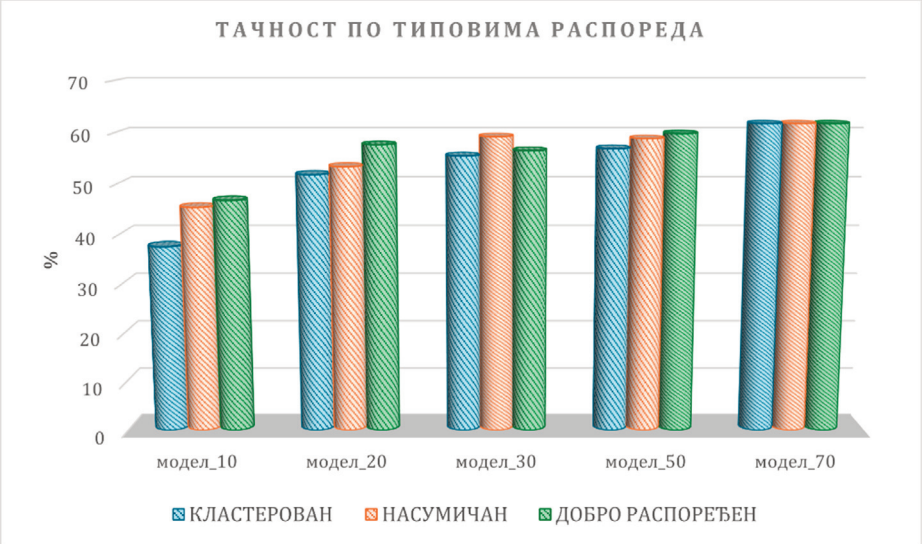
стином истраживања, а прате га и модел са 20 и са 30 бушотина. Веома сличан резултат за модел_50 и модел_70 може се објаснити чињеницом да ЕБК алгоритам у том домену има довољан број улазних података са којима врши симулацију, те да се и грешка коју прави стабилизује. Као што је приказано на Слици 9, највећи удео високе непоузданости у запремини модела уочава се код модела_10. Код осталих модела тај удео је генерално знатно мањи, са постепеним прелазима. Највеће вредности стандардне грешке забележене су у зонама граница између слојева, као и у зонама удаљеним од тренинг бушотина.

Утицај просторног распореда најизраженији је код модела са ретком до умереном мрежом истраживања, што се може видети на примеру приказаном на Слици 6. Уколико се посматра упросечена тачност по типовима просторног распореда (Слика 10), генерално најмање вредности показују модели са кластерованим распоредом, обзиром на најмању густину мреже покривености бушотинама.

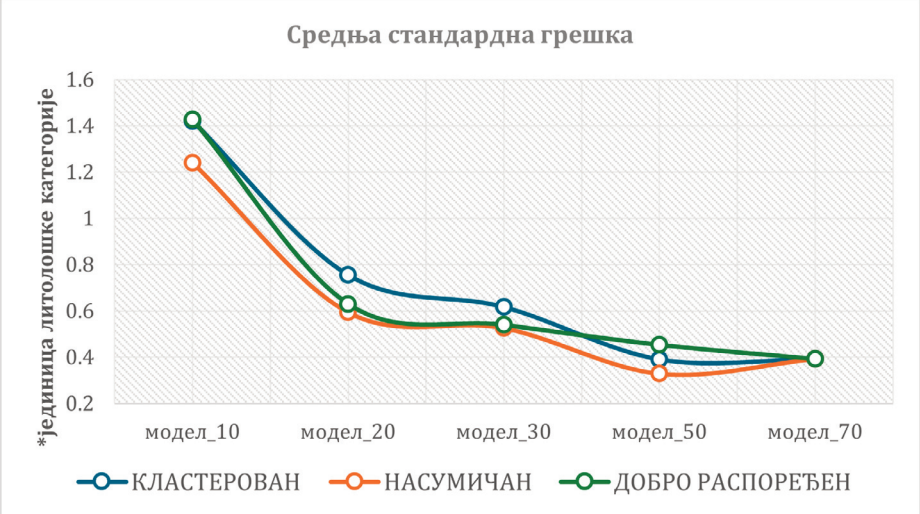
Добро распоређену шему одликује генерално највећа тачност, с тим што јој у неким моделима парира и насумични распоред, обзиром да је у домену 30+ бушотина било тешко од оригиналне просторне конфигурације бушотина детерминисати између насумичне и добро распоређене шеме. Што се тиче непоузданости, у моделима са нижим бројем бушотина, кластеровани тип бележи највећу грешку (Слика 11),



Слика 9. Удео високе непоузданости у запремини модела у односу на граничну вредност



Слика 10. Тачност предвиђања по типовима просторног распореда бушотина



Слика 10. Тачност предвиђања по типовима просторног распореда бушотина

док добро распоређени тип показује најмање вредности. Код модела_50 може се констатовати губљење ефекта просторног распореда.

Узимајући у обзир све презентоване резултате, може се констатовати да већи обим опсервираних података производи тачније и поузданије литолошке моделе. Обзиром на то да се највећи бенефити уочавају при преласку са ретке на умерено густу мрежу истраживања, сматра се могућим и неопходним дефинисати оптимални обим истраживања за свако истражно подручје.

Променљивост у резултатима код различитих просторних распореда говори у прилог томе да је при примени геостатистичких метода посебно важно узети у обзир више различитих могућих сценарија, односно користити пробабилистичке оквире за анализу и интерпретацију, као и даљу инкорпорацију у геотехничке прорачуне.

Закључак

У овом раду приказана је процедура за просторно литолошко моделирање применом геостатистичких алата у ГИС окружењу на бази истражних бушотина, и процена тачности и поузданости предвиђања у оквиру система који користе стандардне и специфичне евалуаторе.

На примеру архивских истражних бушотина, које покривају подручје дела Новог Београда, показано је да гушћа мрежа истраживања, као и оптимални распоред истих у простору пружају могућност тачнијег, прецизнијег и поузданијег интерполационог моделирања.

У светлу практичних импликација добијених резултата, могуће је закључити да у случајевима када постоји ограничени буџет опредељен за спровођење истражних радова, рационални просторни распоред може се сматрати једнако важним као и обим истих. Такође, од велике је важности процену непоузданости уврстити у геолошке и геотехничке анализе, као практични алат за идентификацију критичних зона које би захтевале додатна истраживања, односно конзервативније приступе пројектовања.

Обзиром да су литолошки подаци само један од слојева података којима се у потпуности дефинише инжењерско-геолошки модел терена, будућа унапређења овог истраживања подразумеваће укључивање других геолошких и геотехничких истражних података у процес моделирања. У том смислу, посебна пажња биће посвећена процени просторне променљивости геомеханичких параметара, са циљем формирања инжењерско-геолошког модела терена погодног за директну интеграцију са геотехничким нумеричким анализама.

Финансирање

Ово истраживање је делом финансирано од стране Фонда за науку Републике Србије, у оквиру пројекта „Digital and Numerical Model Integration for Optimization in Geotechnics“, број пројекта 345, а делом од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије по пројекту 200092.

Захвалност

Аутор упућује захвалност ван. проф. у пензији др Зорану Радићу на уступљеним подацима о истражним бушотинама.

Сукоб интереса

Аутор изјављује да нема било какав финансијски, професионални или лични сукоб интереса који би могао утицати на објективност резултата и тумачење података представљених у овом раду.

Литература - References

Abdelsattar, A. & Hemdan, E.E.D. (2025). A geostatistical predictive framework for 3D lithological modeling of heterogeneous subsurface systems using Empirical Bayesian Kriging 3D (EBK3D) and GIS. *Geomatics*, 5, 60. https://doi.org/10.3390/geomatics5040060

Esri. ArcGIS Pro documentation (2025, Januar 15). What is Empirical Bayesian Kiging? https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-empirical-bayesian-kriging-.htm

Esri. ArcGIS Pro documentation. (2025, Januar 15). What is ArcPy? https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/arcpy/get-started/what-is-arcpy-.htm

Garin, H., Baldwin, M., Reiffsteck, P., van Der Made, K.J., Wudtke, R., Lamas, L., Virely, D. & Polo Lopez, C.S. (2024). European Comission: Joint Research Centre - Assembling the ground model and the derived values. *Publications Office of the European Union*, Luxembourg. https://data.europa.eu/doi/10.2760/6390378

Gong, W., Zhao, C., Juang, C.H., Tang, H., Wang, H. & Hu, X.J.C. (2020). Stratigraphic uncertainty modelling with random field approach. *Computers and Geotechnics,* 125, 103681. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103681

Gribov, A. & Krivoruchko, K. (2020). Empirical Bayesian kriging implementation and usage. *Science of the Total Environment*, 722, 137290. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137290

Hohn, ME. (1999). The semivariogram. *Geostatistics and petroleum geology*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4425-4_2

Khan, M. S., Kim, I. S., & Seo, J. W. (2023). A boundary and voxel-based 3D geological data management system leveraging BIM and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118, 103277. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103277

Krivoruchko, K., and Gribov, A. (2019). Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics*, 32, 100368. https://doi.org/10.1016/j.spasta.2019.100368

Li, Z., Tao, H., Zhao, D. & Li, H. (2022). Three-dimensional empirical Bayesian kriging for soil PAHs interpolation considering the vertical soil lithology. *CATENA*, 212, 106098. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106098

Micić, K., Bui, HG. & Ninić., J. (2025). Computer-aided ground modelling incorporating soil variability for geotechnical purposes. *Proceedings of the Southeastern Europe Tunnelling Conference*, Belgrade, Serbia, 283-293. DOI:10.5937/SETC25026M

NSF Unidata. (2025, Januar 15). NetCDF Software. https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/

Qiu, J., Zhang, N., Yin, Z., Wang, Y., Xu, C. & Zhang, P. (2024). Novel multi-spatial receptive field (MSRF) XGBoost method for predicting geological cross-section based on sparse borehole data, *Engineering Geology*, 338, 107604. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107604

Rew, R. K., & Davis, G. P. (1990). NetCDF: An interface for scientific data access. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 10(4), 76–82. https://doi.org/10.1109/38.56302

Tran, D.H., Wang, S.J. & Dong, J.J. (2025). Influence of spatial borehole density on estimation of geostatistical properties and construction of heterogeneous hydrogeological models. *Engineering Geology*, 350, 107991. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.107991

Utepov, Y., Aldungarova, A., Mukhamejanova, A., Awwad, T., Karaulov, S. & Makasheva, I. (2025). Voxel interpolation of geotechnical properties and soil classification based on Empirical Bayesian Kriging and Best-Fit Convergence Function. *Buildings*, 15, 2452. https://doi.org/10.3390/buildings15142452

Wang, S.J., Nguyen, Q.C., Lu, Y.C., Doyoro, Y.G. & Tran, D.H. (2022). Evaluation of geological model uncertainty caused by data sufficiency using groundwater flow and land subsidence modeling as example. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81, 1–21. https://doi.org/10.1007/s10064-022-02832-7

Wang, Y., & Tian, H.M. (2024). Digital geotechnics: From data-driven site characterisation towards digital transformation and intelligence in geotechnical engineering. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 18(1), 8–32. https://doi.org/10.1080/17499518.2023.2278136

Zaresefat, M., Derakhshani, R. and Griffioen, J. (2024). Empirical Bayesian Kriging, a robust method for spatial

data interpolation of a large groundwater quality dataset from the Western Netherlands. *Water*, 16(18), 2581. https://doi.org/10.3390/w16182581

Zhao, C., Gong, W., Juang, C.-H., Tang, H., Hu, X., & Wang, L. (2023). Optimization of site exploration program based on coupled characterization of stratigraphic and geo-properties uncertainties. *Engineering Geology*, 317, 107081. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107081

Одрицање од одговорности / Напомена издавача: Изјаве, мишљења и подаци садржани у свим публикацијама су искључиво мишљење појединачних аутора/аутора и сарадника и не представљају ставове СГД и/или уредника. СГД и/или уредници одричу се одговорности за било какве повреде личности или имовине које могу настати као резултат било којих идеја, метода, упутстава или производа на које се упућује у садржају.

Zapisnici SGD, 68-1, 39-52 (2026)
ORIGINAL PAPER / ОРИГИНЛАНИ РАД
doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.18879241

Contribution to the Knowledge of Zeolitic Tuff Toponica–Kosovska Kamenica: Erionite – Present or Absent?

Ana S. RADOSAVLJEVIĆ-MIHAJLOVIĆ[1]*, Katarina MIHAJLOVIĆ[1], Ivana JELIĆ[1], Slavica MIHAJLOVIĆ[1], Jovica STOJANOVIĆ[1], Vladan KAŠIĆ[1], Nikola VUKOVIĆ[1]

[1]Applied Mineralogy Unit, Institute for Technology of Nuclear and Other Mineral Raw Materials, Franše d'Eperea 86, P.O. BOX 390, 11000, Belgrade, Serbia.
*Corresponding Author e-mail: a.radosavljevic@itnms.ac.rs

Abstract: The paper presents new results of the mineralogical and crystallographic analysis of zeolitic tuff from the Toponica deposit, located in the eastern part of Kosovo. The geological structure of the deposit consists of a basal layer of Miocene clay sandstone, followed by a horizon of white zeolitic tuff, and an overlying layer of Miocene shales, clay, and gravel. Quantitative X-ray diffraction analysis of the examined sample identified the following mineral phases: heulandite 80.1%, quartz 0.15%, erionite 4.0%, muscovite 5.4%, albite 7.7%, orthoclase 1.0%, and calcite 1.0%. The analytical procedures applied in the study included powder X-ray diffraction (XRPD) on a polycrystalline sample, SEM/EDS analysis, and optical microscopy. The cation exchange capacity of the zeolitic tuff is 140 meq/100 g, classifying this mineral raw material as a high-quality resource suitable for application in various industries.

Keywords: zeolitic tuff; clinoptilolite; erionite; XRPD; cation exchange capacityty.

Article history: <Manuscript received 28 January 2026. - Accepted 4. March 2026>

Допринос познавању зеолитског туфа Топоница–Косовска Каменица: Ерионит – присутан или одсутан?

Ана С. РАДОСАВЉЕВИЋ-МИХАЈЛОВИЋ[1]*, Катарина МИХАЈЛОВИЋ[2], Ивана ЈЕЛИЋ[1], Славица МИХАЈЛОВИЋ[1], Јовица СТОЈАНОВИЋ[1], Владан КАШИЋ[1], Никола ВУКОВИЋ[1]

[1]Департман за примењену минералогију, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Франше д'Епереа 86, П.П. 390, 11000 Београд, Србија.
*Контакт одговорног аутора: a.radosavljevic@itnms.ac.rs

Апстракт: У овом раду приказани су нови резултати минералошких и кристалографских испитивања зеолитског туфа лежишта Топоница, које се налази у источном делу Косова. Геолошку грађу лежишта чини подински слој миоценског глиновитог пешчара, изнад кога следи хоризонт белог зеолитског туфа, а преко њега леже миоценски шкриљци, глине и шљункови. Квантитативна рендгенска дифракциона анализа испитиваног узорка идентификовала је следеће минералне фазе: хејландит 80,1 %, кварц 0,15 %, ерионит 4,0 %, мусковит 5,4 %, албит 7,7 %, ортоклас 1,0 % и калцит 1,0 %. У истраживању су примењене следеће аналитичке методе: рендгенска дифракција праха (XRPD) на поликристалном узорку, SEM/EDS анализа и оптичка микроскопија. Капацитет катјонске измене зеолитског туфа износи 140 meq/100 g, што га сврстава у групу висококвалитетних минералних ресурса погодних за примену у различитим индустријским областима.

Кључне речи: зеолитски туф;клиноптилолит;ерионит; XRPD; капацитет катјонске измене.

Хронологија: <Рад примљен 28. јануар 2026. - Прихваћен 4. март 2026>

1. Увод

Тектосиликати, укључујући све полиморфне облике SiO_2, фелдспате, фелдспатоиде, скаполите и зеолите, представљају једну од најраспрострањенијих минералних група у литосфери. Зеолити, су група природних и синтетичких неорганских једињења која поседују специфична физичко-хемијска својства погодна за индустријску примену (Wenk & Bulakh, 2004). Генеза лежишта и појава минерала ове групе повезана је са стенама различитог типа, старости и порекла. Најранија истраживања била су усмерена на проучавање зеолита у вулканским стенама, где су се они формирали у базалтним шупљинама. Каснија истраживања, указала су на значајно присуство зеолитских минерала у седиментним стенама, у којима они често представљају доминантну минералну фазу. Једна од најранијих публикација која указује на ову појаву односи се на минерал филиписит из дубокоморских седиментних наслага (Murray и Renard, 1891). Значајан допринос историји открића и проучавања зеолита, дали су бројни истраживачи, међу којима се издвајају Hay (1966), Combs (1954), Deffeyes (1959), Iijima & Utada (1966, 1972) и Sheppard (1968, 1994). Њихова истраживања су показала да се, на основу генетских карактеристика, зеолитска лежишта могу класификовати на: дијагенетска лежишта (вулканогео-седиментна) и хидротермално-метасоматска лежишта (повезана са вулканским формацијама).

Вулканокластично-седиментна лежишта зеолита класификују се као рано-дијагенетска и касно-дијагенетска. Рано-дијагенетска лежишта формирају се у условима изразито алкалне средине, уз брзо кристализацију зеолита, и карактеристична су за западне делове USA и Италију (Ogihara, 2020; Passaglia & Vezzalini, 1985; Sheppard, 1994). Касно-дијагенетска лежишта јављају се у маринско-континенталним карбо-неогеним формацијама, као што су оне у Русији, Источној Европи, Јапану и Србији (Белоусов, 2024; Utada, 1991; Obradović, 1977, 1988), где је процес формирање зеолита из вулканског стакла знатно спорије. Ова лежишта имају економски значај, при чему рудна тела често садрже од 50 до 70% зеолита, и простиру се на великим површинама. Индустријски најзначајнији зеолити најчешће су заступљени у језерским и маринским седименатима. Басени у којима се формирају различити типови зеолита, показују изражене варијације у pH вредностима, салинитету и садржају неорганских катјона у воденој средини. Ове разлике условљавају формирање различитих врста зеолита и њихових карактеристичних минералних асоцијација у оквиру маринских и језерских седимената (Hay, 1978). Најчешће заступљени зеолити су аналцим, клиноптилолит, хејландит, лаумонтит и филипсит, док су остали зеолити шабазит, ерионит, морденит и натролит. Атомски односи (Si/Al+Fe), доминантни ванмрежни катјон, као и вредности pH средине у којој су зеолити формирани приказани су у Табели 1.

Табела 1. Атомски односи (Si/(Al+Fe)), доминантни ванмрежни катјон, pH вреднпст средине формирања.

