



**Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду**

**[ДР РГФ]**

|||||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0009437>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

СРПСКО ГЕОЛОШКО ДРУШТВО

*SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE*

---

ISSN 0372-9966

# ЗАПИСНИЦИ

СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА  
(ЗА 2022. ГОДИНУ)

*COMPTES RENDUS  
DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
(pour l' année 2022)*



БЕОГРАД – БЕОГРАД  
2023



Српско геолошко друштво  
Société Serbe de géologie  
Serbian Geological Society

---

ISSN 0372-9966

Записници  
Српског геолошког друштва  
за 2022. годину

Comptes rendus  
des scéances de la Société Serbe de géologie  
pour l' année 2022

Reports  
of the Serbian Geological Society  
for the year 2022

Београд - Belgrad – Belgrade  
2023

Цитирани назив и скраћеница часописа – *Abréviation de titre de la revue – Cited and abbreviated name of the journal*

## Zapisinici SGD

Главни уредник – *Rédacteur en chef – Editor in Chief*  
Prof. dr Vladimir Simić, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology  
(Председник Српског геолошког друштва – *Président de la Société Serbe de géologie – President of the Serbian Geological Society*)

Уређивачки одбор – *Comité de rédaction – Editorial Board*  
Nevenka Đerić (University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology),  
Oleg Mandić (Natural History Museum, Vienna, Austria), Slobodan Radusinović  
(Geological Survey of Montenegro, Montenegro), Danica Srećković Batoćanin  
(University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology), Ivana Vasiljević  
(University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology)

Рецензенти – *Révisseurs – Reviewers*  
Vesna Cvetkov, Tina Dašić, Meri Ganić, Rade Jelenković, Saša Milanović, Dejan  
Prelević, Dejan Radivojević, Ljupko Rundić, Vladimir Simić

Технички уредник – *Rédacteur technique – Technical preparation*  
Zoran Miladinović

Издавач – *Publier – Publisher*  
Српско геолошко друштво – *Société Serbe de géologie – 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](mailto:office@sgd.rs)

Тираж: 200 примерака – *Tirage: 200 exemplaires – Circulation: 200 copies*  
Штампа – *Imprimerie – Printing*  
River print, Mite Cenića 1, Belgrade, Serbia

Аутори су искључиво одговорни за своје радове - *Authors are exclusively responsible for their papers*

На основу категоризације научних часописа за 2022. годину Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије часопис „Записници Српског геолошког друштва“ је категорисан као врхунски часопис националног значаја (M51) у области Геонауке и астрономија.

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022. ГОДИНУ

COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les année 2022

REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022

Beograd, 2023

## САДРЖАЈ – TABLE DES MATIERES – TABLE OF CONTENT

### ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАДОВИ – TRAVAUX SCIENTIFIQUE – PAPERS:

#### PLENARNO PREDAVANJE 18 KONGRES GEOLOGA SRBIJE – PLENARY LECTURE 18 SERBIAN GEOLOGICAL CONGRESS:

- СТЕВАНОВИЋ З., *Подземне воде – кључни ресурс будућности и најбољи индикатор стања животне средине* ..... 1  
STEVANOVIĆ Z., *Groundwater – key resource for the future and best indicator of environmental status* ..... 17

#### PREDAVANJA PO POZIVU 18 KONGRES GEOLOGA SRBIJE – INVITED LECTURES 18 SERBIAN GEOLOGICAL CONGRESS:

- БАЈИЋ Д: *Решавање проблема одводњавања применом „FUZZY-MCDM“ метода при инжењерско-геолошким истраживањима*  
БАЈИЋ D: *Solving dewatering problems using FUZZY MCDM methods for engineering-geological surveys* ..... 29
- БРАДИЋ-МИЛИНОВИЋ К., SCHWARZHANS W: *Отолити in situ са територије Србије (стратиграфски, палеоеколошки и палеогеографски значај)*..... 42
- ВЕЛОЈИЋ М: *Геологија хидротермалног Cu-Au система Чукару Пеки*  
VELOJIĆ M: *The geology of hydrothermal Cu-Au system Čukaru Peki* ..... 55
- ЂУРИЋ Д: *Primena SAR interferometrije za određivanje koseizmičkih deformacija: trendovi i dostignuća* ..... 69  
ЂУРИЋ D: *SAR interferometry for coseismic displacement determination: trends and achievements* ..... 79
- МАРЈАНОВИЋ М: *Анализа одрона у стенским косинама: савремени приступи* ..... 84  
MARJANOVIĆ D: *Rockfalls analysis in rock slopes: state-of-the-art approaches* ..... 93

СТАНКОВИЋ Р: <i>Хармонизација података коришћењем повезаних отворених података</i> .....	98
STANKOVIĆ R: <i>Data harmonization using linked open data</i> .....	109

### **ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАДОВИ – TRAVAUX SCIENTIFIQUE – PAPERS:**

КОСТИЋ Б., ЕРАКОВИЋ К., ПРЕЛЕВИЋ Д., КОВАЧ С., ЖИВОТИЋ Д: <i>Компарација метода XRF и ICP-MS на узорцима угља и продуктима сагоревања</i> KOSTIĆ B., ERAKOVIĆ K. PRELEVIĆ D., KOVAČ S., ŽIVOTIĆ D: <i>Comparison of XRF and ICP-MS methods on coal samples and combustion products</i> .....	118
---	-----

### **ПРЕТХОДНА САОПШТЕЊА, СТРУЧНИ РАДОВИ – REPORTS:**

НИЦОВИЋ Е., ЦВЕТКОВИЋ В., ШАРИЋ К: <i>Да ли има трагова експлозивних ерупција у источном делу лецког вулканског комплекса?</i> .....	138
NIDŽOVIĆ E., CVETKOVIĆ V., ŠARIĆ K: <i>Are there traces of explosive eruptions in the eastern part of the lece volcanic complex?</i> .....	145
ВОЈНОВИЋ П: <i>Хидрогеолошке карактеристике подручја Церничког поља и Кључке ријеке</i> VOJNOVIĆ P: <i>Hydrogeological characteristics of the Ključka rijeka and Cerničko polje area</i> .....	151
ТИВАДАР Г: <i>125 година од формирања часописа „Записници српског геолошког друштва”</i> TIVADAR G: <i>125th Annivesary of the Journal "Zapisnici srpskog geološkog društva"</i> .....	159

### **ИНФОРМАЦИЈЕ, ПРИКАЗИ, КОМЕНТАРИ – NOTES:**

РАДИВОЈЕВИЋ Д: <i>Сећање на борбу ватре и воде – Хатон и Вернер</i> .....	169
---	-----

### **ПРИЛОЗИ – ANNEXES**

ЗАПИСНИК ГОДИШЊЕ СКУПШТИНЕ ДРУШТВА 29.03.2023. MINUTES OF THE SOCIETY’S ANNUAL ASSEMBLY 29.03.2023. ....	178
КОНКУРС ЗА МЛАДЕ ГЕОЛОГЕ .....	188

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА (ЗА 2022. ГОДИНУ)

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE*

*pour les année 2022*

*REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY*

*for the year 2022*

Beograd, 2023

**Зоран Стевановић<sup>1</sup>**

**Zoran Stevanović<sup>1</sup>**

## ПОДЗЕМНЕ ВОДЕ – КЉУЧНИ РЕСУРС БУДУЋНОСТИ И НАЈБОЉИ ИНДИКАТОР СТАЊА ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

## GROUNDWATER – KEY RESOURCE FOR THE FUTURE AND BEST INDICATOR OF ENVIRONMENTAL STATUS

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД - PAPER

**Апстракт.** Тема Светског дана вода 2022 „Подземне воде: Учинимо невидљиво видљивим“ није одабрана случајно. Подземне воде су основни водни ресурс на Земљи који снабдева реке, језера и бунаре, обезбеђује воду за пиће и храну за већину људи на нашој планети. Подземне воде обезбеђују резерве воде током суше и претећих ефеката климатских промена и дају најчистију природну воду за пиће. Одржавају екосистеме и минималне речне протицаје, спречавају слегање тла и интрузије слане воде. И поред свега, за многе су само „далеко од очију, далеко од срца“. За ефикасно управљање овим скривеним ресурсом, потребна је визија, а посебно разумевање везе са геолошком и природном средином, као и свим облицима површинских вода.

Србија поседује значајни подземни водни потенцијал који представља најдрагоценији природни ресурс. За водоснабдевање целокупног становништва Србије користи се тренутно око 23 м<sup>3</sup>/с, док су резерве само подземних вода процењене на око 70 м<sup>3</sup>/с, а уз активније коришћење вештачке инфилтрације, односно регулацију режима истицања, додатно би се могло захватити још око 40 м<sup>3</sup>/с. Чињеница је да подземни водни ресурси нису равномерно заступљени на целој територији Србије, али је могућа изградња већих регионалних система и трансфер квалитетне воде и у удаљенија подручја. Тако би се решили и проблеми вода лошег квалитета (пр. Банат) и недостајућих количина (пр. Шумадија, јужна Србија).