зеолит	Si/Al+Fe	катјон	ph
CLI	4.0-5.1	K>Na	8.5-10.5
MOR	4.3-5.3	Na>K	8.5-10.5
HEU	2.9-4.0	Ca,Na	8.0-10.0
ERI	2.9-3.7	Na,K	9.5-11.0
CHA	1.7-3.8	Ca,Na	8.0-10.0
PHI	1.3-3.4	K,Na,Ca	9.0-11.5
ANA	1.7-2.9	Na	9.0-11.5
LAU	2.0	Ca	7.0-8.5
WEI	2.0	Ca	8.0-10.0
NAT	1.5	Na	9.0-11.0

Зеолити се у маринским и језерским седиментним лежиштима, углавном формирају кроз реакције са порском водом и чврстим материјалом (Leggo et al., 2018; Kašić et al., 2018). Најчешћи чврсти реагенс у овим процесима је вулканско стакло, често и други материјали, као што су аморфне фазе, глине (монтморијонит), плагиокласи, нефелин, биогени SiO2 и кварц (Kašić et al., 2018). Из истог полазног материјала могу настати и глине и зеолити; који ће минерал бити формиран зависиће од физичко-хемијских услова средине (Vasconcelos et al., 2023). Услови су контролисани активношћу растворених јона, као што су H^+, алкални и земноалкални катјони, силицијумска киселина и комплекс $Al(OH)_4^-$ (Vasconcelos et al., 2023). Филосиликати ће се формирати у срединама где је висок однос H^+/Na^+, K^+, Ca^{2+}, као и повећана активност јона Mg^{2+} (Leggo et al., 2018).

Језерски басени у Србији су формирани током неогена (нарочито у периоду од олигоцена до плиоцена), као последица вишеструких тектонских циклуса који су били повезани са развојем Панонског басена (Obradović et al., 1999). На формирање неогених језерских басена у Србији, значајан утицај су имали и смењивања влажних и сушних периода у условима суптропске до тропске климе; јача или слабија стратификација језерске воде; фацијална расподела седимената; као и сличне палеотемпературе језерске воде, које су износиле око 25 °C. Разлике које су присутне између појединих басена условљене су дистрибуцијом одређених кластичних и вулканокластичних седимената; брзином седиментације; фазама ниског и високог нивоа језера; фазама затворених или отворених хидролошких система; појавом различитих аутигених минерала, од којих неки имају економски значај (Obradović et al., 1999). Према истраживањима Marović et al. (1999), басени су формирани услед локалних екстензија Земљине коре дуж раседа правца NE–SW и WNW–ESE и прошли су кроз двостепену фазу слегања: брзу карпатско–баденско–сарматску фазу и спорију панонско–плиоценску фазу, условљену хлађењем и контракцијом литосфере.

Овај рад представља минералошко и кристалографско проучавање зеолитског туфа Топонице. Циљ рада је био квантитативно утврдити присуство зеолита ерионита у туфу, као и пратити његов утицај на структурне и кристалохемијске особине присутног клиноптилолита у туфу.

2. Материјал и методе

Као полазни материјал коришћен је зеолитски туф лежишта Топоница, Косовска Каменица. Хемијски састав полазног узорка одређен је применом методе силикатне анализе (Groves, 1951). Садржај SiO_2 одређиван је гравиметријски, док је садржај оксида Na_2O, K_2O, Fe_2O_3 и MgO одређен методом атомске апсорпционе спектроскопије (AAS) на атомском апсорберу Perkin-Elmer, модел 730. Ради праћења садржаја измењивих катјона Na^+, K^+, Ca^{2+} и Mg^{2+} у узорку туфа, одређивана је њихова концентрација у филтрату и у чврстој фази. Укупан садржај измењивих неорганских катјона (CEC) одређен је методом MING & DIXON (1987). Рендгенска дифракција праха на поликристалном узорку (XRPD) рађена је на аутоматском дифрактометру праха „PW-1710“, са Cu анодом при напону од 40 kV и јачини струје од 30 mA. Коришћени су закривљени графитни монохроматор и Xe сцинтилациони бројач. Квалитативна XRPD анализа спроведена је у опсегу угла 2θ од 4 до 50°, са временском константом од 0,25 s и кораком од 0,02°. Структурна утачњавања извршена су применом Ритвелдове методе (Rietveld, 1969), имплементиране у програму FullProf (Rodriguez-Carvajal, 1990). Профили дифракционих пикова моделирани су псеудо-Воигт (*pV*) функцијом. За квантитативну анализу коришћен је софтвер Siroquant V4.0 (Taylor, 1991). Дефинисана структура је визуелно обрађена у кристалографском програму VESTA (Momma & Izumi, 2011).

3. Геологија лежишта зеолитског туфа Топоница

Зеолитски туф лежишта Топоница код Косовске Каменице први пут је истраживан од стране Атанацковића и Стипановића (Atanacković & Stipanović, 1957), када се користио као „бели“ туф у цементној индустрији. Током 1969. и 1970. године зеолитски туф је испитиван као потенцијална сировина за производњу грађевинских блокова у РО „Трајко Перић“ из Косовске Каменице (Nejić, 1970; Delić, 1990). Испитивања су обновљена 1989. године са циљем детаљне дефиниције лежишта зеолитског туфа Топоница, када

је израђен и „Елаборат о резервама и квалитету зеолитског туфа Топоница код Косовске Каменице“ (Dedić, 1990; Dedić & Simić, 1990). Географски, лежиште зеолитског туфа „Топоница“ налази се у крајњем источном делу Косова и Метохије, у близини Косовске Каменице. Непосредну геолошку серију лежишта чине миоценски глиновити пешчари у подини, хоризонт белог зеолитског туфа и повлатни миоценски седименти — глине, глинци и шљункови, који су прекривени колувијалним материјалом. Повлатни седименти изграђени су од сивоплавих до сивозелених глиновитих и делимично лапоровитих пешчара, чија дебљина није поуздано утврђена. Зеолитски туф формира два рудна тела, А и Б, дебљине од 0,2 до 4,9 m (истражено бушење вршено је на површини од 15 ha). Укупне израчунате резерве износе око 500,000 t (Dedić, 1990; Dedić & Simić, 1990). Оба рудна тела јављају се као слојевите јединице у оквиру седиментне серије, са падом 120/5–20°, и пресечена су са два система пукотина, међусобно постављена под правим углом. Туф је беле боје, са жутим лимонитским превлакама дуж пукотинских површина, и одликује се кристаластом текстуром. Запреминска маса порозног туфа износи око 1,6 g/cm^3. Садржај зеолита креће се од 80 до 85%, при чему доминирају минерали хејландитске серије. Повлатни миоценски седименти (М) састоје се од сивих распаднутих глина, конгломерата и слојева сивих глина. Њихова дебљина варира од 10 до 25 m, док у појединим деловима потпуно изостају, тако да се рудна маса непосредно налази изнад зеолитског туфа. Рудни материјал представља глиновити материјал помешан са органским остацима флоре и фауне. Генеза зеолитског туфа повезана је са затвореним језерским басеном у коме је постојао контролисан хемизам средине, са изразито алкалним условима (pH 9,5–10), као и континуирани прилив вулканског материјала у виду пепела, лапила и других туфозних продуката, уз допринос детритуса са обода басена, пореклом од кристаластих шкриљаца (Kašić, 2018).

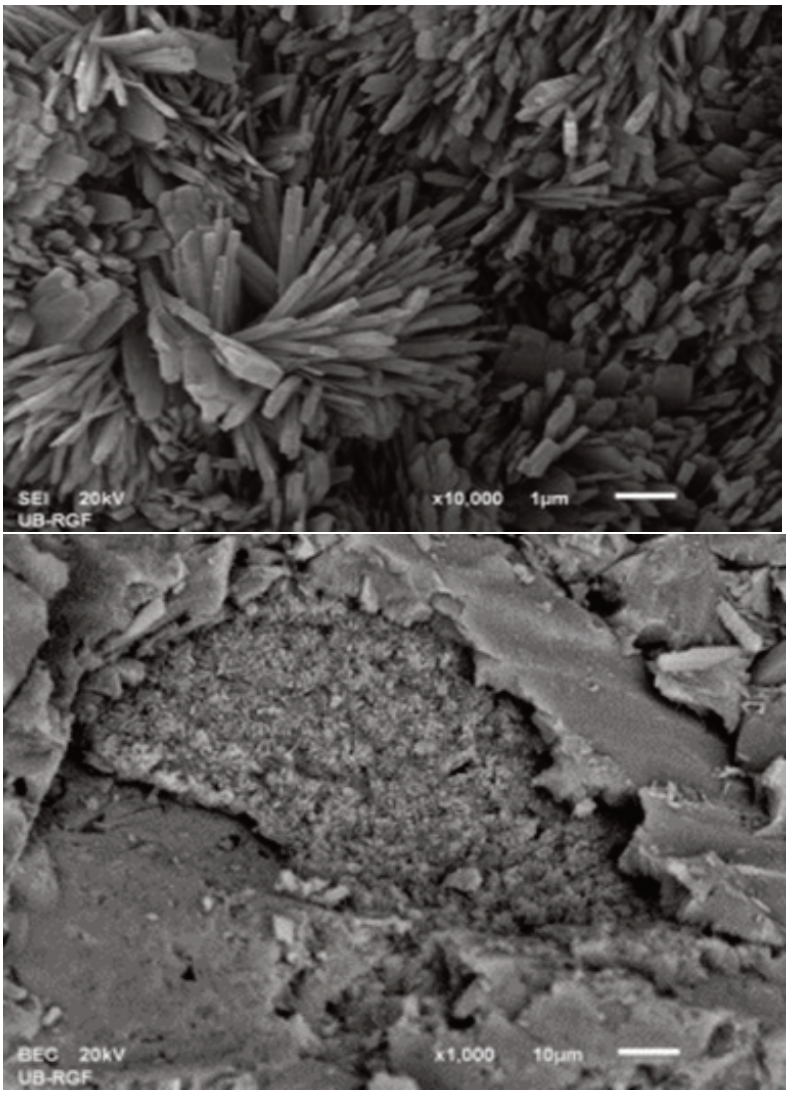
4. Резултати и дискусија

4.1. Минералошка и кристалохемијска анализа

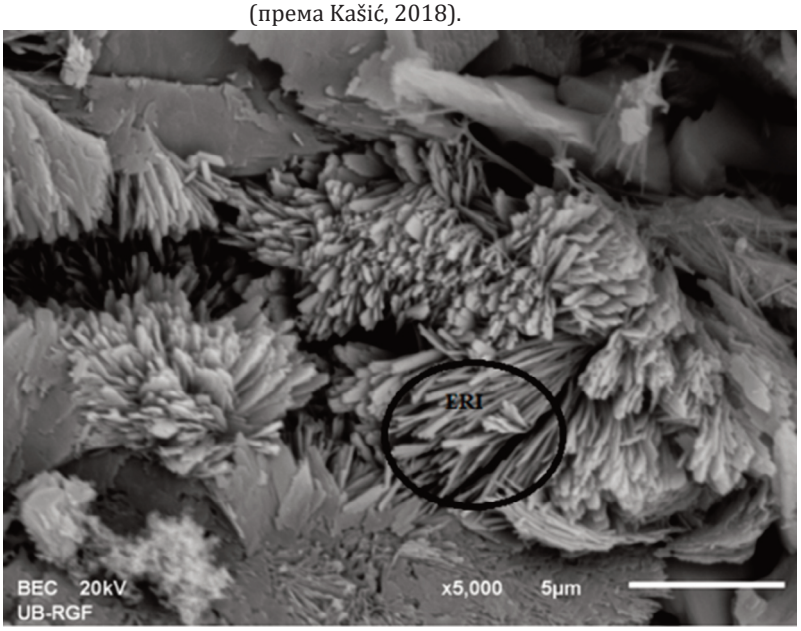
Главна маса узорка је холокристаласта–порфиритска до витрофирска. Зрна кварца су најчешће анедралног облика, са оштрим ивицама. Плагиокласи, су углавном измењени, хлоритизовани. Биотит као примарна фаза лискуна, такође је делимично хлоритизован (Radosaljević-Mihajlović et al., 2005; Kašić, 2018; Kašić, 2021). Зеолитски минерали јављају се у виду јасно уочљивих моноклиничних кристала, димензија мањих од 10 μm (Слика 1).

Поред наведених минерала, присутни су и минерали из групе амфибола, који су редовно измењени. Акцесорни минерали су циркон, апатит, рутил. Такође, потврђено је присуство органске фазе, фосила биљног порекла. Претходним истраживањима утврђено је присуство минерала ерионита (Димитријевић et al., 1995). Ерионит, влакнасти зеолит, релативно је чест у зеолитским лежиштима широм света. Први га је описао Deffeyes (1959), а све до 1970-их година сматран је стабилним и корисним зеолитом. Са структурног становишта, ерионит припада такозваној ABC-6 фамилији (Gottardi & Galli, 1985), чија је структура изграђена од слојева шесточланих прстенова $(Si,Al)O_4$ тетраедара. Ови слојеви су наслагани дуж c-осе по ABC шеми и одликују се понављањем од шест слојева. Од укупно десет могућих секвенци наслагања за период од шест слојева, које омогућавају присуство како једноструких тако и двоструких прстенова, само четири одговарају познатим минералима: AABAAC — ерионит (Staples & Gard, 1959), AABBCC — шабазит (Smith et al., 1969), ABBACC — белбергит (Rüdinger et al., 1993) и ABABAC — лиотит (Ballirano et al., 1996). На микрофотографији (Слика 2) приказани су фиброзни кристали минерала ерионита.

Типичне кристалне форме влакнастог до игличастог ерионита (Слика 2), карактерише променљива ширина. Уочене су кристалне форме које су састављене од неколико паралелно оријентисаних игличастих кристалних влакна. Њихове величине се крећу у распону од неколико десетина до неколико стотина нанометара. Појединa игличаста кристална влакна имају нанометарске пречнике и граде компактне, паралелно распоређене снопове. Бројне студије (Ballirano et al., 2009; Ballirano et al., 2012; Ballirano et al., 2015) бавиле су се кристалохемијском и структурном карактеризацијом ерионита, као и испитивањем његове хемијске реактивности. Део токсичности ерионита, који је последица његове влакнасте структуре,



Слика 1. СЕМ микрофотографије Са-клиноптилолита у зеолитском туфу Топоница, размерна линија 10 и 1 μm (према Kašić, 2018).



Слика 2. СЕМ микрогрофотографија типичних влакнастих кристала ерионита (ЕРИ), које показују паралелно оријентисане игличасто-влакнасте кристале; размерна линија 5 μm (према Kašić, 2018)

приписује се присуству јона гвожђа. Након инхалације, ови јони могу ући у организам и изазвати оштећења протеина (Care et al., 1999). Присуство гвожђа омогућава индукцију оштећења ДНК путем Фентонове реакције (Hardy, 1995; Eborn & Aust, 1995; Fach et al., 2002). На основу хемијских анализа потврђено је присуство Fe у ериониту, при чему је показано да се оно налази на површини зеолита у облику елементарног гвожђа или наночестица гвожђевих оксида, као и у виду танких превлака филосиликата који садрже гвожђе. У Табели 2 приказани су резултати хемијске анализе зеолитског туфа Топоница.

Табела 2. Хемијска анализа присутних оксида и тешких метала, као и капацитет катјонске измене зеолитског туфа Топоница.

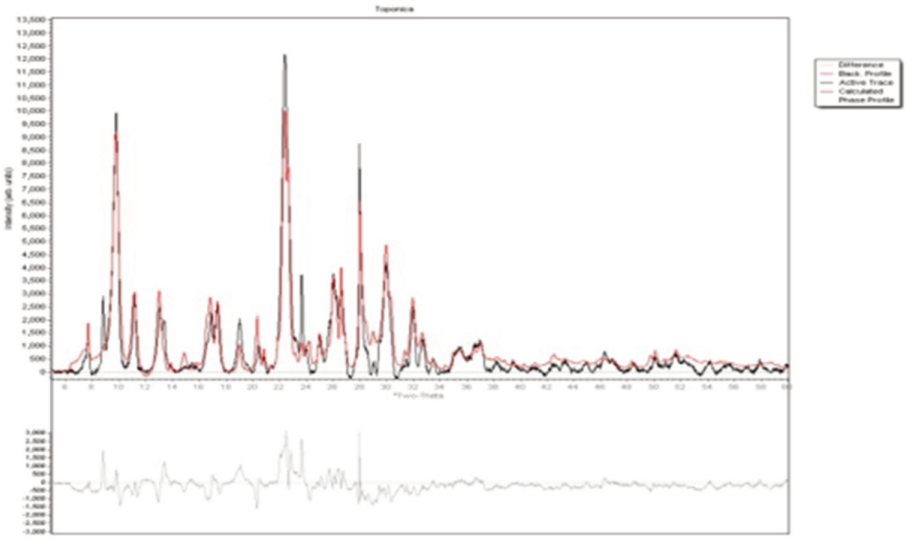
Оксид	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	H_2O
(%)	63,75	12,73	1	5,32	1,375	0,70	0,47	14,8
Садржај тешких метала [ppm]								
	Cd	Cr	Ni	Pb	Sb	Cu	Zn	Mn
	2,5	4	14	35	<20	12	41	40
Садржај измењивих катјона $MmolM^+/100g$								
	Ca^{2+}	Na^+		K^+	Mg^+	CEC		
	95,0	18,2		15,7	11,2	140,1		

Познато је, да се клиноптилолит и хејландит разликују на основу свог атомског односа Si/Al: за клиноптилолит важи Si/Al > 4, док је за хејландит Si/Al < 4 (Armbruster, 2008). На основу приказаних података (Табела 2), зеолитски туф Топоница садржи клиноптилолит (Si/Al = 5,0), при чему доминира калцијум као ванмрежни катјон-Ca-клиноптилолит (Radosavljević-Mihajlović et al., 2005; Kašić et al., 2023). Структурна формула, односно број атома сваког елемента по јединичној ћелији, прерачуната је на основу 72 атома кисеоника, према Alberti (1972). Структурно-кристалохемијска формула Ca-клиноптилолита (зеолитски туф Топоница) је $(Ca_{2\cdot205}Mg_{0\cdot26}Na_{0\cdot845}K_{0\cdot728})(Si_{26\cdot3}Al_{6\cdot19}Fe_{0\cdot31})O_{72}\cdot20H_2O$.

Уколико се узме у обзир капацитет катјонске измене (CEC) ванмрежних катјона, добија се следећа структурно-хемијска формула: $(Ca_{1\cdot25}Mg_{0\cdot15}Na_{0\cdot48}K_{0\cdot41})(Si_{26\cdot3}Al_{6\cdot19}Fe_{0\cdot31})O_{72}\cdot20H_2O$. Квантитативна рендгенска анализа зеолитског туфа Топоница, показала је присуство следећих фаза: хејландит 80,1%, кварц 0,15%, ерионит 4,0%, мусковит 5,4%, албит 7,7%, ортоклаз 1,0% и калцит 1,0% (Слика 3). Анализом квантитативне рендгенске дифракције праха (XRD) установљено је да ерионит чини 4,0% зеолитског туфа.

Доминантна фаза је хејландит (80,1%), који гради основу зеолитске матрице и може утицати на расподелу и инкапсулацију влакана ерионита. Мањинске силикатне фазе — мусковит (5,4%), албит (7,7%) и ортоклас (1,0%) — као и кварц (0,15%) и калцит (1,0%), дисперговане су унутар зеолитског туфа и могу утицати на физичку приступачност и потенцијално ослобађање влакана ерионита. Присуство ерионита у оваквом минералном склопу је од посебног значаја због његове добро документоване токсичности, што наглашава потребу да се приликом процене потенцијалних здравствених ризика узму у обзир како његова концентрација, тако и минералошки контекст. Различите димензије влакана, као и присуство структурних дефеката, одговорни су за њихово различито механичко понашање. Посебну пажњу треба посветити правилној процени токсиколошких ефеката повезаних са димензијама влакана ерионита, као

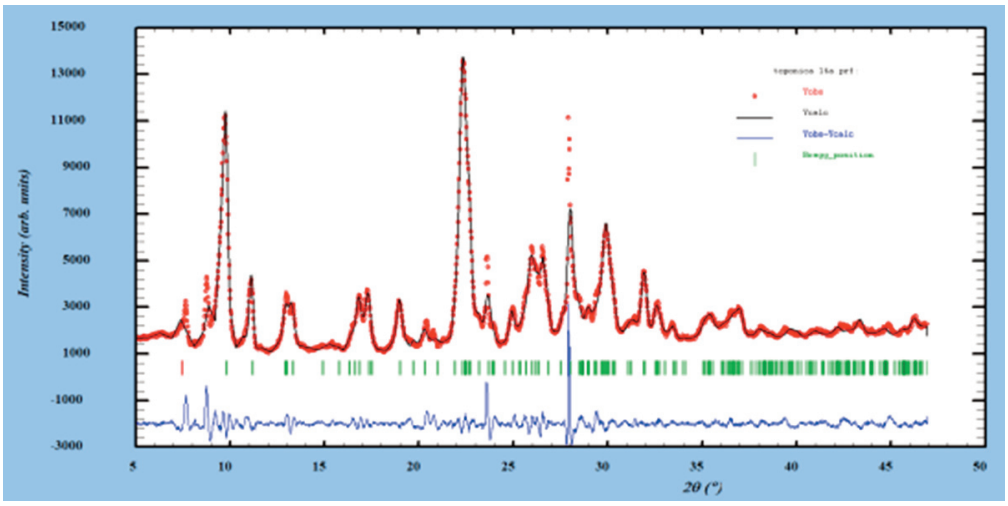
и њиховом склоношћу ка цепању, јер ова особина може значајно повећати специфичну површину и, последично, њихову реактивност (Matassa, 2015). Присуство изражених површинских дефеката погодује формирању активних места способних за фиксацију катјона, као што је гвожђе (Fe).



Слика 3. Дијаграм праха квантитативне рендгенске анализе зеолитског туфа Топоница.

4.2. Структурна анализа

У анализи кристалне структуре хејландита/ клиноптилолита, одређивање просторне групе представља основни корак. Ови минерали кристалишу у моноклиничној симетрији, у просторној групи C2/m, али могу се јавити и друге просторне групе, као што су C2, Cm и C1 (Sugiyama & Takeuchi, 1986). На основу ранијих истраживања (Rado-savljević-Mihajlović et al., 2018; Mihajlović et al., 2025), структуре Ca-хејландита/клиноптилолита српских лежишта, одређиване су у просторној групи C2/m, са неуређеном расподелом Si и Al атома у тетраедарским положајима. Полазни подаци за утачњавање структуре Ca-клиноптилолита засновани су на структурним параметрима KT модела који су предложили Koyama и Takeuchi (1977). Утачњени рендгенски дијаграми праха Ca-клиноптилолита приказани су на сликама 3 и 4. Релевантни структурни и профилни параметри, заједно са одговарајућим факторима слагања, дати су у Табели 3.



Слика 4. Утачњени рендгенски дијаграм праха Ca-клиноптилолита Ритвелдовом методом.Слика 3. Дијаграм праха квантитативне рендгенске анализе зеолитског туфа Топоница.

Структурна анализа (Ритвелдовом методом) Ca-клиноптилолита успешно је конвергирала, при чему су добијене вредности Rp = 5,14%, Rwp = 8,10% и Rexp = 2,00% (χ^2 = 16,4). Узорак је доминантно једнофазни клиноптилолит, са Bragg-овим R-фактором од 6,86% и запреминским уделом од 100% (±0,9%). Релативно висока вредност χ^2 може одражавати присуство мањих аморфних компоненти, као и осетљивост прилагођавања на мала одступања у сложеном зеолитском оквиру; ипак, укупни структурни модел остаје стабилан и поуздан.

Ритвелдово утачњавање обухвата опсег 2θ = 7,43–46,94° (d = 11,89–1,93 Å), са просечном вредношћу FWHM од 0,348°. Ови показатељи потврђују поузданост структурног модела, при чему су мања одступања највероватније последица позадине или присуства аморфних компоненти.

4.2.1.Анализа тетраедарских позиција

У структури Ca-клиноптилолита присутно је пет тетраедарских позиција (Si1–Si5), који су различито деформисани, услед ограничења оквира и интер- акција са суседним тетраедрима (Si, Al), као и са вамрежним Ca^{2+} катјонима (Табела 4) (Li et al., 2013; Breck, 1974).

Табела 3. Профилни параметри структурне анализе Ca-клиноптилолита (XRPD).

Просторна група	$C2/m$
Проф. функција	pV
a (Å)	17,707(4)
b (Å)	18,012(4)
c (Å)	7,431(3)
β °	116,62(2)
ρ (g/cm³)	2,456
V (Å³)	2118,848
Максимум 2θ	50
RB (%)	5,14
Rf (%)	8,10
Chi²	6,86
GoF	5,48
Rwp	2,0
Rexp	5,14

Табела 4. Атомске координате тетраедарских катјона, Викофове позиције (W), фактори заузећа (SOF) Ca-клиноптилолита.

		Ca-клиноптилолит $(Ca_{2.205}Mg_{0.26}Na_{0.845}K_{0.728})(Si_{26.3}Al_{6.19}Fe_{0.31})O_{72}$.			
Атом	***W***	***x***	***y***	***z***	SOF (Si/Al)
T1	8*j*	0,179	0,173	0,109	0,76/0,109
T2	8*j*	0,212	0,402	0,504	0,88/0,087
T3	8*j*	0,211	0,197	0,705	0,97/0,087
T4	8*j*	0,075	0,299	0,429	0,99/0,086
T5	4*g*	0,0	0,216	0,0	0,27/0,053
O1	4*i*	0,188	0,5	0,465	1
O2	8*j*	0,236	0,125	0,615	1
O3	8*j*	0,184	0,157	0,886	1
O4	8*j*	0,215	0,099	0,247	1
O5	4*h*	0,0	0,317	0,5	1
O6	8*j*	0,078	0,153	0,043	1
O7	8*j*	0,117	0,230	0,562	1
O8	8*j*	0,011	0,266	0,211	1
O9	8*j*	0,204	0,261	0,183	1
O10	8*j*	0,113	0,368	0,379	1

Дужине веза Si1–O крећу се у опсегу од 1,63 до 1,72 Å, са угловима O–Si1–O од 94° до 127° и угловима T–Si1–T око 85°. Ове вредности указују на умерену деформацију и проширење које је усмерено дуж канала, Табела 5.

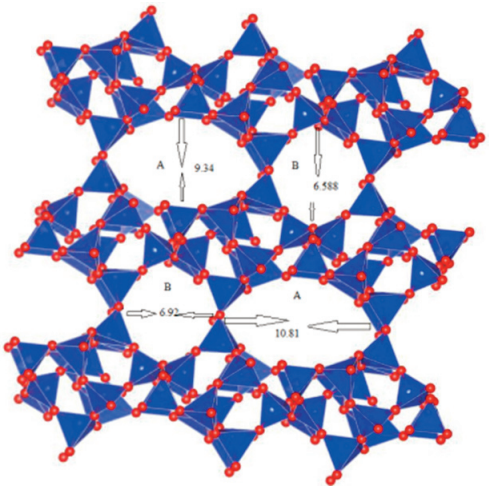
Положаји Si2 и Si3 показују веће варијације дужина веза (1,61–1,80 Å и 1,539–1,757 Å), што доводи до смањених вредности T–Si–T углова (~45–91°) и ширег опсега O–Si–O углова, указујући на деформацију тетраедарске мреже. Тетраедри у положају Si4 (Si4–O: 1,530–1,667 Å, Si4–T: 2,894–3,275 Å) прате сличне трендове, са T–Si–T угловима од 46° до 85° и O–Si–O угловима од 20° до 140°. Тетраедарски положај

Табела 3. Атомске координате тетраедарских катјона, Викофове позиције (W), фактори заузећа (SOF) Са-клиноптилолита.

<T–O>[Å]; <O–T–O>[°]			
T1 – O	1,674	<M–O> [Å]	
T2 – O	1,699	M1 – O	2,84
T3 – O	1,633	M2 – O	2,56
T4 – O	1,595	M3 –O	2,93
T5 – O	1,632	M4 – O	2,65
<T – O>	1,733		
<O–T–O>	108,84	<M–O>	2,74

Si5 показује благу деформацију, са дужим међутетраедарским везама (Si4, Al4) и флексибилним O–Si–O угловима, што омогућава прилагодљивост мреже. Неуједначеност у дужинама веза и угаона одступања на свим Si позицијама дају структурну флексибилност зеолита, која омогућава формирање стабилних канала и шупљина (Akporiaye et al., 2023; Li et al., 2013; Breck, 1974). Тетраедарски распоред Si положаја, приказан је на Слици 5.

Структура клиноптилолита изграђен је од TO_4 тетраедара (T = Si, Al) који су повезани заједничким атомима кисеоника и на тај начин формирају дводимензионални систем укрштених канала. Канал А формиран је од десеточланих прстенова, док је канал Б изграђен од осмочланих прстенова, на основу чега се дефинише микропорозна структура зеолита. Типичне вредности отвора канала износе око ~3,1 × 7,5 Å за канал А и ~3,6 × 4,6 Å за канал Б (Grifasi et al., 2025). Утачњена структура Са-клиноптилолита, показује да се вредности канала крећу за А ≈ 10,801 × 9,34 Å и В ≈ 6,92 × 6,58 Å. Повећане вредности су вероватно последица деформације тетраедара, које укључују варијације у дужинама T–O веза и O–T–O углова. Већи O–T–O углови доводе до проширења канала, док компримовани углови ограничавају њихову величину. Растојања T–T (2,89–3,28 Å) додатно утичу на размак тетраедара и величину шупљина, повезујући локалну геометрију са макроскопским димензијама канала.



Слика 5. Изглед утачњене структуре клиноптилолит.

Овакве вреднсти су у складу са структуром клиноптилолита, код које је присутна тетраедарска флексибилност која омогућава формирање микропора и смештај ванмрежних катјона, као што је Ca^{2+}, без нарушавања стабилности структуре (Baerlocher et al., 2007; Armbruster & Gunter, 2001).

4.2.2. Анализа ванмрежних катјона

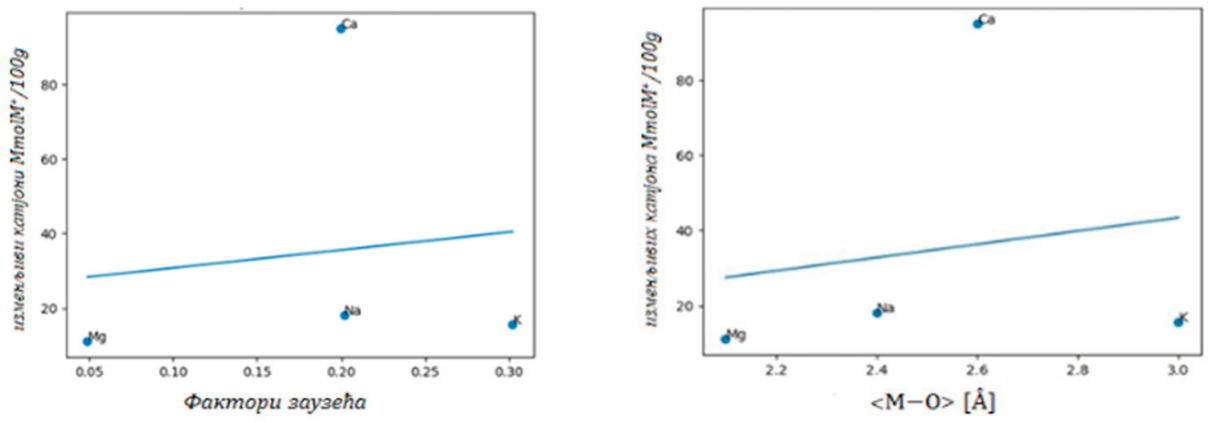
Кристалохемијске и структурне особине клиноптилолита, зависиће од расподеле ванмрежних катјона у каналима А, В и С (који се разликују по величини, геометрији и приступачности) Табела 6. На основу литературних података (Bish, 1988; Armbruster & Gunter, 2001), ванмрежни катјони Ca^{2+}, Na^{+} и Mg^{2+} заузимају положаје у каналима А и В, док је K^{+} претежно локализован у каналу С, где је снажније стабилизован у оквирним шупљинама. Добијене су вредности (Таб. 5) дужине веза катјон–кисеоник, у опсегу од 2,00 до 3,15 Å (Таб. 5), које су у складу са литературним вредностима (Alberti, 1975).

Табела 6. Атомске координате ванмрежних катјона, Викофове позиције (W), факатори заузећа (SOF) Са-клиноптилолита.

Атом	*x*	*y*	*z*	SOF
M1	0,131	0,0	0,769	0,09
M2	0,016	0,5	0,188	0,22
M3	0,232	0,05	0,034	0,31
M4	0,0	0,0	0,5	0,02
Ow_1	0,258	0,0	0,092	0,34
Ow_2	0,107	0,0	0,936	0,15
Ow_3	0,074	0,42	0,973	1
Ow_4	0,5	0,0	0,5	0,25
Ow_5	0,041	0,06	0,368	0,5
Ow_6	0,059	0,0	0,131	0,25
Ow_7	0,053	0,0	0,571	0,25
Ow_8	0,049	0,0	1,130	0,24
Ow_9	0,105	0,0	0,629	0,24
Ow_{10}	0,024	0,0	0,841	0,13

Калцијум показује релативно дуже Са–О везе (Таб. 5), што указује на веће координационе бројеве и структурну флексибилност у каналима А и В. Натријум показује средње вредности Na–O веза (Таб. 5), које су карактеристичне за слабије електростатичке интеракције и већу покретљивост. Магнезијум има краће Mg–O везе (Таб. 5), што указује на јаче локално везивање и смањену способност измене. Калијум показује дуже K–O везе (Таб.5), које су типичне за велике једновалентне катјоне стабилизоване у ширим позицијама канала, посебно у каналу С.

Утачњени фактори заузећа за присутне ванмрежне катјоне (Na1 = 0,2019, Ca2 = 0,1996, K3 = 0,302, Mg = 0,049) показују да калијум има највећи степен заузећа позиција. Међутим, његов структурни положај у каналу С ограничава његов допринос јонској измени. Насупрот томе, Са иако има слично заузеће као Na, има доминантну улогу у процесу јонске измене, због двовалентног наелектрисања и повољне координације у каналима А и В (Barrer, 1978; Inglezakis & Zorpas, 2012). Ово је поткрепљено и измереним вредностима капацитета катјонске измене (CEC): Ca^{2+} = 95 meq/100 g, Na^{+} = 18,2 meq/100 g, K^{+} = 15,7 meq/100 g и Mg^{2+} = 11,2 meq/100 g (Таб.2). Највећи капацитет катјонске измене повезан је са калцијумом, и он одражава његову јаку електростатичку интеракцију са негативно наелектрисаним оквиром, уз ис-



Слика 6. а.) Однос између фактора заузећа и капацитета катјонске измене (CEC) ванмрежних катјона у клиноптилолиту (Иако се уочава општа позитивна корелација, Ca^{2+} показује изражено позитивно одступање услед свог двовалентног наелектрисања и преференцијалног положаја у каналима А и В, док K^{+}, упркос високом степену заузећа, испољава ограничену измењивост због стабилизације у каналу С);

б.) Приказан је однос између капацитета катјонске измене и просечне дужине везе катјон–кисеоник (Слаба позитивна корелација указује да сама дужина везе не контролише јонско-измењивачко понашање. Калцијум показује изражено позитивно одступање од регресионе линије, што указује да се висок CEC постиже при средњим дужинама веза у комбинацији са двовалентним наелектрисањем и повољним положајем у каналима А и В. Насупрот томе, Mg^{2+} показује ограничену измењивост услед јаког локалног везивања, док K^{+} испољава низак CEC упркос дугим K–O везама, као последица његове стабилизације у каналу С).

товремено довољну покретљивост за измену. Натријум умерено доприноси укупном CEC-у, док калијум, упркос високом степену заузећа, показује релативно низак CEC због јаче везаности у каналу C. Магнезијум има најмањи допринос, што се може приписати како ниском заузећу позиција, тако и јаким Mg–O везама које ограничавају јонску измену.

Линеарна зависност између фактора заузећа и капацитета катјонске измене (CEC) показује општи позитиван тренд; међутим, и значајна одступања — посебно код Ca^{2+} — указују да CEC није одређен искључиво степеном заузећа. Уместо тога, велики утицај ће имати и сама валенца катјона, расподела дужине веза, јачине координације и положаја у каналима (Barrer, 1978; Bish & Ming, 2001). Највећи капацитет катјонске измене у клиноптилолиту не постиже се при екстремним дужинама веза, већ при оптималном односу између јачине везивања и структурне приступачности, што је уочено код Ca^{2+}. Ови резултати потврђују да је Ca^{2+} доминантни измењиви катјон у клиноптилолиту, док Na^{+}, K^{+} и Mg^{2+} имају секундарну улогу, условљену њиховим структурним окружењем.

Ова кристалохемијска особина, објашњава високу селективност клиноптилолита према двовалентним катјонима и истиче његову ефикасност у еколошким и технолошким применама јонске измене.