На територији Србије има преко две стотине испитаних извора минералних и термоминералних вода са укупним резервама које се процењују на око 1 м<sup>3</sup>/с, те смо у том погледу једна од најпреспективнијих земаља у региону. Одрживо коришћење и заштита ових вода отвара широке могућности развоја туризма у локалним заједницама.

Највећи потенцијал геотермалне енергије изражен преко вредности густине терестричног топлотног тока су у Панонском басену и централној и јужној Србији. Субгеотермални водни ресурси као вид хидрогеотермалне енергије ниске енталпије

---

<sup>1</sup> Ред. проф. Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду у пензији, Ђушина 7, 11000 Београд / Prof. Ret, University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, Djusina 7, 11000 Belgrade; e-mail: zstev\_2000@yahoo.co.uk



(температуре до 30°C) имају велику перспективу и налазе све већу примену у пракси. Процене указују да би се у појединим деловима Србије могле покрити потребе од око 10-20% топлотне енергије само из ових ресурса. То је значајно више од 4% као процењеног могућег учешћа геотермалне енергије у „зеленом“ енергетском билансу земље како је то учињено у „енергетској стратегији“ Републике Србије.

Геолошка средина и подземна вода су у уској интеракцији и један од главних фактора када се говори о животној средини и њеном одрживом развоју. Геолошка средина и тло су реципијенти који примају загађење било које врсте, док подземне воде осим што су предмет тих загађења, уједно су и трансфер медиј, који то загађење може пренети на веће удаљености и тиме ширити ореол контаминације. Стога је мониторинг квалитета подземних вода и појединих еколошких индикатора од кључне важности за сагледавање стања животне средине у урбаним, и областима интензивне индустријске и рударске активности.

**Кључне речи:** подземне воде, минералне воде, геотермална енергија, потенцијал, свет, Србија

**Abstract.** The theme of the World Water Day in 2022: „Groundwater: Making the Invisible Visible“ is not coincidentally chosen. Groundwater is essential water resource of the Earth. It supplies rivers, lakes and wells and in this way potable water for most people of our planet. Groundwater ensures to prevail consequences of drought, represents an important part of climate change adaptation process and is often a solution for people without access to safe water. It sustains ecosystems, maintains the baseflow of rivers and prevents land subsidence and seawater intrusion. Despite these impressive facts, invisible groundwater is out of sight and out of mind for most people. Therefore, for sustainable management of this hidden resource is necessary a vision, and especially understanding of its connection with geological setting and surface waters of all kinds.

Serbia has a considerable groundwater potential as one of most precious national natural resources. For potable water supply of Serbian citizens is actually utilized some 23 m<sup>3</sup>/s, while natural groundwater reserves are estimated on 70 m<sup>3</sup>/s. With more intense application of artificial recharge systems the reserves raise for additional 40 m<sup>3</sup>/s. The groundwater reserves are not equally distributed across entire country, but construction of many large regional systems may allow distribution of high-quality water to distant regions. As such, the problems of poor water quality (e.g. Banat) or shortage of water (e.g. Šumadija, south Serbia) might overcome.

At the territory of Serbia there are some 200 explored sources of mineral and thermal waters. Their reserves are estimated on 1 m<sup>3</sup>/s, which makes country one of most promising in the region from recreational and medical rehabilitation points of view. Sustainable utilization and further development of such sources open a new tourism prospective for the local communities.

The largest geothermal potential expressed as terrestrial heat flow is in the Pannonian basin and central and south Serbia. Sub-geothermal water resources as low enthalpy thermal resource (temperature up to 30°C) have a great prospect and are more intensively utilized in last decade. Some estimates say that in certain parts of Serbia they may cover some 10-20% of total thermal energy demands. This is considerably higher than 4% as estimated contribution of geothermal energy in national „green energy“ sector in the Energetic strategy of the Republic of Serbia.

Geological setting and groundwater are in close interaction and the main factors when discussing environmental issues and sustainable development. The rocks and soil are recipients of pollutants of every kind, while groundwater is not only acceptor of pollution, but also transfer media which may spread contamination to large distances. This is why monitoring of groundwater quality and some of ecological indicators is of key importance for assessment of environmental conditions in urban, but also in zones of intensive industrial and mining activities.

**Key words:** groundwater, mineral waters, geothermal energy, potential, World, Serbia

## УВОД

Подземне воде су природни ресурс од кључног значаја за човечанство, како у садашњости, тако и будућности. Оне обезбеђују пијаћу воду за око две милијарде људи, омогућују производњу половине светске хране (ZEKTSER & EVERT, 2004). Иако прорачун овог "невидљивог" ресурса у различитим врстама стена може бити компликован задатак, многи аутори се слажу да подземне воде представљају 98-99 % од маломинерализованих водних ресурса континента. Стога су и значајан резервоар квалитетних вода чијим рационалним коришћењем се човечанство може лакше борити и са климатским променама (IPCC, 2007).

Почетак 21. века обележава широка примена концепта "одрживог развоја" (*sustainable development*) који „подразумева принципе хармоничног односа појединца, нација и држава према природном окружењу и очување природних богатстава Земље и за будуће генерације“. И у Србији су принципи одрживог развоја уграђени у законске прописе и планске документе развоја са конкретним акцијама које имају за циљ прикључивање наше земље оној групи земаља који у приоритете своје политике и развоја друштва укључују очување животне средине (STEVANOVIĆ, 2011). Нажалост, однос према геолошкој средини и подземним водама није још увек задовољавајући. Већ дужи низ година се не отварају нова изворишта подземних вода, постојећа се често занемарују, квалитет захваћених вода је све слабији, реагује се углавном када већ дође до екстремних загађења тла и подземних вода, и недовољно се чини на превенцији и систематском предупредивању и смањењу геолошких хазарда. Да ли ће се у наредним годинама и деценијама и реализовати декларативно изнети, и/или ретко написани осмишљени планови којима се тежи побољшању стања и потреби заштите животне средине, па тиме и елиминацији или ублажавању свих фактора који на њу негативно утичу, показатељ године и деценије пред нама.

## ГЛОБАЛНИ ЗНАЧАЈ ПОДЗЕМНИХ ВОДА

Тема Светског дана вода 2022 који је промовисао UN Water: „Подземне воде: Учинимо невидљиво видљивим“ није наравно одабрана случајно. Подземне воде су основни водни ресурс на Земљи који обухвата око 30% свих слатководних водних ресурса планете (близу 70% је у ледницима а свега 1% су воде река и језера. Подземне воде снабдевају реке посебно током маловођа, језера и бунаре, а тиме обезбеђују и воду за пиће и производњу хране. Подземне воде обезбеђују резерве воде током суше и претећих ефеката климатских промена и дају најчистију природну воду за пиће. Одржавају екосистеме и минималне речне протицаје, спречавају геолошке хазарде - слегање тла и интрузије слане воде.