Закључак

Линеарна зависност између фактора заузећа и капацитета катјонске измене (CEC) показује општи позитиван тренд; међутим, и значајна одступања — посебно код Ca^{2+} — указују да CEC није одређен искључиво степеном заузећа. Уместо тога, велики утицај ће имати и сама валенца катјона, расподела дужине веза, јачине координације и положаја у каналима (Barrer, 1978; Bish & Ming, 2001). Највећи капацитет катјонске измене у клиноптилолиту не постиже се при екстремним дужинама веза, већ при оптималном односу између јачине везивања и структурне приступачности, што је уочено код Ca^{2+}. Ови резултати потврђују да је Ca^{2+} доминантни измењиви катјон у клиноптилолиту, док Na^{+}, K^{+} и Mg^{2+} имају секундарну улогу, условљену њиховим структурним окружењем.

Ова кристалохемијска особина, објашњава високу селективност клиноптилолита према двовалентним катјонима и истиче његову ефикасност у еколошким и технолошким применама јонске измене.

Допринос аутора

Рад је настао као тимски рад аутора, који су већ годинама (1990 – до данас) део пројекта геолошких, минералошких и физичко-хемијских испитивања зеолитских туфова различитих лежишта на простору републике Србије, као и просторима бивше Југославије. Ово је потврђено одбрањеним магистарским и докторским радовима аутора, као бројним радовима објављеним у међународним часописима или презентованих на бројним међународним и домаћим конференцијама (е-наука).

Захвалница

Аутори изражавају захвалност Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије на финансијској подршци истраживању у оквиру пројекта број 451-03-33/2026-03/200023.

Литература - References

Akporiaye, D., Tsuji, K., & Kaneko, K. (2023). Structural insights into Na-clinoptilolite: DFT calculations and experimental validation. *Applied Sciences*, 15(7), 3955. https://doi.org/10.3390/app15073955

Alberti, A. (1972). On the crystal structure of the zeolite heulandite. *TMPM Tschermaks Petr. Mitt*. 18: 29-146. https://doi.org/10.1007/BF01081798

Armbrustr, T. & Gunter, M. (2001). Crystal structures of Natural Zeolites. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 45(1), 1-67. https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.1

Alberti, A. (1975). The crystal structure of clinoptilolite. *Zeitschrift für Kristallographie*, 141, 284–295.

Atanacković, R., Stipanović, M., (1957). *Izveštaj o prospekciji tufova u okolini sela Topice – srez Gnjialnski*. Fond zavoda Geozavoda, Beograd.

Baerlocher, C., McCusker, L. B., Olson, D. H., & Meier, W. M. (2007). *Atlas of Zeolite Framework Types* (6th Revised Edition). Elsevier.

Ballirano, P., Merlino, S., Bonaccorsi, E. & Maras, A. (1996). The crystal structure of liottite, a six-layer member of the cancrinite group. *Canadian Mineralogist*, 34, 1021-1030.

Ballirano, P., Andreozzi, G. B., Dogan, M. & Dogan, A. U. (2009). Crystal structure and iron topochemistry of erionite-K from Rome,Oregon, USA. American Mineralogist, 94 (8-9), 1262–1270. https://doi.org/10.2138/am.2009.3163

Ballirano, P. & Cametti, G. (2012). Dehydration dynamics and thermal stability of erionite-K: Experimental evidence of the "internalionic exchange" mechanism. *Microporous and Mesoporous Materials*, 163, 160–168. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.06.059

Ballirano, P. et al. (2015). Fe(II) segregation at a specific crystallographic site of fibrous erionite: A first step toward the understandingof the mechanisms inducing its carcinogenicity. *Microporous and Mesoporous Materials,* 211, 48–63.

Barrer, R.M. (1978). Zeolites and Clay Minerals as Sorbents and Molecular Sieves. *Academic Press*, London-New York, 45.

Belousov P. (2024) Mineral'no-syr'evaya baza tselolitov Rossii. In: Belousov P.E., Kaylachakov P.E., Rumyantseva A.O. (Eds.) *Georesursy*, 26(4), 260–274. https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.12

Bish, D. L. (1988). Occurrence, Properties and Utilization of Natural ZeolitesIn D. Kallo and H. S. Sherry (Eds.). *Proceedings of the Second International Conference on the Occurrence, Properties and Utilization of Natural Zeolites in 1988*, Akademiai Kiado, Budapest: pp. 565-576.

Bish, D. L., & Ming, D. W. (Eds.). (2001). Natural zeolites: Occurrence, properties, applications. Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45, 654 pp.

Breck, D. W. (1974). Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use. New York: Wiley. (Chapter 2: Tetrahedral Frameworks).

Carr, A. & Frei, B. (1999). Does vitamin C act as a pro-oxidant under physiological conditions? *The FASEB Journal*, 13, 1007–1023.

Combs, S. M. (1954). Zeolites and their characteristics. *Economic Geology*, 49(7), 665–729.

Dedić Lj. (1990). *Elaborat o rezervama i kvalitetu zeolitskog tufa na lokalitetu Toponica kod Kosovske Kamenice*. Fond Geozavoda, Beograd, 1-69.

Dedić Lj., Simić V. (1990). Zeolitic tuff from Kosovska Kamenica, *XII Kongres na Geolozi na Yugoslavija*, Ohrid, 3, 246-259.

Deffeyes, K. S. (1959). Zeolites in Sedimentary Rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 29(4), 602–609.

Delić L. (1990). *Elaborat o klasifikaciji i kategorizaciji rezervi tufa kao sirovine za cementnu industriju u ležištu Korbevac kod Vranjske Banje*, Fond Min. za rud. i energ. Rep. Srbije, Beograd, 1-103.

Dimitrijević, R., Tomašević Čanović, M., Obradović, J., Dumić, M. & Vukićević, O. (1995) Mineralogical Characterization of Zeolitized tuff from the Miocen Lacustrine Basine of Toponice, Serbia. In: *Proceedings of the Sofia Zeolite Meeting Natural Zeolites*, Sofia 95', 18–25.

Eborn, S. K. & Aust, A. E. (1995). Effect of iron acquisition on induction of DNA single-strand breaks by erionite, a carcinogenic mineral fiber. *Arch. Biochem. Biophys.* 316, 507–514.

Fach, E., Waldman, W. J., Williams, M., Long, J., Meister, R. K. & Dutta, P. K. (2002). Analysis of the biological and chemical reactivity of zeolite-based aluminosilicate fibers and particulates. *Environ. Health Persp*. 110, 1087–1096.

Gottardi, G. & Galli, E. (1985). General Information on Zeolites in Natural zeolites. pp. 1–34, Springer-Verlag.

Grifasi, N., Ziantoni, B., Fino, D. et al. (2025). Fundamental properties and sustainable applications of the natural zeolite clinoptilolite. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 32, 27805–27840. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33656-5

Groves A.W. (1951). Silicate analysis. A manual for geologists and chemists with chapters on check calculations and geochemical data. 2nd edition. With a foreword by Professor A. Holmes. George Allen & Unwin Ltd. London.

Hay, R. L. (1966). Zeolites and Zeolitic Reactions in Sedimentary Rocks. *Geological Society of America Special Paper*, 85, 1–130.

Hay, R. L. (1978). Geologic Occurrence of Zeolites. In Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Use, edited by F. A. Mumpton & L. B. Sand, Pergamon Press, pp. 135–143. Hardy, J. A. & Aust, A. E. (1995). Iron in Asbestos Chemistry and Carcinogenicity. *Chem. Rev.* 95, 97–118.

Iijima, A. & Utada, M. (1966). Zeolites in sedimentary rocks, with reference to the depositional environments and zonal distribution. *Sedimentology*, 7(4), 327–357.

Iijima, A. & Utada, M. (1972). A Critical Review on the Occurrence of Zeolites in Sedimentary Rocks in Japan. *Japanese Journal of Geology and Geography*, 42, 61–84.

Inglezakis, V. J., & Zorpas, A. A. (2012). Handbook of Natural Zeolites.*Bentham Science Publishers*, Sharjah, UAE.

Kašić, V. (2018). *Mineragenija zeolitskih tufova Srbije*, doktorska disertacija, Rudarsko-Geološki Fakultet, Beograd, 168. 35-37

Kašić, V., Radosavljević-Mihajlović, A., Radosavljević, S., Stojanović, J., Mihajlović, S. & Vukadinović, M. (2021). Geological and mineral characteristics of zeolitic tuff Toponica deposits near Kosovska Kamenica. *Proceedings of the 52nd International October Conference on Mining and Metallurgy – IOC 2021*, University of Belgrade – Technical Faculty in Bor, Serbia, pp. 181–184.

Kašić, V., Simić, V., Stojanović, J., Radosavljević-MIhajlović, S.A., Mihajlović, S. & Đorđević, (2023). Geologija ležišta zeolitskih tufova Srbije. *14 Simpozijum „Rudarstvo 2023" Održivi razvoj u rudarstvu i energetici*, 95-110.

Koyama, K. & Takeuchi, Y. 1977. Clinoptilolite: The distribution of potassium atoms and its role in thermal stability. *Zeitschrift für Kristallographie*, 145: 216-239.

Leggo, P.J, Cochemé, J-J., Demant, A., Lee , W.T. (2001). The role of argillic alteration in the zeolitization of volcanic glass. *Mineralogical Magazine*, 65(5):653-663. doi:10.1180/002646101317018479

Li, S., Zhang, J., & Wang, Y. (2013). Crystal structure of clinoptilolite and its flexibility: a single-crystal X-ray study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 174, 69–76. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.03.034

Marović, M., Krstić, N., Stanić, S. Cvetković, V., Petrović, M. (1999). The evolution of Neogene sedimentation provincies of central Balkan Peninsula (Evolucija neogenih sedimentacionih prostora centralnih delova Balkanskog poluostrva). *Bulletin of Geoinstitute*, 36: 25–94.

Matassa, R., Cametti, G., Ballirano, P., Pacella, A., Bloise, A., Montereali, M. R., & Gualtieri, A. F. (2015). Mineralogical and toxicological characterization of erionite fibers from natural outcrops. *Chemosphere*, 132, 109–116.

Mihajlović, K. M., Stojanović, J., Radosavljević-Mihajlović, A., Jelić, I., Erić, S., Mihajlović, S. & Vuković, N. (2025). Mineralogical and structural characterization of zeolitic tuff from the Slanci deposit, Serbia. *Geološki anali Balkanskoga poluostrva*. https://doi.org/10.2298/GABP251014011M

Mihajlović, K. M., Stojanović, J., Mihajlović, S., Jelić, I., & Radosavljević-Mihajlović, A. (2025). Comparative mineralogical analysis of two zeolitic tuffs Slanci and Zlatokop. *Proceedings of the 56th International October Conference on Mining and Metallurgy (IOC 2025)*, Bor Lake, Bor, Serbia, 22–25 October 2025. DOI:10.5937/IOC25045M

Ming, D. W. & Dixon, J. B. (1987). Quantitative determination of clinoptilolite in soils by a cation-exchange capacity method. Clays Clay Miner. 35, 1: 463-468.

Momma, K. & Izumi, F. (2011). VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *J. Appl. Crystallography*. 44: 1272-1276.

Murray, J., & Renard, A. F. (1891). Report on the Deep Sea Deposits collected during the Voyage of H.M.S. Challenger (5). Eyre & Spottiswoode.

Нејић Љ., (1970): *Елаборат о резервама и квалитету туфа Топоница код Косовске Каменице*, Фонд Геозавода, Београд, 58 стр.

Obradović J., (1977): The review on the occurrences of zeolites in sedimentary rocks in Yugoslavia. *Annales géologiques de la Peninsule balkanique*, Beograd, 41, 293-302.

Obradović, J. Vasić, N., Kašanin-Grubin, M., Grubin N. 1999. Neogene lacustrine sediments and authigenic minerals geochemical characteristics. *Geološki Anali Balkanskog poluostrva*, 63, 135-154.

Obradović J., (1988): Occurrences and genesis of sedimentary zeolites in Serbia, Yugoslavia. In: Kallo D., Sherry H.S. (eds) *Occurrence, Properties and Utilisation of Natural Zeolites*, Akademiai Kiado, Budapest, 59-69.

Ogihara, S. (2020). Occurrence and origin of natural zeolites. *Shigen Chishitsu*, 70(2), 89–99.

Passaglia, E., & Vezzalini, M. G. (1985). Crystal chemistry of diagenetic zeolites in volcanoclastic deposits of Italy. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 90, 190–198.

Radosavljević-Mihajlović, S. A. Stojanović, J. & Kašić, V. (2005). Uporedne mineraloške, kristalohemijske i termičke osobine ležišta zeolitskih tufova Srbije bogatih mineralima HEU-tipa. *Radovi Geoinstituta*, 40: 191-200.

Radosavljević-Mihajlović, S. A. & Matović, B. (2008). Prirodni zeoliti i mogućnost njegove primene u zaštiti životne sredine. *NBP, Nauka, Tehnika, bezbednost*, 13(2), 107-119.

Radosavljević Mihajlović, A., Došen, A., Stojanović, J., Kašić, V., & Simić, V. (2018). Occurrences and properties of zeolitic tuffs in Serbia. In: *Proceedings of the 5th Serbian-Croatian-Slovenian Symposium on Zeolites.*

Radosavljević-Mihajlović, A., Daković, A., Kašić, V., Mitić, V., Stojanović, J., Sokić, M., Marković, M. (2018). Mineralogy and crystallographic properties of Heu-type zeolitic tuff from the Novaković deposit, Bosnia and Herzegovina. *Hemijska industrija*, 72, 6: 371-382.

Rietveld, H.M. (1969). A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *J. Appl. Crystal.* 2: 65-71.

Rodriguez-Carvajal, J. (1990). Fullprof: A Program for Rietveld Refinement and Pattern Matching Analysis. Abstract of the Satellite Meeting on Powder Diffraction of the *XV Congress of the IUCr*, Toulouse, France, 127.

Rüdinger, B., Tillmanns, E. & Hentschel, G.(1993). Bellbergite—a new mineral with the zeolite structure type EAB. *Miner. Petrol.* 48,147–152.

Staples, L. W. & Gard, J. A. (1959). The fibrous zeolite erionite; its occurrence, unit cell, and structure. Mineral. Mag., 32, 261–281.

Sheppard, R. A. & Gude, A. J. (1968). (Navodi se u USGS izveštaju: Zeolites and Associated Authigenic Silicate Minerals in Selected Zeolitic Tuffs from the Western United States).

Sheppard, R. A . (1994). Zeolitic diagenesis of tuffs in miocene lacustrine rocks near Harney Lake, Harney County, OregonUSGS – Zeolitic Diagenesis of Tuffs in the Western United States. *U.S. Geological Survey Bulletin*,2108.

Sugiyama, K., & Takeuchi, Y. (1986). The crystal structure of heulandite. Acta Crystallographica Section B: Structural Science, 42, 134–144.

Taylor, J.C. (1991). Computer Programs for Standard less Quantitative Analysis of Minerals Using the Full Powder Diffraction Profile. *Powder Diffraction*, 6, 2-9.

Utada, M. (1991). Zeolitization in the Neogene formations of Japan. *Episodes*, 14(3).

Vasconcelos, A. A., Len, T., de Oliveira, A. d. N., Costa, A. A. F. d., Souza, A. R. d. S., Costa, C. E. F. d., Luque, R., Rocha Filho, G. N. d., Noronha, R. C. R., & Nascimento, L. A. S. d. (2023). Zeolites: A Theoretical and Practical Approach with Uses in (Bio)Chemical Processes. *Applied Sciences*, 13(3), 1897. https://doi.org/10.3390/app13031897

Wenk, H.-R., & Bulakh, A. (2004). Framework silicates. Zeolites and ion exchange properties of minerals. Minerals: Their Constitution and Origin (496–508). Cambridge: Cambridge University Press.

Одрицање од одговорности / Напомена издавача: Изјаве, мишљења и подаци садржани у свим публикацијама су искључиво мишљење појединачних аутора/аутора и сарадника и не представљају ставове СГД и/или уредника. СГД и/или уредници одричу се одговорности за било какве повреде личности или имовине које могу настати као резултат било којих идеја, метода, упутстава или производа на које се упућује у садржају.

Zapisnici SGD, 68-1, 53-63 (2026)
ORIGINAL PAPER / ОРИГИНЛАНИ РАД
doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.18879372

Geological characteristics and 3D modeling of the Pobrđe borate deposit

Branko KOSTIĆ[1]*, Dragana ŽIVOTIĆ[1] & Vladimir SIMIĆ[1]

[1]University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, Djusina 7, 11000 Belgrade, Serbia.
*Corresponding Author e-mail: G612-23@student.rgf.bg.ac.rs

Abstract: The volcanogenic–sedimentary Pobrđe deposit represents the first and currently the only active borate mine within the territory of the Republic of Serbia. The genesis and present-day morphology of the deposit are the result of a complex interaction between tectonic processes, hydrothermal fluids, and a lacustrine environment, controlled by specific relief and paleoclimatic conditions.
The Pobrđe deposit is located within the Ibar intramontane basin, which belongs to the Dinaric tectonic belt and represents one of the Neogene lacustrine systems. Based on exploration drilling and mining exploration activities, the morphostructural and morphogenetic characteristics of the deposit were defined, indicating a geometry composed of two subparallel layers. The geological setting of the deposit is characterized by an alternation of sandstones, claystones, volcaniclastics, tuffaceous sediments, and carbonates, with a characteristic presence of kerogen observed throughout the underground mine workings. Implicit modeling of the ore bodies was performed using the Studio RM software package (Datamine), resulting in the development of a genetic model of the deposit. The database was constructed from exploration drillhole data and detailed mapping of underground mine workings, which enabled the generation of a series of pseudo-drillholes based on mapped drifts. The modeling results identified three subparallel ore layers, as well as a zone of vertical mineralization in the southern part of the investigated area, suggesting the presence of a potential feeder structure. The model highlights the southern part of the deposit as particularly prospective in terms of resource expansion.