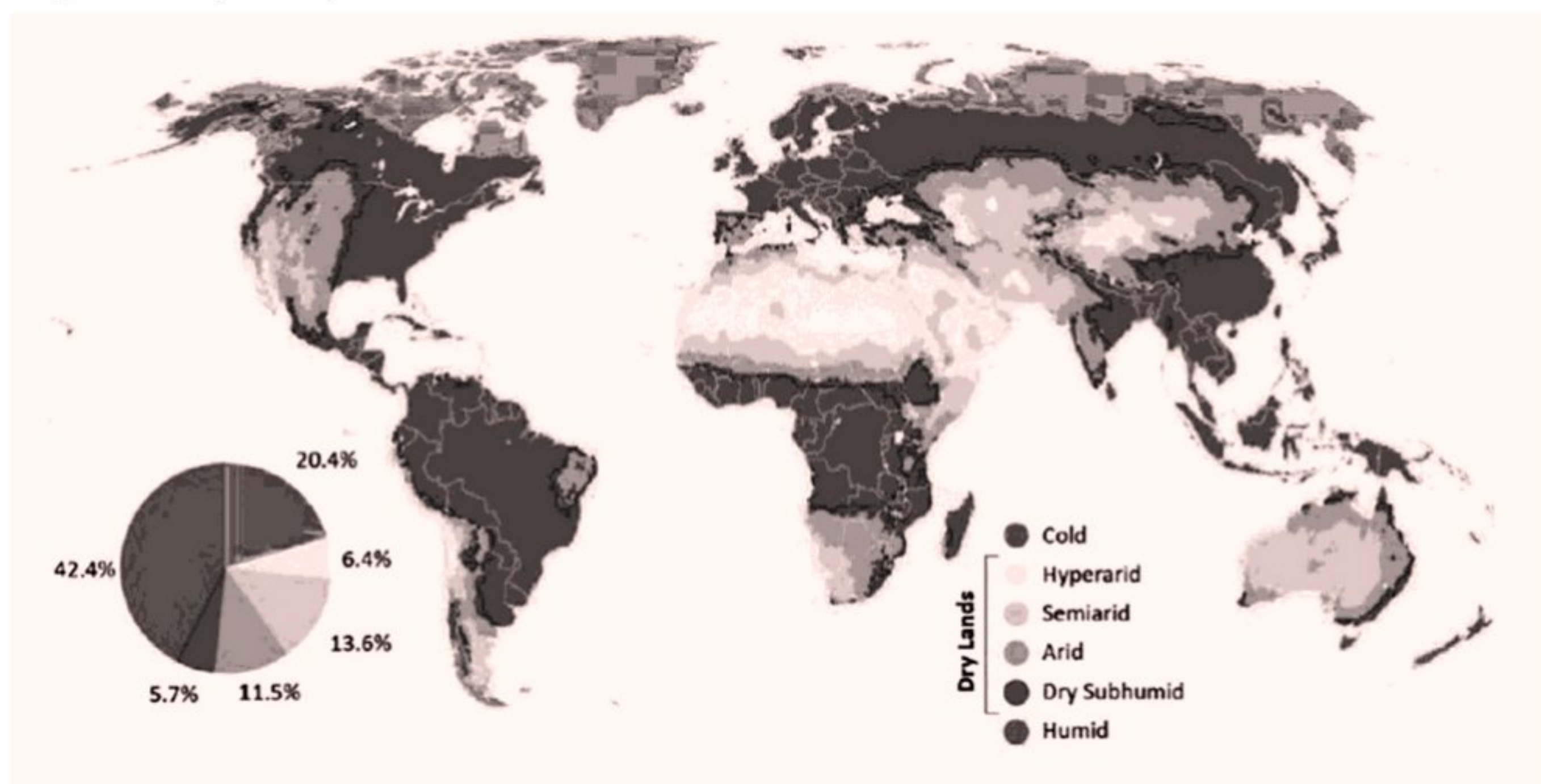
У табели 1 дат је приказ коришћења подземних водних ресурса за различите намене. Уочљиво је да се највећи део овог ресурса у свету троши на наводњавање, што је и логична последица ретких и недовољних ресурса површинске воде у аридним деловима света где је уједно концентрисан и велики део светског становништва (сл.1).

**Табела 1** Коришћење подземних вода за различите потребе у свету

**Table 1** Groundwater utilization at global scale (after IGRAC, FAO AQUASTAT, 2017)

Континент / Continent	Иригације Irrigation (%)	Домаћинства Domestic w.s. (%)	Индустрија Industry (%)	Укупно Total (km <sup>3</sup> /year)	%
Северна Америка North America	71.1	23.0	5.9	143	14.6
Централна Америка Central America	30.2	56.9	12.9	14	1.4
Јужна Америка South America	48.8	31.5	19.7	26	2.6
Европа Europe	36.4	45.0	18.6	72	7.3
Африка Africa	64.7	31.7	3.6	41	4.1
Азија Asia	75.6	16.3	8.1	680	69.3
Океанија Oceania	48.5	48.1	3.4	7	0.7
Свет World	70.1	21.2	8.7	982	100.0

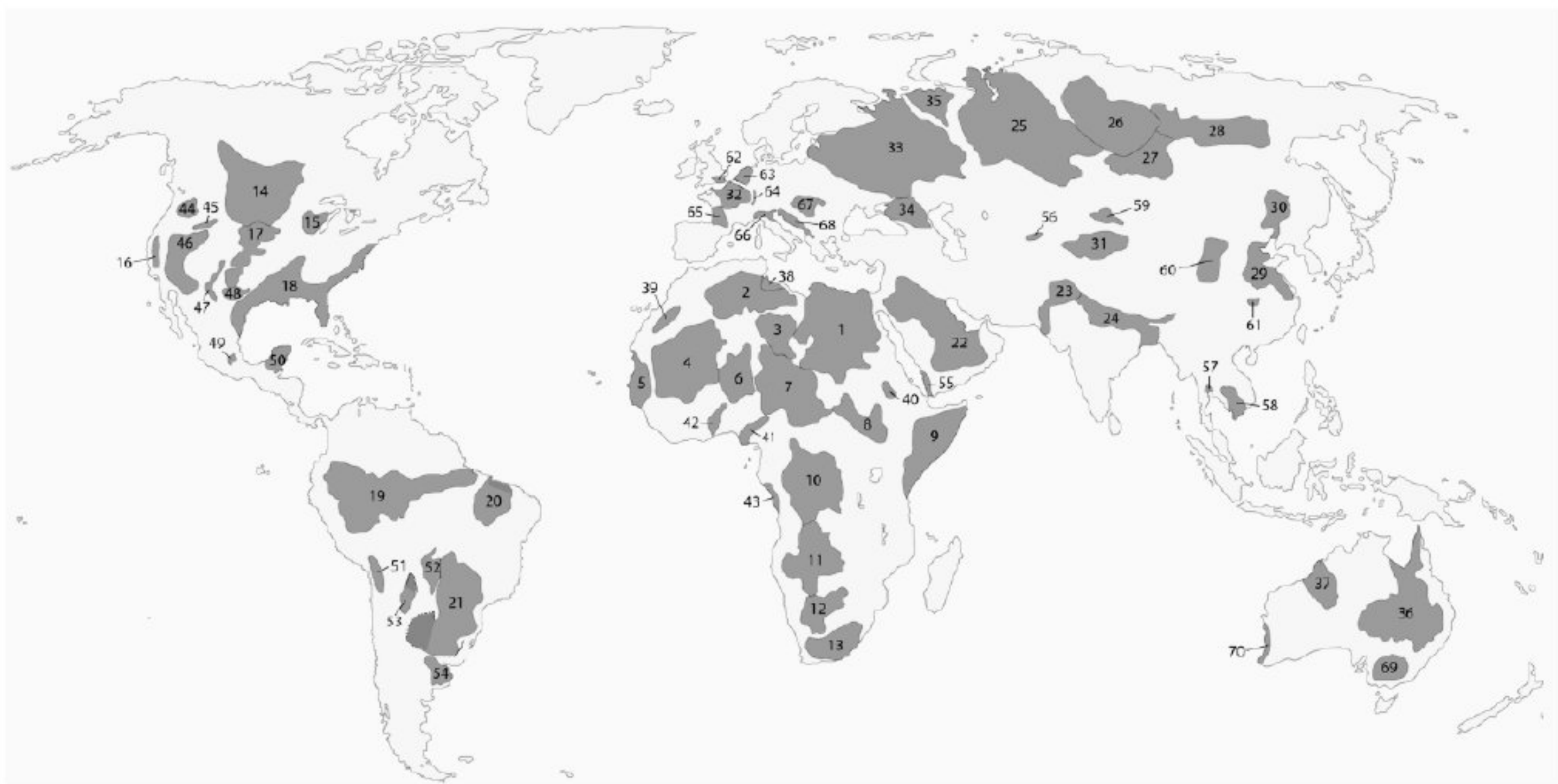
Као последица климатских услова најсиромашнија водом су подручја од 15<sup>0</sup> до 30<sup>0</sup> северне географске ширине. У погледу расположивости воде по становнику, на првом месту је Америка са 24.000 м<sup>3</sup>/год, за њом је Европа (9.000 м<sup>3</sup>/год), а због густине популације најсиромашнија је Азија са 3.400 м<sup>3</sup>/год (FAO AQUASTAT, 2017).



**Сл. 1** Распоред аридних области на планети (хумидне области – тамнији, аридне - светлији тонови)

**Fig. 1** Distribution of aridity on Earth (adapted from EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTER, 2020)

Познату чињеницу да се управо у аридним областима налазе и неке од највећих издани на свету потврђују и најновије анализе. VAN DER GUN (2022) је издвојио 70 тзв. мега издани, под којима подразумева оне које имају распрострањење веће од 50 000 km<sup>2</sup> и кумулативну дебљину продуктивне зоне већу од 100 m (сл. 2). Највећи број мега издани је у Африци, укупно 19, следе Азија са 17, Северна Америка са 12 и Европа са 11. Само у Северномедитеранском подручју, као и сахарском и субсахарском налазе се водом богате издани, све са међуграничним карактером – на сл. 2 бројевима су означене следеће: 1. Нубијски систем издани, 2. Западносахарски систем, 3. Мурзук – Дјадо систем и 4. Таудени – Танезруфт. На хипер аридном простору Саудијског полуострва такође је присутан значајан Арабијски систем издани (бр. 22).