Keywords: implicit modeling; Studio RM/Datamine; Ibar Basin; borates.
Article history: <Manuscript received 30 January 2026. - Accepted 26 February 2026>

Геолошке карактеристике и 3Д модел лежишта бората Побрђе

Бранко КОСТИЋ[1]*, Драгана ЖИВОТИЋ[1] & Владимир СИМИЋ[1]

[1]Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, 11000 Београд, Србија.
*Corresponding Author e-mail: G612-23@student.rgf.bg.ac.rs

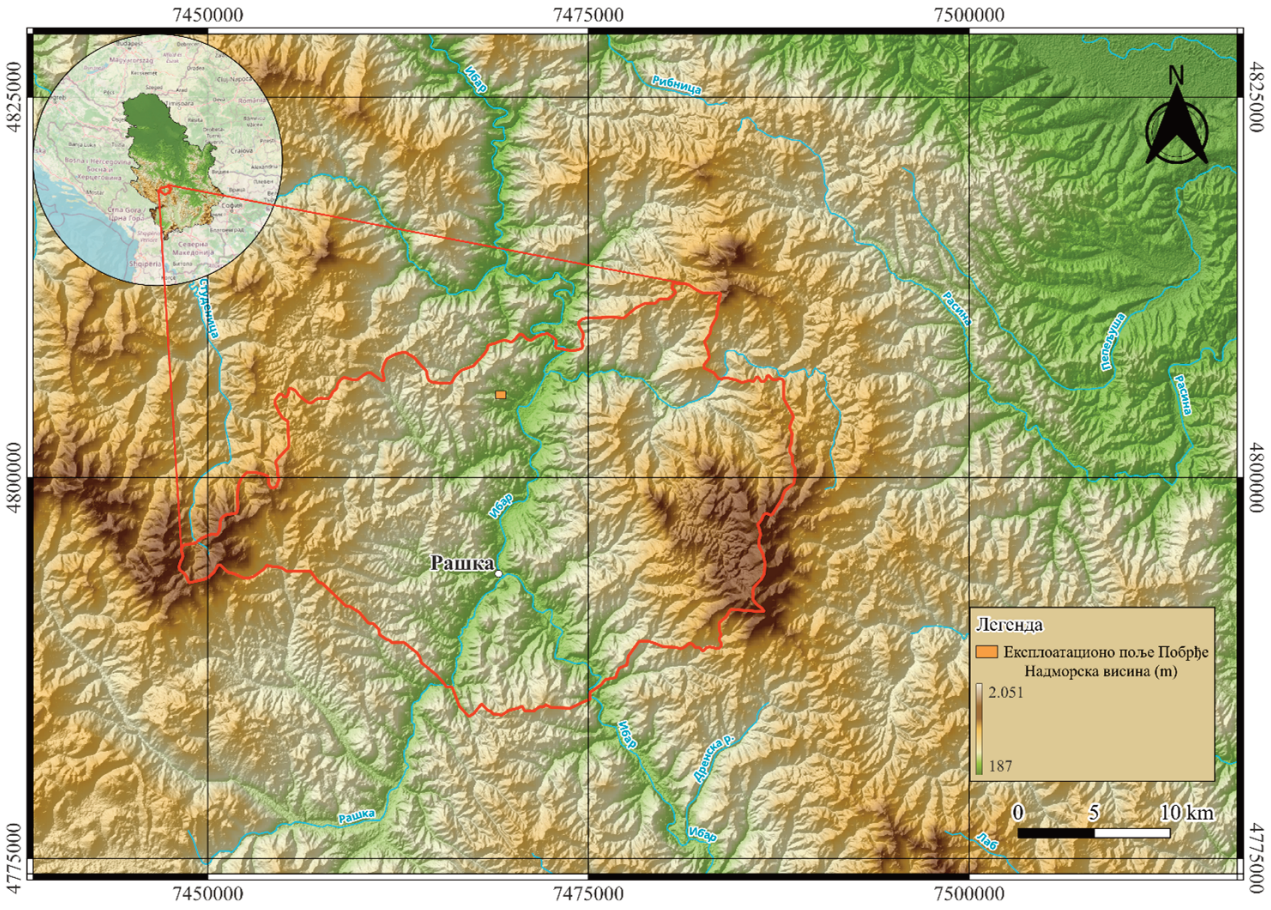
Апстракт: Вулканогено – седиментно лежиште Побрђе је први и тренутно једини активни рудник бората на простору Републике Србије. Специфична интеракција тектонских процеса, хидротермалних раствора и језерске средине обликоване карактеристичним рељефом и климатским условима, допринела је генези лежишта и његовом савременом облику.
Ибарски интрамонтански басен, у оквиру којег се налази лежиште Побрђе, припада Динарском појасу и један је од неогених језерских система. Истражним бушењем и рударским истражним радовима дефинисан је морфоструктурно-морфогенетски облик лежишта представљен са два субпаралелна слоја. Геолошку грађу лежишта карактерише смена пешчара, глинаца, вуланокластита, туфогених седимената и карбонатних стена уз карактеристично присуство керогена опажано дуж јамских просторија рудника.
Применом софтверског пакета Studio RM - програма Datamine извршено је имплицитно моделовање рудних тела при чему је креиран генетски модел. База података заснива се на истражним бушотинама и картирању јамских просторија помоћу којег је израђен низ пседуобушотина заснован на картираним ортовима. Моделовањем је издвојено три субпаралелна рудна слоја уз присуство зоне вертикалног орудњења у јужном делу истраживаног подручја које указује на потенцијални доводни канал. Модел указује на потенцијалност јужног дела лежишта са аспекта повећања ресурса.

Кључне речи: имплицитно моделовање; Studio RM/Datamine; Ибарски басен; борати.

Хронологија: <Рад примљен 30. јануар 2026. - Прихваћен 26. фебруар 2026>

1. Увод

Јарандолски интрамонтански неогени суб-басен представља део Ибарског басена који се простире дуж правца север-југ, од Ушћа на северу до Рашке на југу (Слика 1). Ова група обухвата, поред Јарандолског, и Ушћански, Тадењски и Градачки суб-басен. Интрамонтанске басене у полусушним и сушним регионима често карактерише хетерогена седиментација, под утицајем климатских, хидролошких, биолошких и тектонских фактора (Cohen et al., 2015).



Слика 1. Географска карта истражног подручја Побрђе (Према https://www.diva-gis.org/)

Настанак Јарандолског суб-басена везан је за почетак миоцена, када је дошло до раседања палеорељефа изграђеног пре свега од серпентинита и старијих дацитских андезита у област интензивне вишеструке вулканске активности (Andrić et al., 2015, Schefer et al., 2011). Седиментација у оквиру Ибарског басена започиње депоновањем базалтних конгломерата. У овим конгломератима, поред старијих валутака различитих геолошких формација, препознати су и фрагменти вулканита прве вулканске фазе из Копаоничке области (Kurešević, 2013). Изнад ових следе слојеви пешчара променљиве дебљине, разноврсног састава и величине зрна, који постепено прелазе у глинце и лапорце. Дакле, процес запуњавања језера односно Јарандолског суб-басена, започео је након што је дошло до изливања вулканита прве фазе андезитско-дацитског типа, наставило се током друге кварцлатитске вулканске фазе и завршено је након утискивања гранодиоритске интрузије на Копаонику. Еволуција Ибарског басена поклапа се са миоценским климатским оптимумом (~18–13 Ma), када су тектонске екстензионе фазе и локални магматизам значајно утицали на седиментацију и проток рудоносних хидротермалних раствора (Andrić et al., 2017, Sant et al., 2018). Током еволуције, суб-басени какав је и Јарандолски могу постати хидролошки затворени и развити слано-

алкални карактер (Renaut et al., 2021). У случају Ибарског басена, депозиција је такође под утицајем геотермалних извора и пост-екстензионих тектонских догађаја (Andrić et al., 2015; Schefer et al., 2011). У овом контексту, Ибарски басен представља оптимално место за проучавање интеракције климатских, хидротермалних и тектонских фактора у контроли депозиције борних минерала, као и алкалних седимената у интрамонтанским басенима Динарида (Andrić-Tomašević et al., 2025).

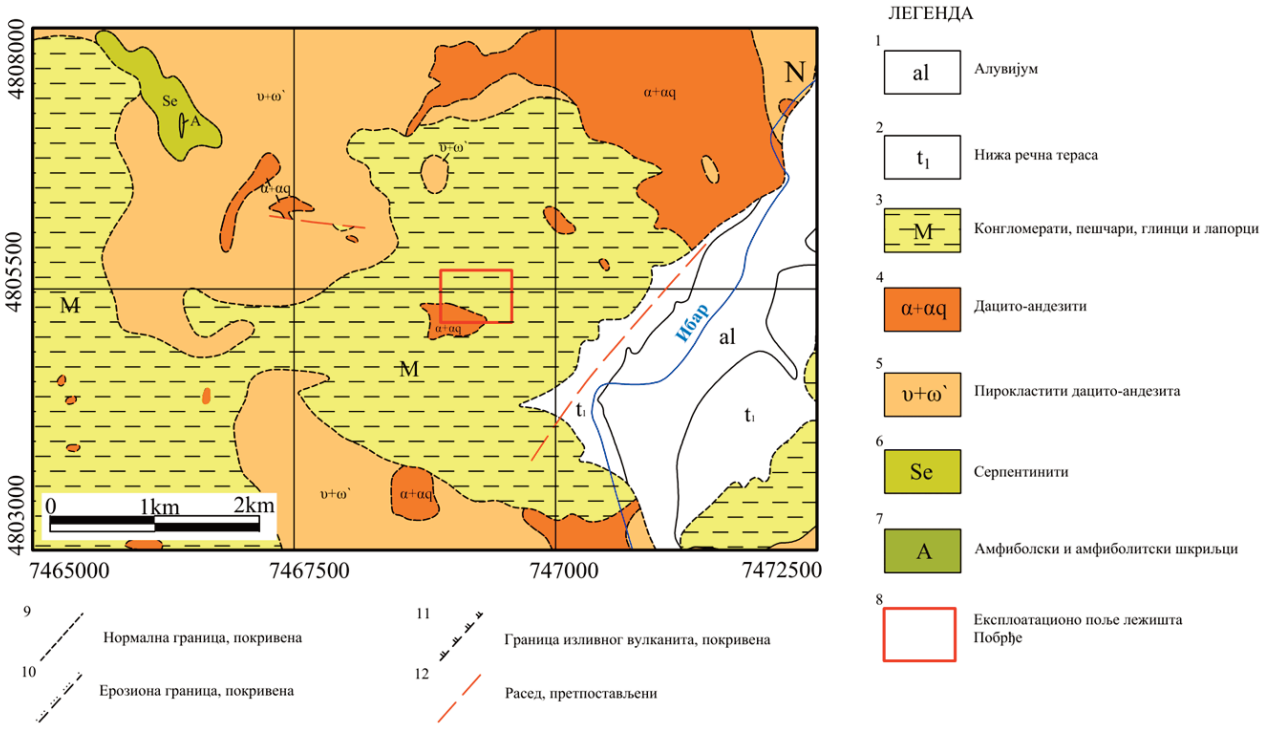
Савремени концепт истраживања лежишта минералних сировина све више примењује метод 3Д геолошко моделовање као кључни алат за интеграцију различитих података у циљу унапређење разумевања просторног положаја рудних тела, као и променљивости квалитета у простору. За разлику од класичних дводимензионалних карата и профила, 3Д геолошки модели омогућавају реалистичну визуелизацију геолошке грађе, структурних елемената и геометрије рудних тела у простору, као и анализу њихових међусобних односа (Turner, 2006). Геолошко моделовање представља процес реконструкције подповршинске геолошке средине на основу геолошких, геофизичких, геохемијских података, као и рударских истражних радова, при чему се примењују експлицитне или имплицитне методе интерполације (Caumon et al., 2009; Guo et al., 2020). Примена 3Д модела омогућава интеграцију података различите резолуције и степена поузданости у јединствен геолошки модел који служи као основа за доношење одлука у планирању и управљању ресурсима (Yan-lin et al., 2011).

Овај рад обухвата израду и анализу 3Д геолошког модела лежишта Побрђе, заснованог на подацима из истражних бушотина и рударских истражних радова. У оквиру истраживања извршено је одређивање кључних геолошких карактеристика лежишта које условљавају и унапређују квалитет 3Д модела, са посебним освртом на просторну интерпретацију литолошких јединица и борне минерализације у оквиру Побрђског дела Јарандолског суб-басена. Рад указује на значај 3Д моделовања као специфичног метода у геолошким истраживањима и доприноси разумевању унутрашње грађе и еволуције вулканогено – седиментног лежишта Побрђе у Јарандолском суб-басену.

2. Геолошке карактеристике

Ибарски басен је интермонтански басен у унутрашњим Динаридима, формиран током миоцена као „supra-detachment“ басен чија еволуција се везује за екстензију и ексхумацију метаморфног језгра Копаоника и Студенице пре 21-17 Ma (Слика 2, Schefer et al., 2010). Седиментација у оквиру басена је почела у континенталним условима пре око 19–17 Ma и обухватила је све континенталне фације, од алувијалних и делтних до слатководних језерских средина (Krstić et al., 2001; Prysjazhnjuk et al., 2000). Током фазе отвореног језера, хумидна клима миоценског климатског оптимума (MCO), у комбинацији са тектонским активностима, контролисала је висок прилив седимената у басен. Алувијални и делтни седименти указују да је материјал у њима пореклом из локалних извора - офилита, андезита и гранодиорита. Промена климе ка ариднијим климатским условима довела је до формирања затвореног језерског система, са карактеристичним падом нивоа воде. Кратки хумидни периоди карактерисани су повишеним водостајем који је допринео таложењу кластичних седимената (Obradović et al., 1992).Термална историја басена је одређена применом метода „fission track“ на узорцима апатита и циркона и података добијених мерењем рефлексије витринита, показујући максималне палеотемпературе од 120–130 °C (Andrić et al., 2015). Већа рефлексија витринита у узорцима из Тадењског суб-басена указује на већу термалну енергију у односу на Пискањски део Јарандолског суб-басена. Период хлађења, а на основу моделовања термалних података апатита, почиње пре 10-8 Ma (Andrić et al., 2015), док се у оквиру лежишта Пискања локални термални утицај манифестује око 7,1 Ma што указује на накнадна резагревања (Schefer et al., 2011). Термална еволуција контролисана је ексхумацијом и хлађењем Студеничког и Копаоничког језгра, при чему је брзо хлађење подинског блока довело до преноса топлоте на повлатни блок басена. Промена са екстензије на инверзију басена и ерозију, као период захлађења од око 10–8 Ma, означава промену тектонских услова. Синхрони тектонски и магматски процеси у подручју са аридном климом утицали су на стварање и развој сланих-алкалних језера. У централним деловима Јарандолског суб-басена локализована су лежишта

бората, која се стратиграфски налазе изнад магнезита и угљених слојева (Obradović & Vasić, 1990). Хидротермални флуиди као носиоци бора у језерској средини са високим односом Ca^{2+}/Na^{+} утицали су на кристализацију колеманита, док је каснија промена хемизма раствора услед растварања глина условила таложење Na–Ca и Na-бората као што су улексит и боракс (Andrić-Tomašević et al., 2025). У завршним фазама генезе борних минерала обогаћење порних флуида силицијумом условило је таложење хаулита, који је делимично заменио раније формирани колеманит (Obradović et al., 1992).



Слика 2. Геолошка карта шире околине лежишта Побрђе (Модификовано према Urošević et al. 1973)

3. Методе

У раду су коришћени софтвериски пакети Studio RM и AutoCAD. У сврху 3Д компјутерског моделовања лежишта примењен је програм Datamine Studio RM верзија 1.13.202.0 . AutoCAD v.2023 коришћен је у циљу дефинисања просторног положаја јамских просторија рудника Побрђе, као и картираних и опробованих ортова. На основу тако добијених података касније је креиран низ додатних тачака-псеудобушотина ради добијања тачнијег просторног размештаја борне минерализације и ефикаснијег планирања будућих рударских активности.

3.1 База података

За потребе израде 3Д геолошког модела коришћен је софтвер Datamine, у оквиру кога је формирана јединствена релациона база података састављена од четири основне базе: Collar, Survey, Lithology и Assay. Наведене базе представљају основни скуп улазних података за просторну интерпретацију истражних бушотина и омогућавају интеграцију геометријских, геолошких и квалитативних параметара лежишта.

3.1.1 Collar база података

Collar база података садржи основне информације о бушотинама (Слика 3а), које дефинишу њихов просторни положај и опште техничке карактеристике. У овој бази су евидентиране координате улазних тачака бушотина (X, Y, Z), укупна дубина бушотина (ENDDEPTH), као и референтни систем (REFSYS) и референтни метод (REFMETH) уз датум извођења бушења (ENDDATE). Ови подаци представљају примарни референтни оквир за позиционирање бушотина у просторном координатном систему и неопходни су за све даље фазе моделовања.

3.1.2 Survey база података

Survey база података обухвата параметре оријентације бушотина дуж њихове осе (Слика 3б). У њој су дефинисани елементи пада бушотина по дубинским интервалима, као и подаци о евентуалним девијацијама од пројектованог правца бушења. Поред колона за појединачне бушотине (BHID) у оквиру ове базе налазе се и колона за интеервале (AT), колона за азимут (BRG), као и колона за пад бушотина (DIP). Ови подаци омогућавају корекцију стварног просторног положаја бушотина и обезбеђују тачност геометријске интерпретације у простору.

а)

BHID	XCOLLAR	YCOLLAR	ZCOLLAR	ENDDEPTH	REFSYS	REFMETH	ENDDATE
B-1	7469154	4805483	461.3	70	Local	GPS	11.11.1983
B-2	7469152	4805460	469.63	68	Local	GPS	11.11.1983
B-3	7469113	4805479	468.63	45	Local	GPS	11.11.1983
B-4	7469186	4805450	466.83	70	Local	GPS	12.11.1983
B-5	7469181	4805476	458.7	96	Local	GPS	11.11.1983

б)

BHID	AT	BRG	DIP
B-1	0	180	90
B-1	70	180	90
B-2	0	180	90
B-2	68	180	90

г)

BHID	FROM	TO	B_2O_3
B-1	41.97	42.57	27.6
B-1	42.57	43.27	35.93
B-1	43.27	43.47	36.22
B-2	27.7	29.7	35.61
B-2	62.0	62.6	36.9

в)

BHID	FROM	TO	NLITH	ZONE	LITH
B-1	0.0	6.0	1JH	1	Хумус
B-1	6.0	21.9	1JTK	5	Фино ламинирани лапорци и алевролити
B-1	21.9	27.1	3JV	3	Дацит
B-1	27.1	39.6	3JKV	3	Конгломерати са фрагментима дацита
B-1	39.6	41.0	3JKR	3	Бречасти лапоровити карбонати

Слика 3. Пример појединачних база података; а) Collar база; б) Survey база; в) Lithology база; г) Assay база;

3.1.3 Lithology база података

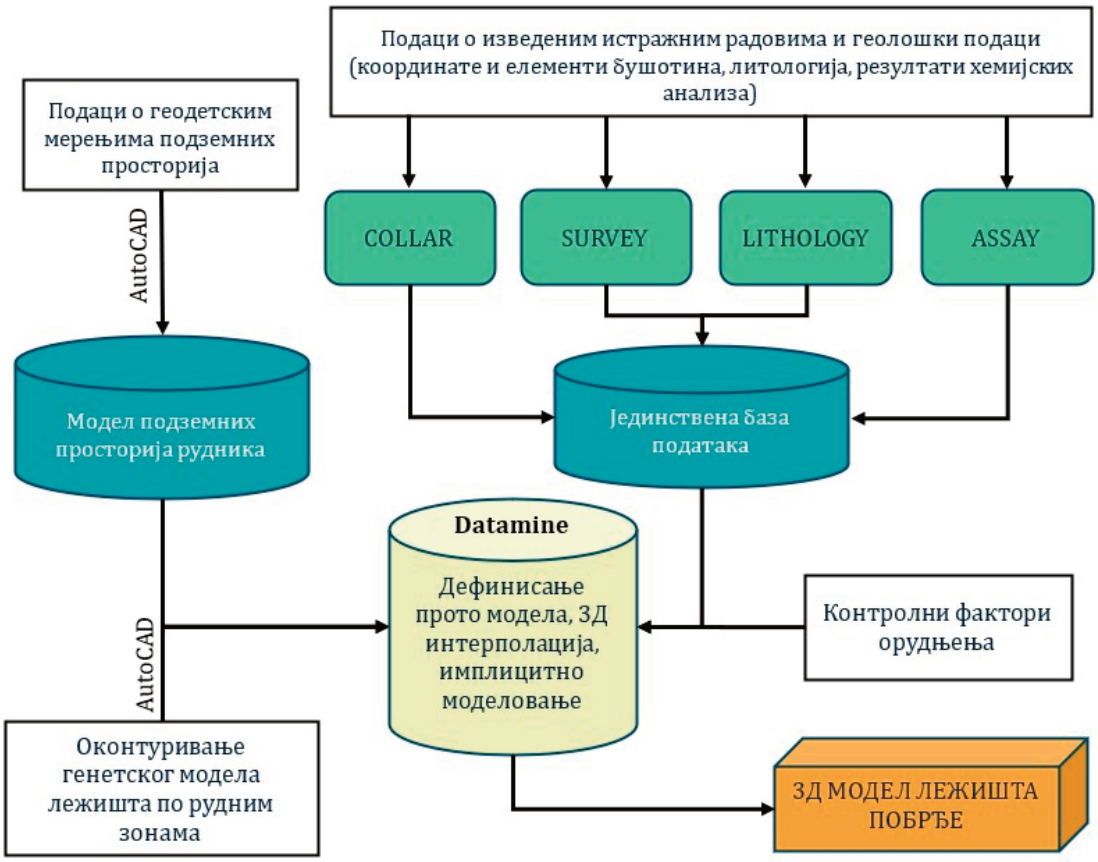
Lithology база података садржи резултате геолошког картирања бушотина по дубини (Слика 3в). Литолошке јединице су кодиране и класификоване у пет издвојених зона, на основу њихових литолошких карактеристика. У оквиру ове класификације, друга и четврта зона идентификоване су као рудне зоне. Оваква категоризација омогућава јасно разграничење литолошких целина и представља основу за дефинисање геолошких домена у процесу 3Д моделовања.

3.1.4 Assay база података

Assay база података садржи аналитичке резултате лабораторијских испитивања узорака из бушотина (Слика 3г). У базу су унети подаци о садржају B_2O_3 по опробованим интервалима. Ови подаци представљају основ за квалитативну и квантитативну анализу оруђења, као и за неопходно оконтурирање друге и четврте зоне. Такође, резултати лабораторијских испитивања могу бити коришћени за даљу процену расподеле корисне компоненте унутар дефинисаних геолошких блокова.

3.2 Метод 3Д моделовања

Процес израде модела састоји се од три дела (Слика 4). Први део има за циљ формирање појединачних база и унос података о просторном положају истражних радова, литологији и квалитету. Други део обрађује податке у циљу дигитализације истражних радова и подземних просторија у оквиру рудника Побрђе. Трећи део обухвата интерпретацију 3Д модела на основу комбинације оконтурених зона са јединственим моделом формираним интеграцијом свих позитивних интервала из истражних бушотина уз примену имплицитног моделовања. Креирани генетски модел примењује математичке алгоритме геометријске интерполације у циљу аутоматског генерисања слојева од интереса на основу података из бушотина поштујући геолошку контролу минерализације.



Слика 4. Блок шема 3Д моделовања (Модификовано према Xuan et al., 2024)

4. Резултати

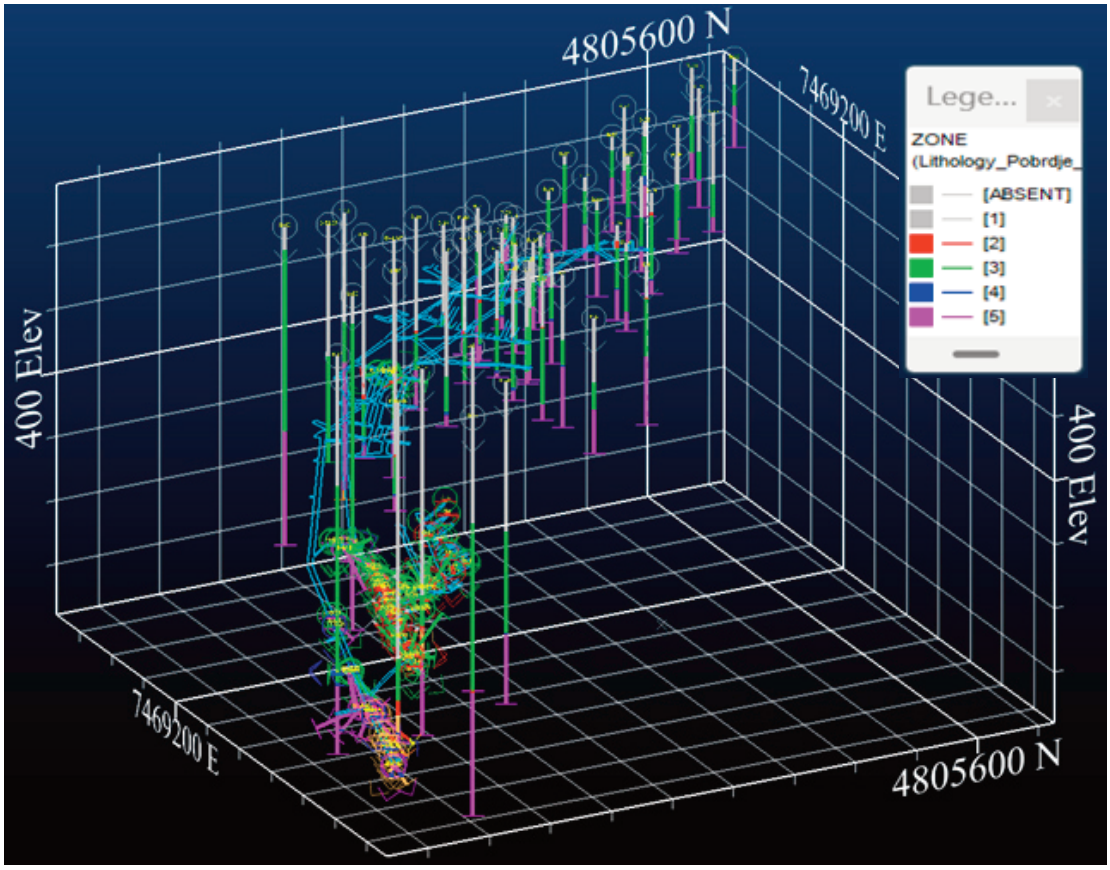
Применом софтверског пакета Studio RM и AutoCAD, као интеграцијом расположивих података израђен је 3Д генетски модел лежишта бората Побрђе.

4.1 Просторна интерпретација истражних бушотина и јамских просторија

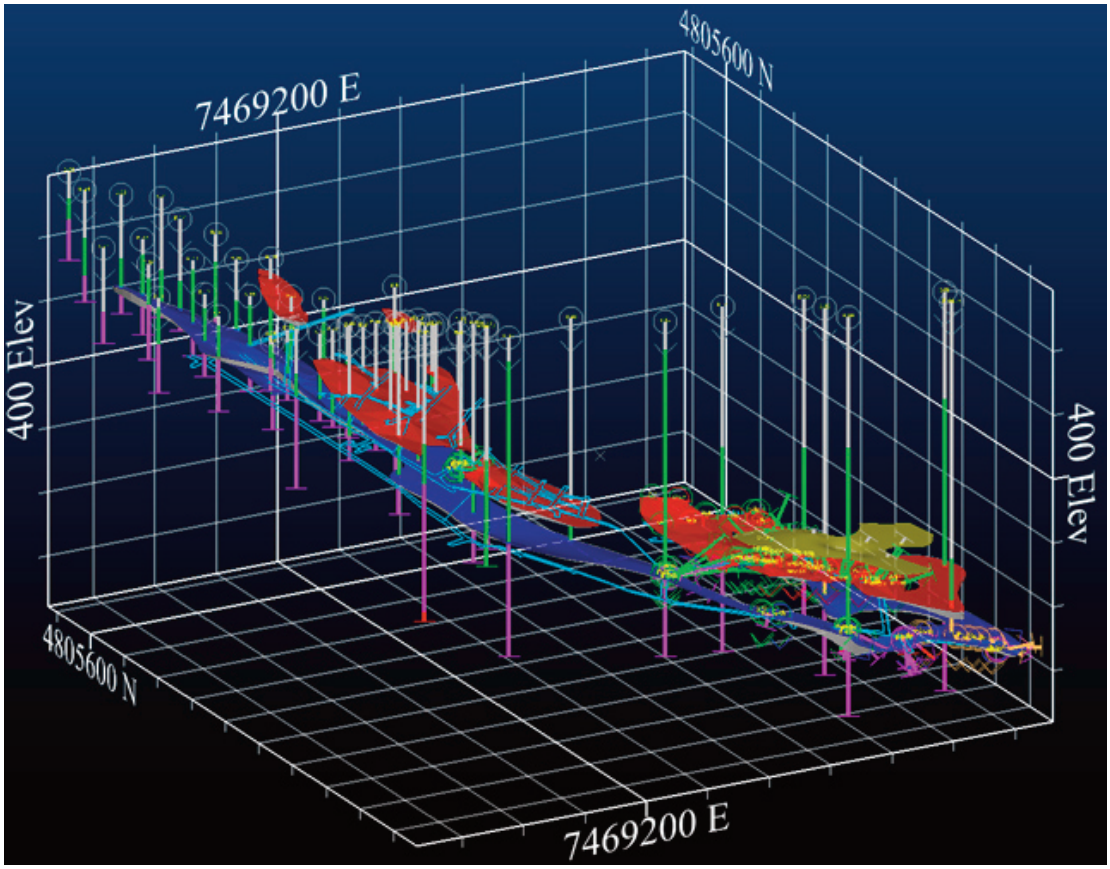
На основу база података Collar и Survey извршена је детаљна реконструкција оријентације истражних бушотина. Дигитализацијом подземних просторија, и постојећих рударских истражних радова у радно окружење софтвера AutoCAD и њиховом интеграцијом у Datamine, формиран је просторни модел који обједињује податке из површинских бушотина, бушотина рађених из јамских просторија са рударским истражним радовима (Слика 5).

4.2 Геолошка грађа и дефинисање рудних зона

Анализом Lithology и Assay база података, као и резултата геолошког картирања бушотина и јамских просторија издвојено је пет литолошких зона. Друга и четврта зона јасно су дефинисане као рудне зоне (Слика 6), што је потврђено њиховим континуитетом и повишеним садржајем B_2O_3. Генетско оконтурирање друге и четврте зоне, а затим и њихово 3Д моделовање указује на променљиву дебљину, али са јасно дефинисаним континуитетом прижања ССЗ-ЈЈИ. Зона два је представљена кроз четири издвојена рудна тела, од којих су две доминантне целине на јужном делу лежишта. Пад друге рудне зоне је у просеку 17°, док је просечна дебљина 1,34 m. Имплицитним моделовањем је уочено да је могуће раслојавање друге зоне у јужном делу истраживаног подручја на шта указује посебно субхоризонтално слојевито рудно тело. Услед недовољно густе мреже истражних бушотина и оријентације јамских просторија не може се са сигурношћу тврдити да је реч о истом слоју. Зона четири интерпретирана је као једно континуирано рудно тело просечне дебљине од 1,23 m. Пад четврте зоне је у просеку 26°. Генерално, дебљина рудних тела показује тенденцију раста у смеру ка југозападу.



Слика 5. 3Д модел подземних просторија рудника „Побрђе“ са приказом истражних бушотина (Grid spacing = 40m)



Слика 6. 3Д модел лежишта „Побрђе“ са приказом истражних бушотина и подземних просторија (Grid spacing = 40m)

4.3 Ресурси

У оквиру друге рудне зоне одређена је запремина од 23.444,25 m3, при запреминској маси борне минералне сировине од 2,48 t/m3 (Aničić, 1996) количина ресурса износи 58.141,75 t. Потенцијално раслојени део друге зоне има запремину 3.905,42 m3, односно ресурсе од 9.685,44 t. Запремина четврте зоне износи 34.651,72 m3, при запреминској маси од 2,48 g/m3 (Aničić, 1996) количина ресурса износи 85.936,27 t.

5. Дискусија

Израда 3Д генетског модела лежишта Побрђе омогућила је интеграцију различитих врста података у један просторни оквир са јасном интерпретацијом рудних слојева. 3Д модел лежишта Побрђе омогућио је боље квантитативно и квалитативно разумевање података у простору у односу на геолошке планове и профиле у складу са општим трендом примене софтвера у геолошким истраживањима (Turner, 2006). Примена методе имплицитног моделовања на скупу података из истражних бушотина и рударских истражних радова омогућила је реконструкцију континуитета рудних тела, као и сагледавање променљивости дебљине рудних тела у простору (Li et al., 2022). Моделовањем је утврђено могуће постојање трећег рудног слоја, односно могућег раслојавања друге рудне зоне на коти ~350 m. Примењена мрежа бушења показује задовољавајући степен поузданости у већем делу лежишта. Међутим, централној зони лежишта неопходно је њено додатно огушњавање ради поузданијег дефинисања облика и континуитета рудних тела, нарочито друге зоне.

Поређењем количине резерви одређених применом метода геолошких блокова и геолошких профила у склопу „Елабората о квалитету и резерама борних минерала – Побрђски поток-Баљевац на Ибру“ (Aničić, 1996) и оконтуреног модела у софтверу Datamine одређена је разлика у количини ресурса мања од 2%.

У склопу извршеног истражног бушења, на јужном делу истражног подручја, током моделовања рудних тела уз поштовање података геолошког картирања бушотина и резултата хемијских анализа, детектован је изражен вертикални интерал орудњења. Уочена морфологија и просторна локализација позитивних интервала у бушотинама могу указивати на постојање потенцијалног доводног канала, што захтева спровођење додатних, детаљнијих геолошких и структурних истраживања, као и примену допунских истражних метода ради поузданије интерпретације. (Codeço et al., 2022).

Поред аналитичког значаја, креирани 3Д модел има и практичну примену у геолошким истраживањима и рударству. Модел омогућава прецизно планирање будућих рударских радова, одређивање зона са потенцијалним високим садржајем бора у циљу пројектовања детаљних истраживања и минимизирање ризика од негативног бушења. Такође, модел служи као алат за оптимизацију експлоатације, прорачуна ресурса и дефинисање економски најповољнијих путева транспортних и других инфраструктурних објеката унутар рудника (Wu & Hu, 2014; Li et al., 2022).

6. Закључак

У раду је приказан 3Д генетски модел вулакногено-седиментног лежишта бората Побрђе, користећи податке из истражних бушотина и рударских истражних радова, интегрисаних у софтверским пакетима Studio RM – Datamine и AutoCAD. Геолошка анализа показала је постојање пет литолошких зона, при чему су друга и четврта зона јасно дефинисане као рудне на основу резултата хемијских анализа садржаја B_2O_3 у узорцима. Имплицитним моделовањем утврђена је варијабилност дебљине рудних тела и потенцијално постојање додатног слоја који раније није истраживан у јужном делу лежишта, као и зона вертикалног орудњења која указује на могући доводни канал.

Процена ресурса показала је да друга рудна зона садржи 58.141,75 t, док четврта зона садржи 85.936,27 t, што потврђује потенцијални економски значај лежишта. Поређење са Елаборатом о квалитету и резерама борних минерала – Побрђски поток-Баљевац на Ибру“ (Aničić, 1996) показало је разлику мању од 2%, што указује на висок ниво поузданости примене 3Д модела у процени ресурса.

Рад истиче значај 3Д геолошког моделовања не само као аналитичког алата за разумевање геолошке грађе лежишта, већ и као практичног средства за планирање рударских активности, оптимизацију експлоатације и смањење ризика при новим истражним радовима. Модел омогућава прецизан просторни приказ рудних тела, идентификацију потенцијално богатих зона и ефикасно планирање будућих истражних радова унутар рудника. Примењена техника моделовања потврђује да интеграција података из различитих извора у јединствени 3Д модел представља кључни корак у модерним геолошким истраживањима и управљању рудним ресурсима, у складу са савременим трендовима примене имплицитног моделовања (Turner, 2006; Li et al., 2022; Zhang et al., 2025).

У следећој фази рада потребно је додатно погушћавање мреже бушотина, посебно у централном делу лежишта, као и примена других геолошких метода, што би омогућило прецизније дефинисање облика рудних тела, њихово распрострањење, боље карактерисање потенцијалних доводних канала и оптимизацију експлоатације.

Доприноси аутора

Аутори потврђују да је рукопис аутентичан и да нема сукоба интереса везаних за извор података. Бранко Костић је поред писања рада, већинским делом учествовао у изради 3Д модела. Проф. др Драгана Животић је значајно помогла при креирању базе података потребне за израду 3Д модела, док је проф. др Владимир Симић допринео разумевању генезе лежишта и морфоструктурних карактеристика лежишта значајних за оконтуривање генетског модела.

Финансирање

Ово истраживање је подржано од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије по основу уговора 451-03-34/2026-03/ 200126 и 451-03-33/2026-03/ 200126.

Захвланост

Аутори се захваљују Управи Ибарских рудника угља, а посебно геолошкој служби Ибарских рудника угља под руководством дипл. инж. геол. Перише Бачанина на уступљеној документацији и помоћи при фази теренских истраживања.

Сукоб интереса

Аутори изјављују да немају било какав финансијски, професионални или лични сукоб интереса који би могао утицати на објективност резултата и тумачење података представљених у овом раду. Ниједан од аутора није у позицији која би могла изазвати сумњу у непристрасност истраживања, нити је било директног или индиректног комерцијалног, институционалног или личног утицаја на израду рукописа. Уколико дође до промене околности, аутори ће благовремено обавестити уредништво.