Сл. 2 Распоред мега система подземних вода у свету

Fig. 2 Distribution of mega aquifer systems around the globe (after VAN DER GUN, 2022)

Да подземним водама треба дати приоритет када су у питању воде за пиће сведочи и општеприхваћени концепт у земљама Европске Уније (ЕУ). У табели 2 приказан је однос коришћења подземних и површинских вода у јавном водоснабдевању становништва појединих земаља ЕУ. Уочљиво је и да земље са релативно неповољним распрострањењем богатих издани имају значајно учешће подземних вода (нпр. Шведска, Финска, Чешка).

И поред свега, за многе су подземне воде само „далеко од очију, далеко од срца“. За ефикасно управљање овим скривеним ресурсом, потребна је визија, а посебно разумевање везе са геолошком и природном средином, као и свим облицима површинских вода.

**Табела 2** Однос коришћења површинске и подземне воде у јавном водоснабдевању у одабраним земљама ЕУ

**Table 2** Apportionment of public water supply between surface and ground waters (after EUROSTAT 1997, EEA 1999)

Држава / Country	Површинске воде Surface water (%)	Подземне воде Groundwater (%)
Austria	0.7	99.3
Denmark	0	100
Finland	44.4	55.6
France	43.6	56.4
Germany	28.0	72.0
Greece	50	50
Ireland	50	50
Italy	19.7	80.3
Luxemburg	31.0	69.0
Netherlands	31.8	68.2
Norway	87.0	13.0
Portugal	20.1	79.9
Spain	77.4	22.6
Sweden	51.0	49.0
UK	72.6	27.4
Czech Republic	56.0	44.0

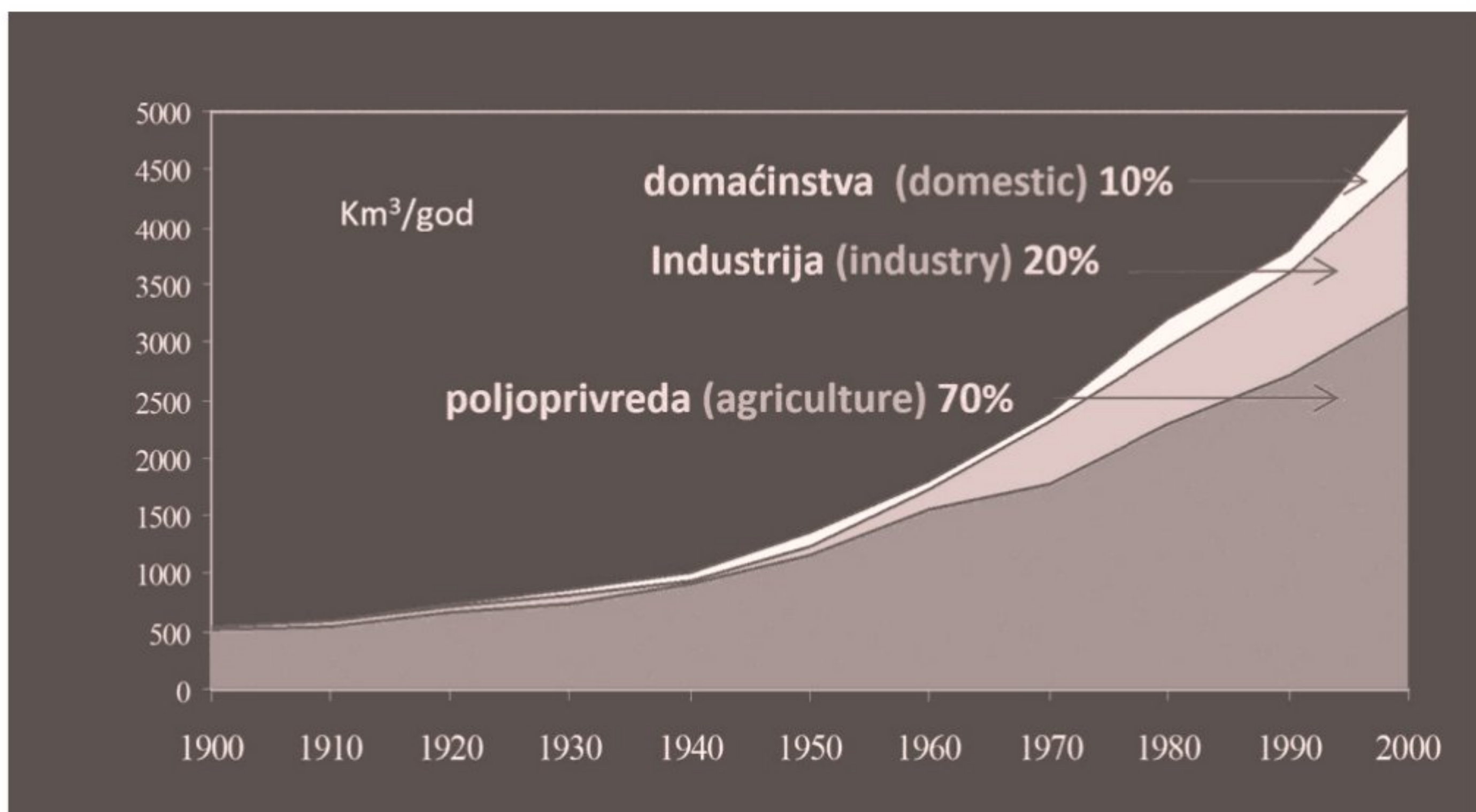
## ГЛОБАЛНИ ИЗАЗОВИ ПРИ КОРИШЋЕЊУ ПОДЗЕМНИХ ВОДА

Свет се данас суочава са две главне претње:

- Повећане потребе и неконтролисано коришћење
- Климатске промене

Ова два фактора дају негативну синергију и многе земље или региони већ имају недостатак воде и значајно исцрпљују своје резерве воде (делови САД, Кина, Индија, земље Арабијског полуострва, Северна Африка). Таква ситуација ће се скоро сигурно наставити и у будућности.

Пораст потреба током 20 века био је енорман, и није толико резултат раста становништва на планети, већ пре свега убрзане урбанизације, индустријализације и уопште повећања стандарда и услова живљења. Од 1900. до 1975. потребе у води порасле 7 пута, а само у периоду 1975. – 2000. још додатно два пута (сл. 3). Број градова са преко 5 милиона становника се од 1950. године када их је било 8, повећао у првој деценији 21. века на преко 50, од чега је половина у Азији.



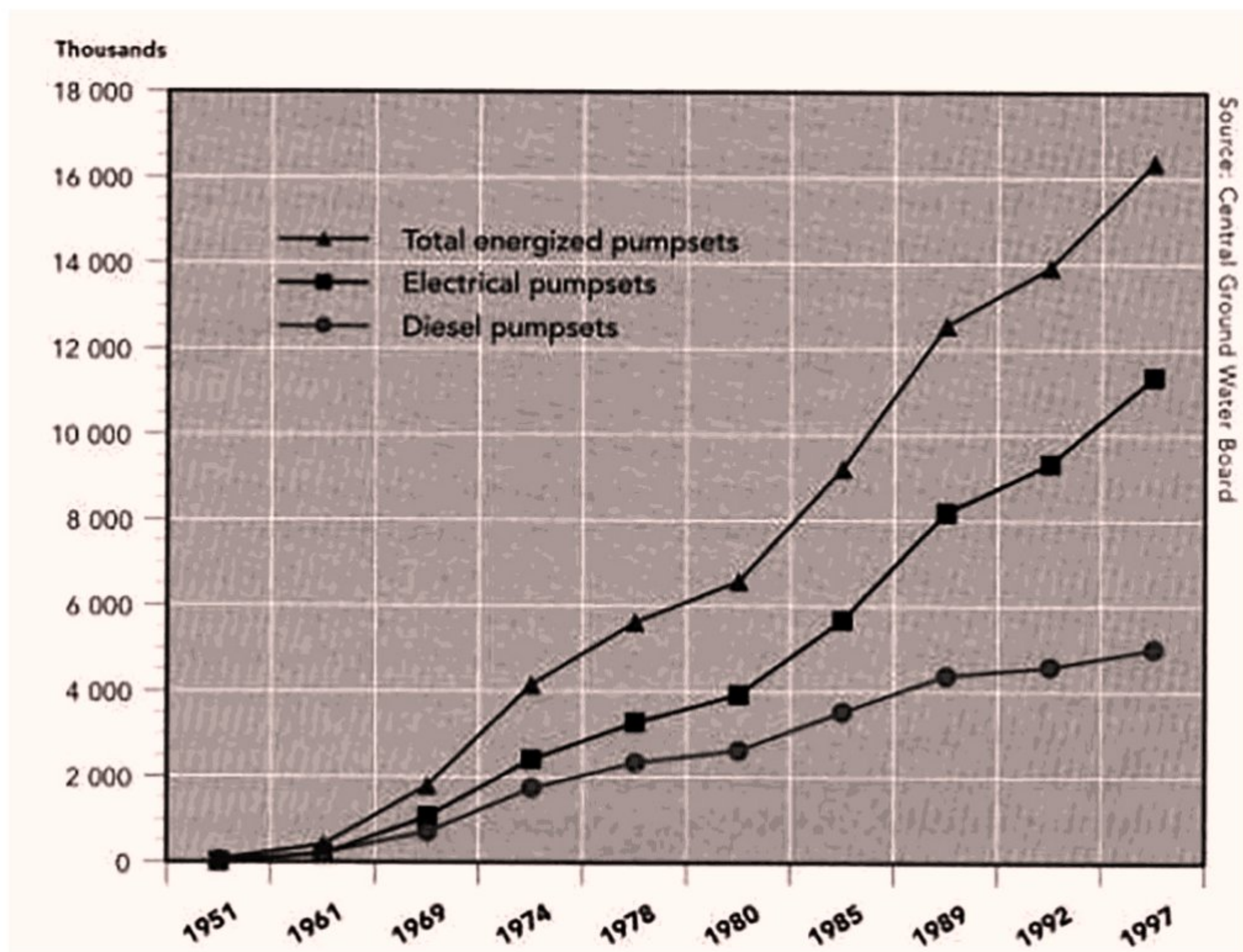
Сл. 3 Раст глобалних потреба у води током 20. века