Литература - References

Andrić-Tomašević, N., F. Walter, B., Simić, V., Raza, M., Životić, D., Novković, Ž., Kolb, J., Gerdes, A., & Beranoaguirre, A. (2025). "Contributions of arid climate and hydrothermal fluid flow on sedimentation in saline- alkaline lakes: Insight from the Ibar intramontane basin (Southern Serbia)". *The Depositional Record*. https://doi.org/10.1002/dep2.70017

Andrić, N., Sant, K., Matenco, L., Mandic, O., Tomljenović, B., Pavelić, D., Hrvatović, H., Demir, V. & Ooms, J. (2017). The link between tectonics and sedimentation in asymmetric extensional basins—inferences from the study of the Sarajevo-Zenica Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 83, 305–332. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.02.024

Andrić, N., Fügenschuh, B., Životić, D., & Cvetković, V. (2015). The thermal history of the Miocene Ibar Basin (Southern Serbia): new constraints from apatite and zircon fission-track and vitrinite reflectance data. *Geologica Carpatica*, 66-1, 37–50. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.020

Aničić S. (1996). *Elaborat o kvalitetu i rezervama bornih minerala - Pobrđski potok- Baljevac na Ibru*. DP "Geo zavod-nemetali", Beograd.

Caumon, G., Collon-Drouaillet, P., Le Carlier de Veslud, C., Viseur, S., & Sausse, J. (2009). Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures. *Mathematical Geosciences*. 41. 927-945. https://doi.org/10.1007/s11004-009-9244-2

*Codeço, M. S., Weis, P., & Andersen, C. (2022). Numerical modeling of structurally controlled ore formation in mag*matic-hydrothermal systems. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23. https://doi.org/10.1029/2021GC010302

Cohen, A., McGlue, M.M., Ellis, G.S., Zani, H., Swarzenski, P.W.,Assine, M.L. & Silva, A. (2015). Lake formation, characteristics,and evolution in retroarc deposystems: a synthesis of the mod-ern Andean orogen and its associated basins. In: DeCelles, P.G.,Ducea, M.N., Carrapa, B. & Kapp, P.A. (Eds.) Geodynamics ofa Cordilleran Orogenic System: the Central Andes of Argentinaand Northern Chile, Vol. 212. Boulder, Colorado: *Geological Society of America Memoir,* pp. 309–335. https://doi.org/10.1130/2015.1212

Xuan, D. N., Phan Trong, T., Trinh Hai, S., Bui Vinh, H., Nguyen Quoc, D., & Van-Hao, D. (2024). 3D models for hydro--thermal copper ore bodies at Sin Quyen deposit, North Vietnam: A case report for ore reserves and prediction of hidden mineral resource potential. Heliyon. 10 (12). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33017

Guo, J., Wang, J., Wu, L., Liu, C., Li, C., Li, F., Lin, M., Jessell, M. W., Li, P., Dai, X., & Tang, J. (2020). Explicit-implicit--integrated 3-D geological modelling approach: A case study of the Xianyan Demolition Volcano (Fujian, China). *Tectonophysics*, 795, Article 228648. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228648

Krstić N., Dumadzanov N., Olujić J., Vujanović L. & JankovicGolubović J. (2001). Interbedded tuff and bentonite in the Neogene lacustrine sediments of the central part of the Balkan Peninsula. A review. *Acta Vulcanol*. 13, 91—99. https://digital.casalini.it/10.1400/19067

Kurešević, L. M. (2013). Potencijalnost tercijarnih magmatskih kompleksa Vardarske zone Srbije sa aspekta arhitektonskog građevinskog kamena: doktorska disertacija (стр. 254). http://phaidrabg.bg.ac.rs/o:7686

Li, J., Liu, P., Wang, X., et al. (2022). 3D geological implicit modeling method of regular voxel splitting based on layered interpolation data. Scientific Reports, 12, 13840. https://doi.org/10.1038/s41598-022-17231-x

Obradović, J., Stamatakis, M.G., Anicic, S. & Economou, G.S. (1992). Borate and borosilicate deposits in the Miocen Jarandol Basin, Serbia, Yugoslavia. *Economic Geology*, 87(8), 2169–2174. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.8.2169

Obradović, J., & Vasić, N., 1990, Sedimentary facies and some ore deposits in Yugoslavia: Internat. Assoc. Sedimentologists Spec. Pub., v. 11, p. 147-156.

Prysjazhnjuk V., Kovalenko V. & Krstić N. (2000). On the terrestrial and freshwater molluscs from Neogene of Western Serbia. *Geology and metallogeny of the Dinarides and the Vardar zone. Proc. Internat. Symp.*, Zvornik, Belgrade, 219—224.

Renaut, R.W., Owen, R.B., Lowenstein, T.K., De Cort, G., Mcnulty,E., Scott, J.J. & Mbuthia, A. (2021). The role of hydrothermalfluids in sedimentation in saline alkaline lakes: evidence fromNasikie Engida, Kenya Rift Valley. *Sedimentology*, 68, 108–134. https://doi.org/10.1111/sed.12778

Sant, K., Mandic, O., Rundić, L., Kuiper, K.F. & Krijgsman, W. (2018). Age and evolution of the Serbian Lake System: integrated results from Middle Miocene Lake Popovac. *Newsletters on Stratigraphy*, 51, 117–143. http://dx.doi.org/10.1127/nos/2016/0360

Schefer, S., Cvetković, V., Fügenschuh, B. Kounov, A., Ovtcharova, M., Schaltegger, U., Schmid, S., M., (2011). Cenozoic granitoids in the Dinarides of southern Serbia: age of intrusion, isotope geochemistry, exhumation history and significance for the geodynamic evolution of the Balkan Peninsula. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 100, 1181–1206. https://doi.org/10.1007/s00531-010-0599-x

Schefer, S., Egli, D., Missoni, S., Bernoulli, D., Fügenschuh, B.,Gawlick, H.J., Jovanović, D., Krystyn, L., Lein, R., Schmid, S.M.& Sudar, M.N. (2010). Triassic metasediments in the Internal Dinarides (Kopaonik area, southern Serbia): stratigraphy, paleogeographic and tectonic significance. *Geologica Carpathica*, 61, 89–109. https://doi.org/10.2478/v10096-010-0003-6

Turner, A.K. (2006). Challenges and trends for geological modelling and visualisation. *Bull Eng Geol Environ* 65, 109–127. https://doi.org/10.1007/s10064-005-0015-0

Urošević, M., Pavlović, Z., Klisić, M., Brković, T., Malešević, M., & Trifunović, S. (1973). *Osnovna geološka karta 1:100.000, Tumač za list Vrnjci (K 34-18)*. Savezni geološki zavod. Beograd.

Wu, Q., & Xu, H. (2014). Three-dimensional geological modeling and its application in digital mine. *Science China Earth Sciences*, 57(3), 491–502. https://doi.org/10.1007/s11430-013-4671-9

Yan-lin, S., Ai-ling, Z., You-bin, H., & Ke-yan, X. (2011). 3D Geological Modeling and Its Application under Complex Geological Conditions. Procedia Engineering, 12, 41–46. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.05.008

Zhang, S. E., Lawley, C. J. M., Bourdeau, J. E., Parsa, M., Cumani, R., & Thompson, A. (2025). Mineral prospectivity modeling of graphite deposits and occurrences in Canada. *Natural Resources Research*, 34, 1243–1270. https://doi.org/10.1007/s11053-024-10451-0

Одрицање од одговорности / Напомена издавача: Изјаве, мишљења и подаци садржани у свим публикацијама су искључиво мишљење појединачних аутора/аутора и сарадника и не представљају ставове СГД и/или уредника. СГД и/или уредници одричу се одговорности за било какве повреде личности или имовине које могу настати као резултат било којих идеја, метода, упутстава или производа на које се упућује у садржају.

Zapisnici SGD, 68-1, 65-71 (2026)
ORIGINAL PAPER / ОРИГИНЛАНИ РАД
doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.18879425

The importance of an integrated approach to the decommissioning of hydrogeological objects on the example of the "Homolje Neresnica" groundwater source near Kučevo

Vladimir ŽIVANOVIĆ[1*], Nebojša ATANACKOVIĆ[1], Sava MAGAZINOVIĆ[1], Saša STOJADINOVIĆ[1] & Sunčica GARDIJAN[1]

[1]University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, Djusina 7, 11000 Belgrade, Serbia.
*Corresponding Author e-mail: sava.magazinovic@rgf.bg.ac.rs

Abstract: Proper decommissioning of abandoned or damaged wells and boreholes is of particular importance for preventing groundwater contamination, loss of pressure in confined aquifers, hydraulic connection between different aquifers, and changes in groundwater quality. This paper presents the decommissioning of the exploratory hydrogeological borehole K-1 within the "Homolje Neresnica" groundwater source. The source is used for bottling natural mineral water and taps a karst aquifer in Lower Cretaceous limestones. The aim of the study was to adequately decommission the damaged borehole, protect the captured aquifer, and ensure undisturbed exploitation from wells KB-1 and KB-2. Methodologically, a phased approach was applied, comprising: assessment of the borehole condition (underwater camera inspection, CBL logging, air-lift cleaning), sealing of the intake section with quartz gravel and a bentonite plug followed by cementation, perforation of casing sections with insufficient cement bonding and injection of new cement into the casing and annulus, as well as final cutting, removal of the steel casing, and complete cement backfilling up to the ground surface. The implemented activities resulted in hermetic sealing of the entire borehole and a complete cessation of artesian flow, thereby preserving groundwater quality and the existing exploitation regime. The research highlights the importance of a phased, professionally supervised approach to decommissioning old or damaged structures under complex hydrogeological conditions.

Keywords: borehole liquidation; well liquidation; Neresnica Homolje; bottling; carbonated water.

Article history: <Manuscript received 12 January 2026. - Accepted 4 March 2026.>

Значај интегралног приступа ликвидацији хидрогеолошких објеката на примеру изворишта „Хомоље Нересница“ код Кучева

Владимир ЖИВАНОВИЋ[1*], Небојша АТАНАЦКОВИЋ[1], Сава МАГАЗИНОВИЋ[1], Саша СТОЈАДИНОВИЋ[1] & Сунчица ГАРДИЈАН[1]

[1]Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, 11000 Београд, Србија.
*Кореспондирајући аутор: e-mail: sava.magazinovic@rgf.bg.ac.rs

Апстракт: Правилна ликвидација напуштених или оштећених бунара и истражних бушотина од посебног је значаја за спречавање контаминације подземних вода, губитка притиска у изданима под притиском, хидрауличког повезивања различитих водоносних хоризоната и неповољних промена у квалитету подземних вода. У овом раду приказана је ликвидација истражне хидрогеолошке бушотине К-1 у оквиру изворишта „Хомоље Нересница“. Изворište се користи за флаширање природне минералне воде и каптира карстну издан у доњокредним кречњацима. Циљ истраживања био је да се на адекватан начин изврши ликвидација оштећене бушотине, заштити каптирана издан и обезбеди неугрожена експлоатација из бунара КБ-1 и КБ-2. Методолошки, примењен је фазни приступ који је обухватио: утврђивање стања бушотине (снимање подводном камером, CBL каротаж, чишћење air-лифтом), запуну водопријемног дела кварцним гранулатом и бентонитским тампоном са накнадном цементацијом, перфорацију делова обложне колоне са недовољном цементацијом и утискивање новог цемента између колоне и међупростора, као и завршно сечење, вађење челичне колоне и потпуну цементацију до површине терена. Изведене активности су резултирале херметичким запуњавањем комплетне бушотине и потпуним заустављањем самоизлива што је омогућило очување квалитета и режима експлоатације подземних вода. Изведена истраживања показују значај фазног и стручно вођеног приступа ликвидацији старих или оштећених објеката у сложеним хидрогеолошким условима.

Кључне речи: ликвидација бушотина; ликвидација бунара; Нересница Хомоље; флаширање; угљокиселе воде.

Хронологија: <Рад примљен 12. јануара 2026. - Прихваћен 4. марта 2026.>

1. Увод

Ликвидацији напуштених и оштећених бунара и истражних бушотина треба приступити са посебном пажњом како би се спречила контаминација подземних вода, спречили физички хазарди као што је урушавање конструкције, одржао пијезометарски притисак у случају издани под притиском, сачувале резерве подземних вода и спречило мешање вода из различитих водоносних хоризоната. У већини развијених земаља прописана је обавеза ликвидације или конзервације таквих хидрогеолошких објеката (Hodder, 2017) уз давање техничких смерница на који начин је извести.

Специфичну врсту изазова представља ликвидација у оквиру изворишта која се користе за јавно водоснабдевање или флаширање, какав је био случај са изворištем „Хомоље Нересница". У циљу заштите квалитета подземних вода који је од пресудног значаја, код оваквих изворишта је неопходно приступити са посебним мерама опреза. Додатно, радови на ликвидацији треба у што мањој мери да наруше постојећу експлоатацију подземних вода, како не би дошло до значајнијих прекида у водоснабдевању.

Поступак ликвидације зависи од низа фактора, као што су хидрогеолошке карактеристике терена, нпр. хидродинамички услови у каптираној издани (са слободним нивоом или под притиском), затим начина израде бунара или бушотине и тренутног стања у којем се налази, опреме која је уграђена у њима, па до низа других специфичних чиниоца које треба узети у обзир, а који се по правилу разликују између локација. Сходно томе, не постоји универзално упутство, већ свакој ликвидацији треба приступити на одговарајући начин како би се очувале квалитативне и квантитативне карактеристике подземних вода.

У овом раду је приказан поступак ликвидације истражне хидрогеолошке бушотине К-1 која се налази у изворište „Хомоље Нересница" код Кучева, а која је изведена давне 1970. године. Бушотина је имала самоизлив дужи временски период, при чему је у последње време било приметно истицање подземних вода и између зида бушотине и челичне обложне колоне. Сходно томе, представљала је ризик по предметно изворište које се користи за флаширање природне минералне воде.

2. Опште карактеристике изворишта „Хомоље Нересница"

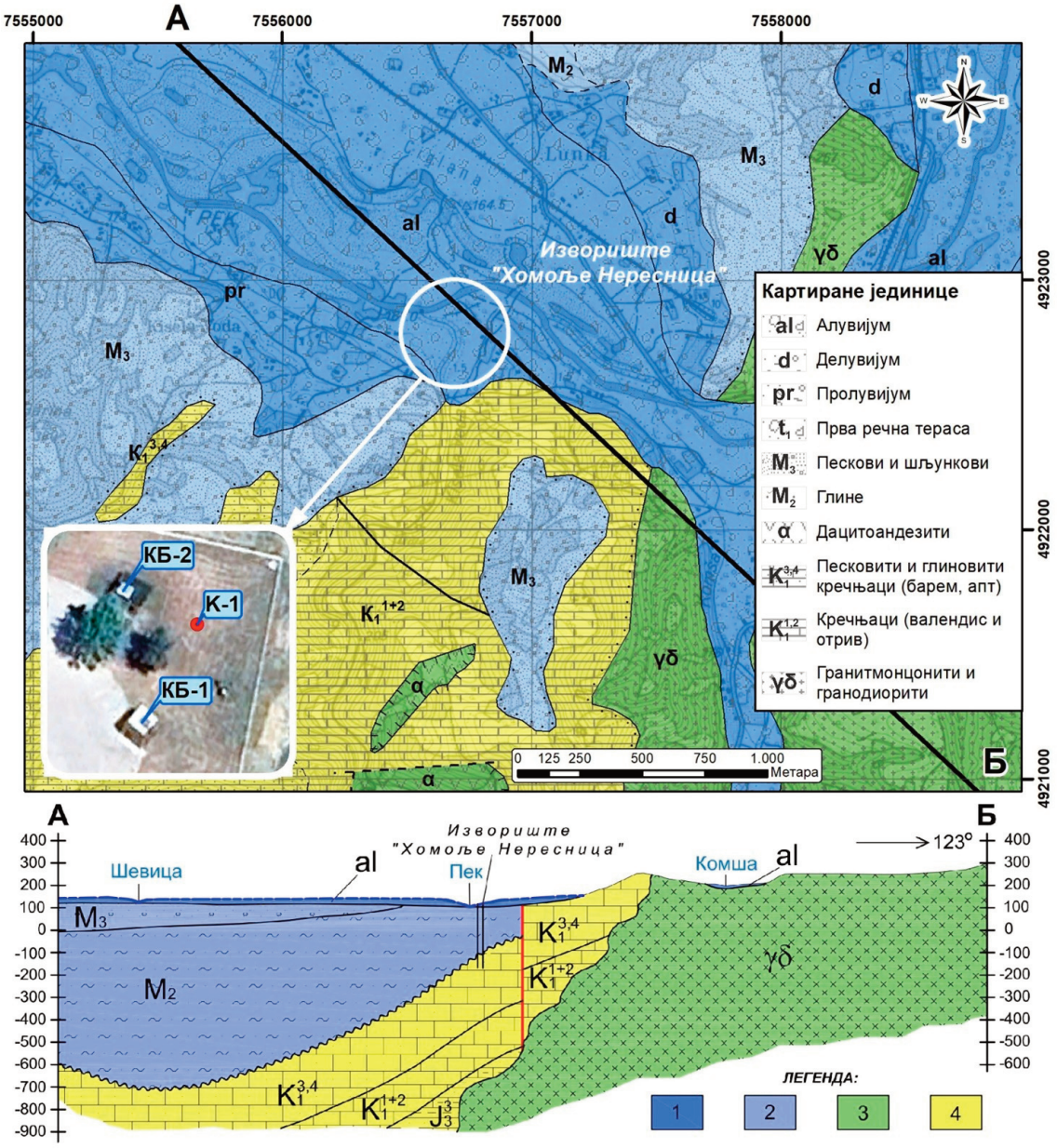
Изворište „Хомоље Нересница" налази се у источној Србији, у атару села Нересница у близини Кучева, од кога је удаљено 6 km у правцу југоистока. Терен на којем се налази изворište у орографском смислу припада Јужним Карпатима. Изворište је у прошлости било познато под називом „Кисела вода", међутим променом корисника предметног ресурса током 2021. године, промењен је и назив у „Хомоље Нересница".

Геолошка грађа ширег подручја изворишта је веома комплексна, с обзиром да у њој учествују стене почев од најстаријих, протерозојских шкриљаца и гнајсеви, преко палеозојских метаморфита и магматских стена, затим мезозојских кластита и карбоната, до најмлађих, квартарних творевина, представљених терасним, пролувијалним, делувијалним и алувијалним седиментима (Kalenić & Hadži Vuković, 1978). Додатну комплексност геолошкој грађи даје и нереснички гранитоид, који се налази у непосредној близини изворишта, као и веома сложена тектоника овог дела Јужних Карпата (Kalenić et al., 1980). Мезозојски кречњаци испуњавају геосинклинални простор правца пружања С-Ј, настао у зони сучељавања палеозојских и протерозојских метаморфита и магматита (Krunić et al., 2012).

Изворište „Хомоље Нересница" се састоји од два бунара, КБ-1 и КБ-2, који су изведени почетком двехиљадитих година. Бунари КБ-1 и КБ-2 каптирају кречњаке доњокредне старости у интервалу дубине 181-287 m. У оквиру њих формирана је карстна издан под притиском са артеским нивоом (Слика 1). Кречњаци су веома карстификовани, са идентификованим кавернама дециметарских до метарских димензија у више дубинских интервала.