Fig. 3 Raise of water demands in the world during 20 century (apated from various sources, STEVANOVIĆ, 2011)

Најчешће се сматра да је коришћење подземних вода интензивно и да може водити ка надексплоатацији када су протицај и квалитет подземне воде значајно промењени у односу на природно стање: јавља се опадање нивоа у бунарима који се не могу стабилизovati, нивои опадају на ширем простору, мењају се хидраулички градијенти, смањују се издашности природних извора, смањује се протицај водотока и посебно базни отицај (STEVANOVIĆ, 2011). Надексплоатација утиче и на квалитет воде. Промене могу бити позитивне, негативне или индиферентне, зависно од тачке гледишта по којој се подземна вода оцењује (стабилност квалитета и температуре, очување природе). Ипак, најчешће у зону експлоатације дотичу воде лошијег квалитета (загађене, заслањене).

Претерано коришћење подземних вода у пољопривреди, која је и највећи конзумент на глобалном нивоу, могло би се објаснити на следећи начин: “Када пољопривреда зависна од падавина не успе, резервно решење су обично подземне воде. Прво им се приступи да спашавају усеве у сушним периодима, а онда то постаје навика...” (BURKE & MOENCH, 2000).

Енормни раст броја бунара и инсталираних пумпних агрегата за потребе наводњавања може се пратити на примеру Индије (сл.4). BURKE & MOENCH (2000) наводе да је број дизел и електричних пумпи порастао је са 87.000 у 1950. години на чак 12.6 милиона у последњој деценији 20. века. Процењује се да у Индији постоји више од 20 милиона бунара различите дубине. Светска банка је у свом извештају тврдила да је 175 милиона Индијаца производило своје усеве нерационалном употребом подземне воде (BROWN, 2012, 2013).



Сл. 4 Пораст броја пумпинх агрегата за наводњавање у Индији током 40 година

Fig. 4 Raise of pumpsets used in irrigation in India during 40 years (after BURKE & MOENCH, 2000)

Данас 18 држава које имају половину светског становништва прецрпљују своје издани (BROWN, 2013). Међу њима су три велика произвођача жита - Кина, Индија и САД, као и неколико других густо насељених земаља, укључујући Саудијску Арабију, Јемен, Ирак и Пакистан. Током последњих неколико деценија, неке од ових земаља углавном су искористиле резерве подземних вода, до те мере да су бунари често потпуно суви или се нови буше и до дубина од преко 1000 m. Тако се Саудијска Арабија током 1980-их поносила извозом жита у тадашњи СССР, да би надексплоатацијом довела своје издани (поменути Арабијски систем, бр. 22 на сл. 2) до критичне фазе, скоро потпуног исцрпљивања.

Додатни негативни утицај на обнављање прекомерно експлоатисаних издани имају климатске промене. Глобални пораст температуре ваздуха изазван емисијом гасова стаклене баште потврђен је у неколико извештаја Међувладиног панела за климатске промене (IPCC, 2007). Повећане температуре ваздуха промениле су режим падавина и влажности, снажно утичући на снабдевање водом у свету (BATES *et al.* 2008). Подземне воде, као део глобалног хидролошког циклуса, такође су погођене и биће изложене даљим претњама од климатских промена са једне стране, и повећаном експлоатацијом са друге (UNESCO-IHP, 2008).

У реферату на конференцији посвећеној утицају климатских промена на подземне водне ресурсе аутор овог рада (STEVANOVIĆ, 2013) наводи неколико примера драстичне надексплоатације и њених последица. На Северној Кинеској равници, просечан пад нивоа подземних вода достигао је 3 м/год. Према подацима Светске банке на подручју главног града Пекинга, бушење сада мора бити пет пута дубље него пре 20 година. У овом извештају су предвиђене „катастрофалне последице за будуће генерације“, ако се не пронађу друге опције и алтернативе за снабдевање водом (BROWN, 2013). Снижавање нивоа подземних вода у Сједињеним Америчким Државама драматично се повећало током 20. века — више је него удвостручено од 1950. до 1975. (KONIKOW, 2013). Форсирано црпење водоносног слоја Високих равница (High Plains) за наводњавање од 1940-их довело је до великог снижења нивоа воде (преко 50 m на појединим местима). У суседном тексашком водоносном слоју регионални конус депресије са средиштем у близини града Кингсвила историјски је снижен за око 76 m (KONIKOW, 2013). У Северном Ираку коришћење подземних вода за потребе наводњавања, као и за водоснабдевање брзорастућих урбаних подручја изазвало је регионално снижавање нивоа у многим водоносним слојевима (STEVANOVIĆ & JURKIEWICZ, 2009). У Ирану, земљи са око 80 милиона људи, производња житарица је опала за 10% између 2007. и 2012. године, јер су бунари за наводњавање почели да пресушују. Једна четвртина жетве житарица заснива се на прекомерном црпењу (BROWN, 2013). Пакистан, са популацијом од преко 180 милиона која расте за око 3 милиона годишње, такође интензивно „рудари“ своје подземне воде.

Негативне последице прекомерне експлоатације нису само недостатак или погоршани квалитет воде, проблем су и пратећи геохазарди. У неким регионима, као што су северна или западна Африка (Алжир, Тунис, делта Нила у Египту, Сенегал-Мауританија систем издани), област Газе, јужни делови САД (Флорида), затим Јужна Америка (Мексико, Аргентина), дошло је до великог исцрпљивања појединих водоносних слојева, што је у приобалним подручјима праћено интрузијом морске воде. Слегање терена са колапсима тла такође су честа последица исушивања терена због надексплоатације (нпр. САД, Кина).

Прве деценије 21. века већ обележавају нове миграције из сиромашних делова света, а велики разлог су управо неадекватни водни ресурси како у погледу квантитета, и још више квалитета воде. Последица су недостатак основне хигијене и недостатак хране. Истраживања Организације УН за пољопривреду и храну (FAO) у 8 неразвијених држава показала су да је 90% смртности деце узроковано неадекватним квалитетом воде или њеним потпуним недостатком. Свакодневно око 25,000 људи и деце умире из ових разлога (STEVANOVIĆ, 2011).

Поред промена климата и све веће потрошње, значајан проблем су и загађења издани и припадајућих подземних вода. FETTER (1993) издваја 6 главних типова антропогених загађивача подземних вода: 1. септичке јаме; 2. објекти за складиштење, третман и/или одлагање супстанци (депоније, отворене депоније, површинске јаме, рударски отпад и залихе, гробља, резервоари горива, одлагалишта радиоактивног отпада); 3. објекти за транспорт загађујућих материја (цевоводи, камиони и возови); 4. пољопривреда (наводњавање, употреба пестицида и ђубрива, отпад са фарми); 5. објекти којима се омогућује



инфилтрација контаминиране воде у водоносне слојеве (бунари, грађевински ископи); и б. природни извори чија је инфилтрација омогућена или подржана људском активношћу (интеракција са загађеним површинским водама, продор слане воде).

Геолошка средина и подземна вода су у уској интеракцији и један од главних фактора када се говори о животној средини и њеном одрживом развоју. Геолошка средина и тло су реципијенти који примају загађење било које врсте, док подземне воде осим што су предмет тих загађења, уједно су и трансфер медиј, који то загађење може пренети на веће удаљености и тиме ширити ореол контаминације. Стога је мониторинг квалитета подземних вода од кључне важности за сагледавање стања животне средине у урбаним, и областима интензивне индустријске и рударске активности. Поред тога могу се увести и пратити одређени индикатори стања животне средине (еколошки). STEVANOVIC (2016) предлаже следећу групу индикатора за квантитет и одрживо коришћење: Обновљиви (слатко)водни ресурси, Обновљиви водни ресурси у периодима рецесије (суше), „Домицилни“ (и „екстерни“) водни ресурси, Обновљиви ресурси подземних вода (динамичке резерве), Индекс експлоатације воде, Индекс експлоатације подземних вода, Потребне за пијаћом водом, Доступна вода по глави становника, Снижавање нивоа подземних вода, Губици воде. Од истог аутора за квалитет животне средине и вода предложени су следећи индикатори: Квалитет воде за пиће, Индекс индустријских отпадних вода, Индекс отпадних вода из домаћинства, Индекс специфичних загађивача, Статус депонија, Поновна употреба воде, Интрузија слане воде, Индекс ђубрива, Индекс пестицида, Допринос „зелене“ енергије, Потребне за водом зависног еко система, Специфичне, ендемичне и угрожене врсте (стање биодиверзитета).

## **ИМА ЛИ РЕШЕЊА?**

Решења наравно има. Некад су захтевна, и кад је у питању захватање, скопчана са неизвесношћу јер се ради о „невидљивом“ ресурсу. С друге стране, кад је у питању квалитет и заштита вода, људска небрига и немар су углавном поправљиви, али морају бити и финансијски подржани.

Водних ресурса има довољно на планети и за значајно већи број становника него што их има данас. MARGAT & VAN DER GUN (2013) наводе да је коришћење подземних вода (црпење, захватање на изворима) у 2010. години било на нивоу од 982 km<sup>3</sup>/годишње. Ако ово упоредимо са близу 7 милијарди становника планете у том периоду долазимо до закључка о теоријски припадајућих 140 m<sup>3</sup> само подземних вода сваком појединцу на нивоу године. Ипак, да су те количине ограничене у смислу задовољења свих потреба указују оквирни стандарди организација Уједињених нација (УН) по којима се сматра да су под великим стресом што се водних ресурса тиче, земље у којима је становнику доступно мање од 1,000 m<sup>3</sup>/год. воде (UN Water, 2018). Проблем је наравно у неравномерној дистрибуцији подземних водних ресурса и државним границама који деле и људе и природна богатства. VAN DER GUN (2022) наводи да се око 38% од свих коришћених количина подземне воде црпи у 37 мега

система од укупно издвојених 70 (сл. 2). Упркос несигурностима у проценама, може се закључити да је просечан интензитет захвата подземних вода у подручјима мега система издани знатно већи него у другим подручјима (скоро два пута). Ово је и логично јер мега системе поред великог распрострањења углавном одликује и већа водопрпусност водоносних наслага.

Анализе о коришћењу вода карстних издани у свету су показале да се њима користи близу 10% светског становништва, али да је при том искоришћени динамички флуks само око 1% од укупних резерви карстних издани на глобалним нивоу (STEVANOVIĆ, 2019).

Тамо где ће подземне воде недостајати, могуће је компензирати их другим водним ресурсима. Цена прераде морске воде (десалинизација) се постепено снижава. То решење је данас прихватљиво за богате државе, али сутра ће бити и за сиромашне, без обзира на цену коју ће морати да плате. Друга могућа решења, посебно унутар континента, као што су изградња великих акумулација, речна вода, вода од кише, па чак и прерада отпадне воде, биће изнуђена у појединим областима. Али пре њих морамо размотрити да ли са постојећим обнављајућим ресурсима подземне воде (динамичке резерве) можемо наставити нормално снабдевање становништва, пољопривреде и индустрије.

Вештачко прихрањивање и регулација режима су инжењерске интервенције са циљем обезбеђивања додатних количина воде посебно у критичним периодима. Прва група поступака је карактеристична за интергрануларне водоносне средине (алувијони, басени), и базира на захвату и упуштању у подземље површинских вода ради њиховог оплемењавања. Под регулацијом подразумевамо уравнотежење режима издани, и то је пре свега случај код динамичних карстних издани. Мере вештачког прихрањивања или регулације издани није могуће применити увек и свуда, нужна су детаљна хидрогеолошка и друга истраживања, али је код великог броја већ активних изворишта у свету, могућа поправка стања и обезбеђивање додатних количина воде, а да то не води у надексплоатацију.

Кад је у питању хуманитарно снабдевање водом, оно је нужно у појединим деловима света, и тада не можемо говорити о одрживости и оптималном коришћењу ресурса. Интензивније црпење подземне воде у периодима дуготрајне суше спашава људске животе и спречава нове миграције (STEVANOVIĆ, 2018). Наравно, ове мере треба спроводити само краткотрајно и уз пратећи мониторинг ефеката црпења.

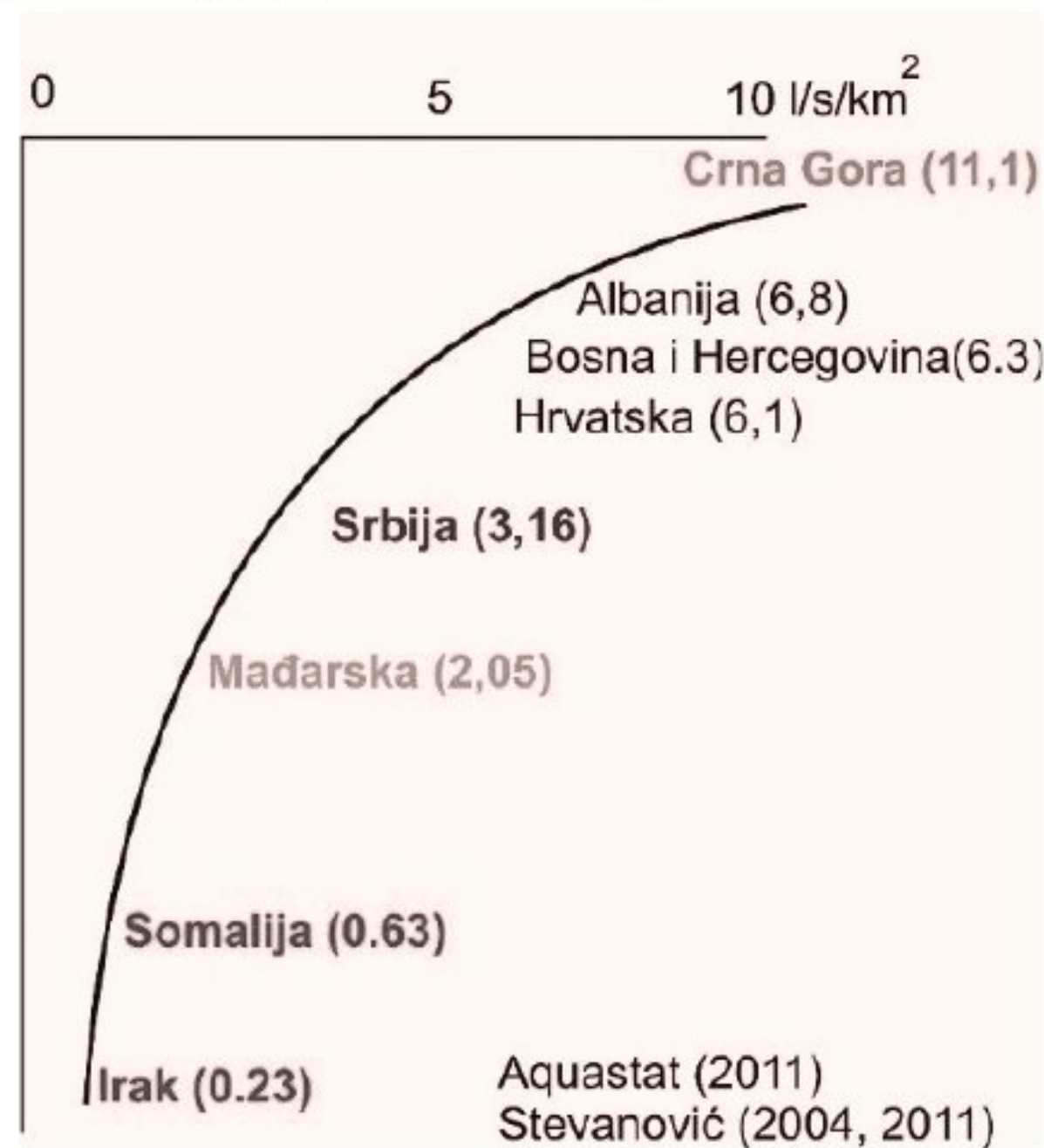
## **НАША РЕАЛНОСТ - ДА ЛИ ЈЕ СРБИЈА СИРОМАШНА ПОДЗЕМНОМ ВОДОМ И КАКАВ ЈЕ ЊЕН СТАТУС?**

Одговор на ово питање аутор је дао у више својих и коауторских радова (DIMKIĆ *et al.* 2011; STEVANOVIĆ, 2011, 2019; POLOMČIĆ *et al.* 2011; STEVANOVIĆ *et al.* 2015, 2016, 2020).