Резерве подземних вода предметног изворишта су оцењене на 29,4 l/s, уз могућност повећања у будућности с обзиром да се ради о водоносној средини са изузетним филтрационим карактеристикама (Živanović & Magazinović, 2025). Каптиране воде су минерализоване, угљокиселе са садржајем CO2 од 300-400 mg/l, благо повишене температуре (до 20 °C), хидрокарбонатне класе, калцијумске групе:

$$M_{1,3}CO^{2}_{0,33}\frac{HCO^{3}_{96}}{Ca_{75}Na_{15}Mg_{10}}T_{18,4}$$



Слика 1. Хидрогеолошка карта и хидрогеолошки профил ширег подручја изворишта „Хомоље Нересница". Легенда: 1. Збијени тип издани у квартарним седиментима; 2. хидрогеолошки комплекс у неогеним седиментима; 3. пукотински тип издани; 4. карстни тип издани (подлога Kalenić & Hadži-Vuković, 1978)

Порекло угљендиоксида у подземним водама се везује за Нереснички гранитоид, односно за метаморфне процесе који су се десили приликом његовог утискивања. Угљендиоксид са већих дубина, највероватније раседним структурама, доспева до карстне издани у мезозојским кречњацима, што доводи и до повећања минерализације и садржаја хидрокарбоната у предметним подземним водама (Papić et al., 1994).

На основу изотопских анализа одређена је старост подземних вода од око 20.000 година. Воде порекло од падавина са нижих надморских висина (Milivojević, 1989).

На локацији самог изворишта, предметни ресурс подземних вода откривен је још давне 1970. године израдом истражне хидрогеолошке бушотине К-1. Изведена је до дубине од 252 m на око 280 m од некадашње природне појаве истицања минералних вода у кориту потока Кисела вода. Бушотина се налазила

на 20 m од бунара КБ-1, односно 13 m од бунара КБ-2. Бушење истражне бушотине је изведено пречником Ø 146 mm до дубине од 186 m, након чега је уграђена и цементирана челична обложна колона спољњег пречника Ø 113 mm до површине терена. Даље бушење је настављено пречником Ø 86 mm до крајње дубине бушотине. Водопријемни део је остао незацевљен (open hole). Израдом бушотине добијен је самоизлив у количини од 5 l/s. Непосредно након израде бушотине, у лето 1970. године, измерен је хидростатички притисак од око 0,3 bara (Milovanović, 2000).

Услед старости и дотрајалости бушотине К-1, током времена је дошло до истицања подземних вода из међупростора између зида бушотине и челичне обложне колоне.

3. Методологија изведених радова на ликвидацији бушотине К-1

Услед појаве истицања подземних вода у међупростору око челичне обложне колоне јавила се потреба за ликвидацијом бушотине К-1. Сходно томе, представљала је ризик по изворište, примарно по квалитет каптираних подземних вода и опадање хидростатичког притиска у каптираној издани, с обзиром да се налазила на веома малом растојању од бунара КБ-1 и КБ-2.

Посебан изазов представљала је чињеница да на бушотини постоји самоизлив. Додатно, није било познато у каквом стању се бушотина тренутно налази, с обзиром да је изведена пре више од 50 година.

Ликвидација истражне хидрогеолошке бушотине К-1 изведена је крајем 2023. године у неколико фаза (Andrijašević, 2024):

1. Припремни радови (провера стања бушотине) - снимање бушотине подводном камером, провера интегритета цементне испуне у међупростору око обложне колоне применом каротажне методе Cement Bond Log (CBL), чишћење бушотине методом air-лифта и постављање привремене „главе“ са манометром;
2. Ликвидација дела бушотине 201-112 m - уградња кварцног гранулата и глиненог тампона и цементација у обложној колони;
3. Ликвидација дела бушотине 112-30 m – перфорација обложне колоне и цементација обложне колоне и међупростора;
4. Ликвидација дела бушотине 30-0 m – разбушивање око обложне колоне, сечење и вађење обложне колоне и цементација бушотине.

Фазни приступ је омогућио да се бушотина ликвидира успешно уз што мање прекиде у експлоатацији подземних вода из изворишта.

Сви радови на ликвидацији бушотине су изведени са одговарајућом гарнитуром за бушење.

Материјали и опрема који су коришћени су претходно дезинфиковани распршивањем под притиском, нарочито они употребљавани за ликвидацију водопријемног дела бушотине. За те потребе коришћен је 3 % раствор дезинфицијенса на бази водоник пероксида (Oxypak S).

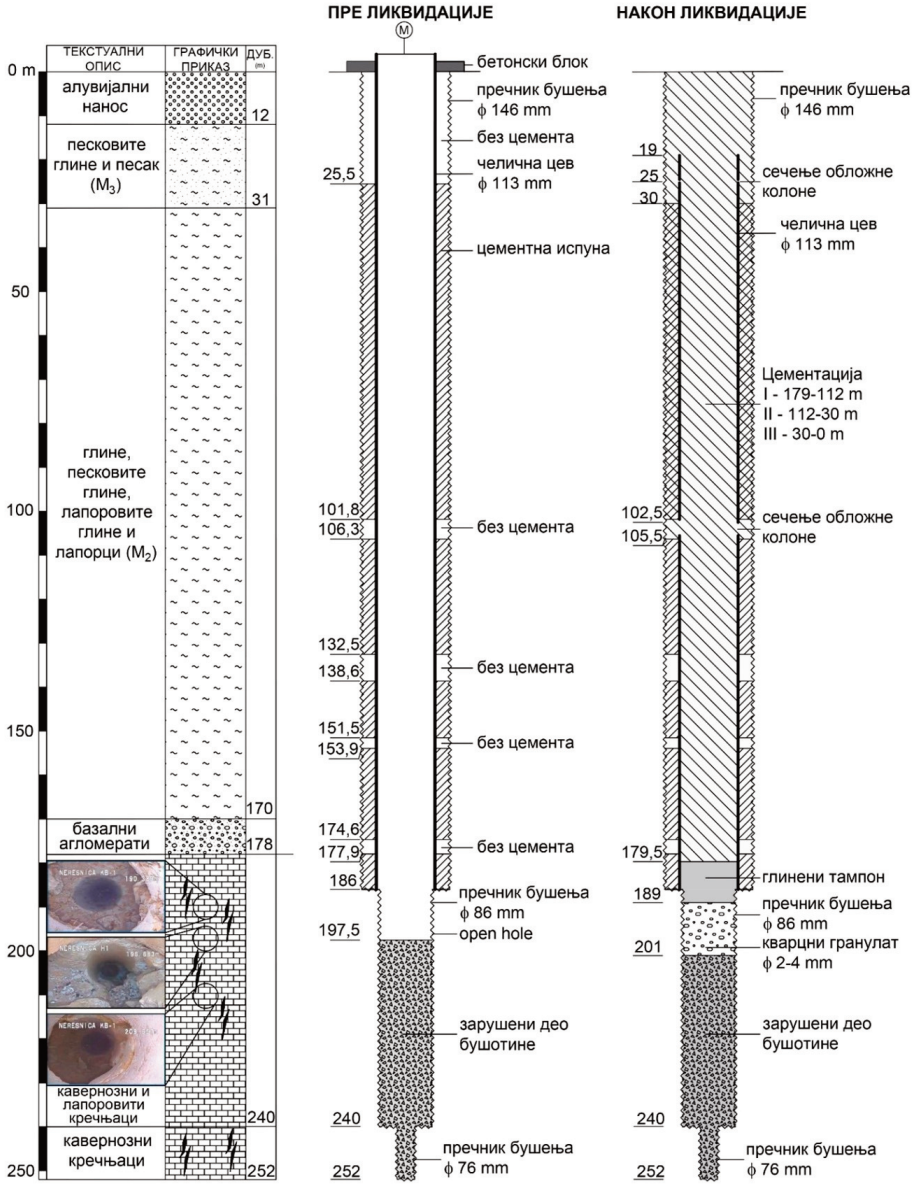
Из изворишта није вршена експлоатација током ликвидације водопријемног дела бушотине. Након тога, започето је захватање подземних вода уз сталну контролу квалитета подземних вода у интерној лабораторији пуниоице.

4. Резултати и дискусија

На основу припремних радова (прва фаза радова) детектовано је да је бушотина проходна до дубине од 201 m. Претпоставка је да је у овом делу бушотина блокирана материјалом из каверне, која се налази непосредно изнад. На основу снимка камером утврђено је да нема оштећења челичне обложне колоне и да су варови на цевима конзистентни. Применом CBL каротажне методе констатовано је да је око 41 m' међупростора између зида бушотине и обложне колоне без цемента и то у следећим интервалима дубине: 0-25,5 m; 101,8-106,3 m; 132,5-138,6 m; 151,5-153,9 m и 174,6-177,9 m. Преостали део цементираног међупростора одликује се добрим интегритетом цементне испуне. С обзиром да је у бушотини констатовано присуство материјала из каверне, као и других нечистоћа, извршено је чишћење бушотине ком-

пресирањем. Бушотину није било могуће прочистити испод дубине од 201 m. На привремено постављеној „глави“ измерен је хидростатички притисак од око 0,05 bara, односно око 1 m изнад површине терена.

Циљ припремних радова је био да се утврди стање у којем се бушотина тренутно налази, а на основу тога да се у детаљу испланирају сви радови неопходни за њену успешну ликвидацију. Радови на самој ликвидацији (друга фаза радова) започети су уградњом кварцног гранулата пречника зрна Ø 2-4 mm у интервалу дубине 201-189 m (Слика 2), односно у водопријемном (open hole) делу бушотине. Уградња гранулата је вршена кроз бушаће цеви спуштене испод пете обложне колоне. У преостали простор водо-



Слика 2. Литолошки опис и конструкција бушотине К-1 пре и после ликвидација

пријемног дела уграђен је тампон од бентониске глине. Глинени тампон уграђен је у интервалу бушотине 189-179,5 m, односно 3 m у водопријемном делу бушотине и 6,5 m у челичној обложној колони. Након уградње кварцног гранулата и глиненог тампона заустављен је самоизлив на бушотини.

Друга фаза ликвидације бушотине К-1 завршена је цементацијом у обложној колони у интервалу дубине 179,5-112 m. Цементација је изведена одоздо навише, преко бушаћих цеви спуштених у бушо-

По завршетку цементације, на бушотини није било радова неколико дана, како би се цементна маса везала (стврднула).

У наредној, трећој фази, најпре је извршена перфорација челичне обложне колоне у интервалу дубине 102,5-105,5 m. За та потребе коришћен је секач пречника Ø 102 mm, који под притиском воде отвара ножеве све до максималног пречника сечења од Ø 114 mm. Перфорација колоне је извршена целим обимом на 4 дубине: 105,5m, 104,5m, 103,5m и 102,5m, односно у делу бушотине где је CBL-ом детектовано да нема цементне испуне у међупростору. По успешно урађеној перфорацији челичне колоне извршена је цементација обложне колоне и међупростора у интервалу дубине 112-30 m. Цементно млеко густине $\gamma = 1{,}8\ kg/dm^3$ упумпавано је у бушотину под притиском у зони перфорације колоне. Цементно млеко је потискивано водом и након постизања притиска од 3 bara бушотина је херметизована. На устима бушотине постављен је манометар у циљу праћења притиска у бушотини. Са почетних 3 bara, притисак се постепено смањио на 1,5 bara, где се зауставио и није даље опадао. Након цементације, бушотина је била у фази мировања 3 дана, како би се омогућило адекватно везивање цемента.

Последња, четврта фаза ликвидације обухватила је вађење дела челичне обложе колоне пречника Ø 113 mm и цементацију преосталог дела бушотине. На почетку ове фазе извршено је сечење челичне колоне на дубини од 25 m. Затим је покушано вађење колоне које је било неуспешно. Услед тога се приступило разбушивању око колоне бушаћом круном пречника Ø 168 mm. На овај начин је бушено до дубине од око 30 m, односно до врха цементне испуне из претходне фазе радова. Челична колона је покренута помоћу сајле на бушаћој гарнитури, при чему је извађено укупно 19 m' колоне. На овај дубини је приликом потезања дошло до пуцања челичне колоне. У склопу завршетка радова у овој фази извршена је цементација преосталог дела бушотине у интервалу дубине од 30 m па до површине терена. Предметном цементацијом је фактички завршена ликвидација бушотине К-1.

Током реализације свих радова на ликвидацији бушотине К-1, квалитет подземних вода из бунара КБ-1 и КБ-2 је био стабилан, без појаве замућења или неке од загађујућих материја. Сходно томе, може се констатовати да је реализована успешно, уз прекид у експлоатацији подземних из изворишта у трајању од само неколико дана.

5. Закључак

Подземне воде из изворишта „Хомоље Нересница“ код Кучева се користе за флаширање природне минералне воде. Изворište се састоји од два бунара који каптирају карстну издан под притиском, са артеским нивоом у оквиру доњокредних кречњака на дубинама испод 180 m. Предметни кречњаци су интензивно карстификовани, услед чега представљају водоносну средину са изузетним хидрогеолошким потенцијалом. Појединачни капацитети бунара се крећу изнад 15 l/s.

У изворишту се налазила и истражна хидрогеолошка бушотина К-1, која је изведене пре више од 50 година. На бушотини је било приметно истицање подземних вода око „уста“ бушотине, односно између зида бушотине и челичне обложне колоне. Као таква, представљала је опасност по изворište, на првом месту по квалитет каптираних подземних вода. Услед тога, током 2023. године, успешно је ликвидирана. Посебна пажња посвећена је припремним радовима који су имали за циљ да утврде стање у којем се налази бушотина К-1, што је било од круцијалног значаја за даље планирање ликвидације.

Ликвидација бушотине К-1 указала је на значај интегралног приступа у истраживачком процесу при специ- фичним условима који су присутни у предметном изворишту, као што су старост бушотине, присуство самоизлива на бушотини, нешто агресивније воде (угљокиселе), близина експлоатационих објеката (бунара), као и готово свакодневне потребе за експлоатацијом вода из изворишта.

Додатно, пример из изворишта „Хомоље Нересница“ указао је да је присуство инжињера хидрогеологије кроз све фазе ликвидације, почев од припремних радова, преко планирања/пројектовања, па до самог извођења, од кључног значаја за успешну реализацију ликвидације, као и ангажовање бушачке компаније са дугогодишњим искуством у изради бунара у фази извођења радова.

Финансирање
Ово истраживање је подржано од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије по основу уговора 451-03-34/2026-03/ 200126 и 451-03-33/2026-03/ 200126.

Сукоб интереса
Аутори изјављују да немају било какав финансијски, професионални или лични сукоб интереса који би могао утицати на објективност резултата и тумачење података представљених у овом раду. Ниједан од аутора није у позицији која би могла изазвати сумњу у непристрасност истраживања, нити је било директног или индиректног комерцијалног, институционалног или личног утицаја на израду рукописа. Уколико дође до промене околности, аутори ће благовремено обавестити уредништво.

Литература - References

Andrijašević, J. (2024). *Izveštaj o stručnom hidrogeološkom nadzoru nad izvođenjem istraživanja za potrebe likvidacije bušotine K-1 u izvorištu „Kisela voda" u Neresnici kod Kučeva* (izveštaj u rukopisu). Aquaterra Consulting doo, Beograd.

Hodder, E.A. (2017). Well Decommission, Policy, Processes, and the Urban Environment. J*ournal of Contemporary Water Research & Education*, 159 (1), 117-126. https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2016.03233.x

Kalenić, M., Hadži-Vuković, M. (1978). *Osnovna geološka karta 1: 100 000, list Kučevo (L 33-128)*. Savezni geološki zavod, Beograd.

Kalenić, M., Hadži-Vuković, M., Dolić, D., Lončarević, Č., Rakić, M. (1980). *Tumač za Osnovnu geološku kartu 1: 100 000, list Kučevo (L 33-128)*. Savezni geološki zavod, Beograd.

Krunić, O., Parlić, S., Jovanović, M. (2012). Geneza ugljokiselih voda Kučevskog neogenog basena. *Zbornik radova XIV srpskog simpzijuma o hidrogeologiji*, Zlatibor, 245-251.

Milivojević, M., (1989). *Ocena geotermalnih resursa teritorije SR Srbije van teritorija SAP*. Doktorska disertacija u rukopisu. Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, pp. 1-478.

Milovanović, B. (2000). *Elaborat o rezervama mineralnih voda u istražnom prostoru Kučevo* (elaborat u rukopisu). Geozavod, Beograd.

Papić, P., Dragišić, V. i Miladinović B. (1994). Pojave ugljokiselih voda u Karpato-balkanidima istočne Srbije i mogućnsot njihovog flaširanja. *Zbornik radova međunarodne konferencije „Kvalitet voda"*, Čačak, 143-147.

Živanović, V. i Magazinović, S. (2025). *Šesti Elaborat o rezervama prirodnih mineralnih voda izvorišta „Homolje Neresnica" u opštini Kučevo (bunari KB-1 i KB-2)* (elaborat u rukopisu). Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.

Одрицање од одговорности / Напомена издавача: Изјаве, мишљења и подаци садржани у свим публикацијама су искључиво мишљење појединачних аутора/аутора и сарадника и не представљају ставове СГД и/или уредника. СГД и/или уредници одричу се одговорности за било какве повреде личности или имовине које могу настати као резултат било којих идеја, метода, упутстава или производа на које се упућује у садржају.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

061:55(497.11)

ЗАПИСНИЦИ Српског геолошког друштва за ... годину /
главни и одговорни уредник Урош Ђурић. - 1891- Београд : Српско геолошко друштво, 1892- (Београд : Ривер Принт). - 30 cm

Полугодишње. - Текст на срп. и енгл. језику. -
Друго издање на другом медијуму:
Записници Српског геолошког друштва (Online) = ISSN 3042-3546
ISSN 0372-9966 = Записници Српског геолошког друштва
COBISS.SR-ID 70169095

Записници Српског геолошког друштва (Записници СГД) објављују научне чланке (оргиналне и прегледне радове, кратка и прелимимнарна саопштења, дискусију и коментаре) као и стручне чланке (стручне радове, информативне прилоге, приказе, стручне критике или полемике) из свих области геонаука.

Саопштења аутора ван Србије су добродошли, под условом да садрже материјале релевантне за геологију Србије, региона или су од општег интереса за читалачку публику.

Записници СГД су у режиму отвореног приступа (open access) и **не наплаћују** се трошкови објављивања. Саопштења се могу предати на српском (препоручено) или енглеском језику.

Часопис прихвата слање радова искључиво преко OJS / PKP платформе

https://zapisnici.sgd.rs