Сложени геолошки услови територије Србије условили су хидрогеолошку хетерогеност и неједнако присуство подземних вода у оквиру различитих типова

издани. Подручје Србије карактерише присуство издани веома богатих подземним водама (мезозојске карбонатне стене, квартарне алувијалне и терасне наслаге, и плићи неогени водоносни седименти), али и формација са малим резервама подземних вода (палеозојске формације, магматске и метаморфне стене, флишне наслаге јуре и креде, као и дебели комплекси седиментних стена у басенима).

Србија је са своје западне и југозападне стране окружена државама које су од ње значајно богатије водом, што је резултат знатног распрострањења карстних терена и водом богатих карстних издани. То су Црна Гора, Босна и Херцеговина, Албанија, Словенија, Хрватска и Аустрија (сл. 5). С друге стране, наш јужни сусед Северна Македонија, и једним делом Грчка припадају групи од 40-ак држава света које се сврставају у „земље под стресом“.



Сл. 5 Осредњена вредност специфичне издашности издани (l/s/km<sup>2</sup>) у ЈИ Европи и ради поређења неким земљама у аридним областима света

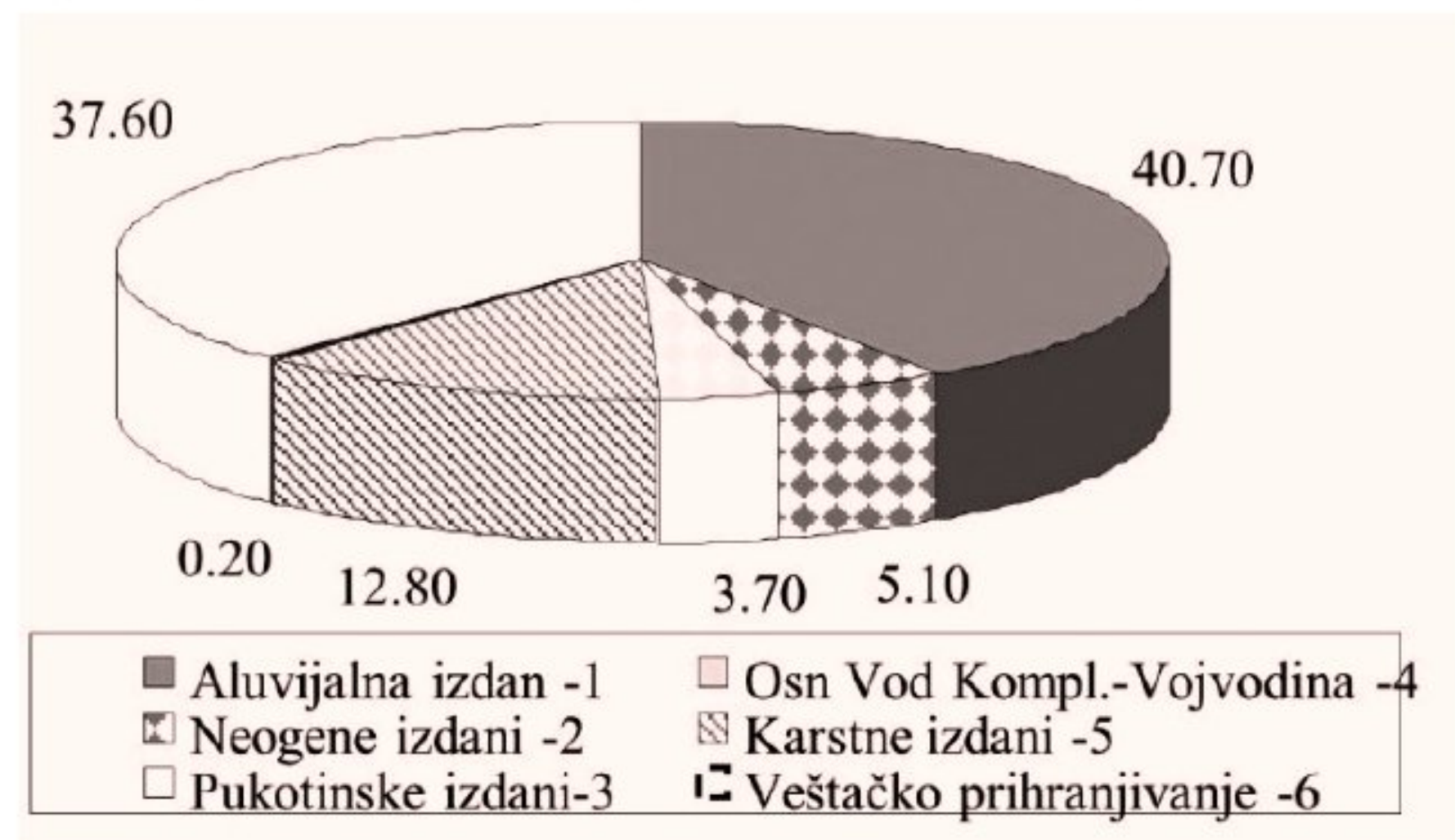
Fig. 5 An average specific groundwater yield (l/s/km<sup>2</sup>) in SE Europe and some other countries in arid parts of the world

За потребе **водоснабдевања насеља пијаћом водом** подземне воде имају учешће од око 75% (DIMKIĆ *et al.* 2011, POLOMČIĆ *et al.* 2011). На подручју Војводине искључиви вид водоснабдевања становништва је коришћење подземних вода. За јавно водоснабдевање највише се користе издани са слободним нивоом у алувијалним равнинама великих река (Дунав, Сава, Велика Морава и Дрина). Поред њих користе се и издани под притиском у оквиру неогених басена Војводине и централне Србије, као и карстне издани у југозападном и источном делу Србије. У Србији је после Другог светског рата јавним водоводима било обухваћено само око 10% становништва. До 1975 тај проценат се повећава на 55% да би до средине осамдесетих година већ око 2/3 становништва било обухваћено централизованим водоснабдевањем (STEVANOVIĆ *et al.* 2015).

Према обрађеним статистичким подацима водоводних служби, стручњаци Института за водопривреду "Јарослав Черни" у документацији Водопривредне основе Србије (1996), наводе да укупне количине вода које се користе за

водоснабдевање у Србији износе годишње око  $750 \times 10^6 \text{ m}^3$ , од чега су подземне воде око  $580 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Око  $430 \times 10^6 \text{ m}^3$  су подземне воде из различитих водоносних средина (најчешће алувијалне, сл. 6) које се углавном захватају помоћу бунара, док се око  $145 \times 10^6 \text{ m}^3$  захвата са каптажа извора. Може се констатовати да током последњих више од 20 година није дошло до значајнијих промена у погледу коришћене количине вода, а учешће подземних вода се чак и смањује. Разлози су вишеструки, међу њима најзначајнији су демографска стагнација, спорији привредни развој, мали број нових објеката водоснабдевања, смањење потрошње. Уз то, присутно је форсирање коришћења савске воде за грађане Београда, изграђене су нове акумулације (Барје, Стубо-Ровни) и повећано је коришћење речне воде (Чачак, Пожега, Ариље, Лучани и Горњи Милановац).

Процене су да Србија располаже са  $67 \text{ m}^3/\text{s}$  природно обновљивих (динамичких) резерви подземних вода, а уз реализоване пројекте вештачког прихрањивања (сл. 6) и до  $108 \text{ m}^3/\text{s}$  (DIMKIĆ *et al.* 2011).



Сл. 6 Процентуално учешће искоришћених или потенцијалних резерви вода према типовима издани укључујући и вештачко прихрањивање у Србији

**Fig. 6** Percentage of utilized or potential groundwater resources including artificial recharge in Serbia (1-alluviums; 2. Neogene aquifers; 3. fissured aquifers; 4. basic water-bearing complex, Vojvodina; 5. karstic aquifers; 6. artificial recharge) (after STEVANOVIĆ *et al.* 2016)

СТЕВАНОВИЋ И ДОКМАНОВИЋ (2015) су закључили да су природне обновљиве резерве у издвојеним водним телима подземних вода око  $72 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ако се има у виду да Србија у области комуналног водоснабдевања троши око  $23 \text{ m}^3/\text{s}$ , од чега око  $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$  представљају подземне воде, јасно је да су природне обновљиве резерве око четири пута веће од тренутно коришћених. Наравно дистрибуције ресурса подземних вода није равномерна и нема их довољно свуда али је за већину активних изворишта осигурана дугорочна перспектива водоснабдевања. Поред тога, могућа је изградња већих регионалних система и трансфер квалитетне воде и у удаљенија подручја. Тако би се решили и проблеми вода лошег квалитета (пр. Банат) и недостајућих количина (пр. Шумадија, Јужна Србија).

Велики број потенцијално значајних изворишта није искоришћен и оне представљају значајну резерву за будућност. Најзначајнија лежишта подземних вода у Србији су на подручјима Мачве, долине Саве до ушћа у Дунав, приобаља

Дунава до Голубца, Кучајско-Белјаничког масива, Суве планине, Таре, Метохијске котлине, долине Велике Мораве (STEVANOVIĆ, 2019).

Поред јавног водоснабдевања у Србији, **подземне воде се захватају и користе и за флаширање**, као минералне и као маломинерализоване, односно стоне. На основу статистичких података о производњи и потрошњи флашираних природних минералних и природних изворских вода у протеклих неколико година, очигледан је тренд раста. У Србији постоји око 40 оваквих комерцијалних изворишта природних изворских вода, минералних или маломинерализованих вода.

По питању **квалитета подземних вода**, један део ресурса подземних вода природно је заштићен, или је у сливовима ретко насељених подручја, док је један део непосредно угрожен људском активношћу. Воде доброг квалитета карактеришу карстне издани код којих је хлорисање најчешће једини вид третмана. Подземне воде основног водоносног комплекса у Војводини имају високе основне концентрације органских материја и појединих микрокомпоненти хемијског састава: садржај јона гвожђа, арсена, органских материја често и вишеструко одступа од прописаних максимално дозвољених концентрација. Посебно је угрожено подручје средњег и северног Баната где неповољни хидрогеохемијски услови лимитрају употребљивост подземних вода.

О константном загађивању наших водотокова и тиме и приобалних подземних вода сведочи и податак да у Србији постоје инсталисани капацитети за третман око 15% од укупно испуштених комуналних отпадних вода, а да у пуном капацитету функционише само око 6%.

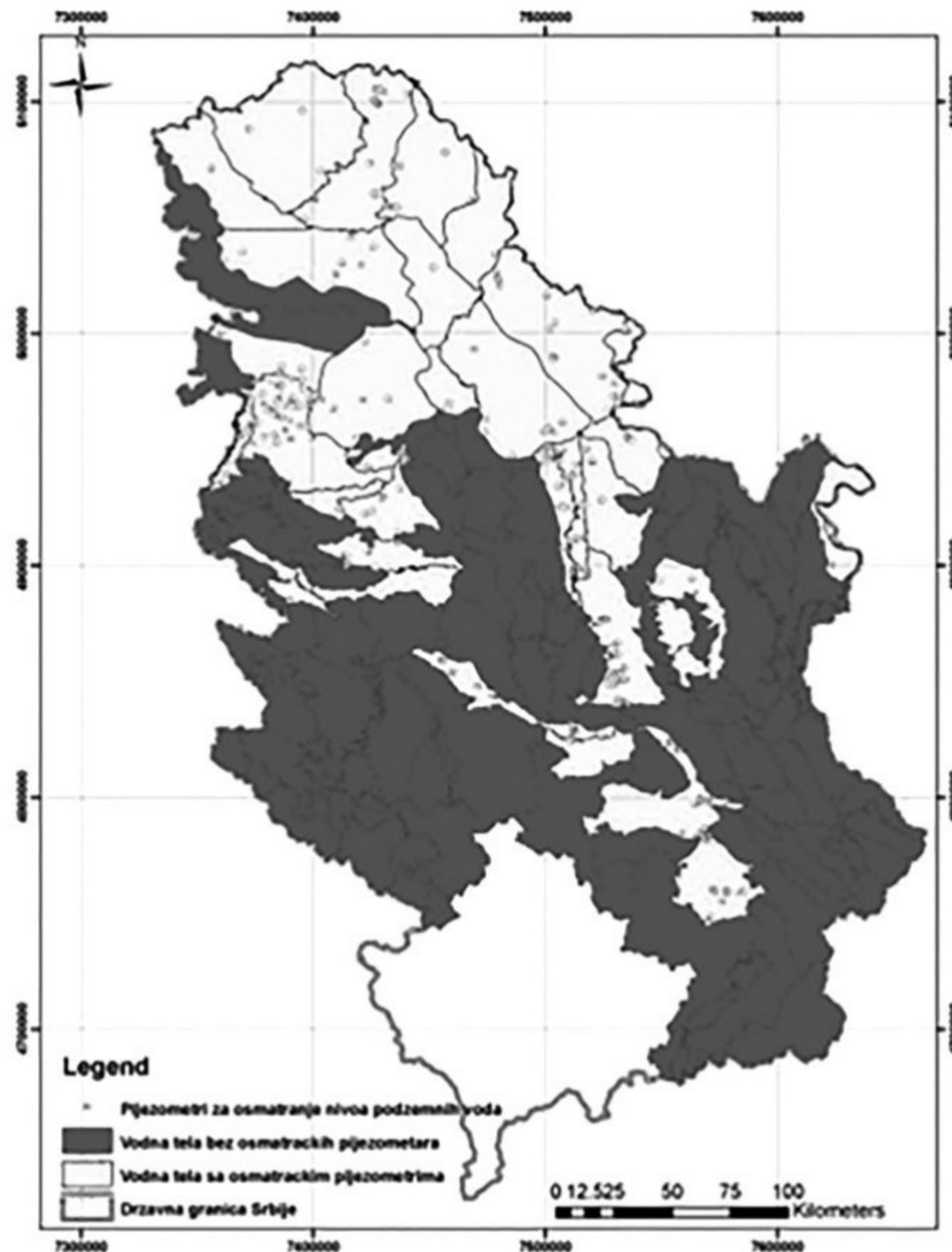
За потребе оцене притиска на квалитет подземних вода и тиме одређивања приоритетних локација за мониторинг STEVANOVIĆ *et al.* (2020) су утврдили да од укупног броја издвојених водних тела подземних вода (ВТ) у Србији:

- 57 ВТ није под притиском,
- 31 ВТ је потенцијално под притиском,
- 3 ВТ су под притиском.

Стање у погледу **мониторинга подземних вода** није задовољавајуће. Просторно посматрано станице државне мреже о којима се стара Републички хидрометеоролошки завод, формиране су искључиво у алувијонима већих река и изданима формираним у оквиру кварталних наслага у Војводини (сл. 7). Поред осматрања подземних вода у оквиру интегрануларног типа порозности, у изданима другачијег типа порозности, посебно карстне, без обзира на њихов значај, систематска осматрања у протеклом периоду била су веома ретка, и углавном су их вршиле геолошке организације за потребе конкретних пројеката (STEVANOVIĆ *et al.* 2015, 2020).

**Наводњавање пољопривредних површина.** У Србији је овај вид коришћења подземних вода веома мали и у складу са укупним недовољним наводњавањем. Са раније свега око 1%, а сада 2-3% наводњаваних пољопривредних површина, Србија је на самом дну европске лествице (STEVANOVIĆ *et al.* 2016).

**Коришћење минералних и термалних вода** у медицини и за рекреативне потребе је једна од великих развојних перспектива Србије. Србија поседује преко 200 природних извора минералних и термалних вода, и укупни ресурси оцењени су на преко 1000 l/s (FILIPović & KRUNIĆ, 1995). То су квалитетне подлоге за развој бањског, спортско-рекреативног и еко-туризма, али су на већини локација свакако неопходна и допунска детаљна испитивања, посебно ради добијања вода са вишим температурама. Највише ових појава је заступљено у централној, затим у западној и јужној Србији. Ипак, коришћење ових вода и даље је знатно ниже у односу на земље ЕУ.



Сл. 7 Водна тела подземних вода и покривеност пијезометарском осматрачком мрежом  
**Fig. 7** Groundwater bodies and monitoring piezometric network in Serbia. Dark tones ' water bodies without monitoring (after STEVANOVIĆ *et al.* 2020)

**Коришћење геотермалне енергије** као једног од најзначајнијих видова „зелене“ енергије у Србији је поново актуелно након неколико деценија застоја (MILENIĆ *et al.* 2011). На територији СФРЈ и Србије прво издавајање геотермалних провинција и прогноза могућих вредности густине терестричног топлотног тока, урађено је почетком осамдесетих година 20. века. Прва карта густине топлотног тока за подручје Србије, Црне Горе и Македоније, публикована је у Геотермалном атласу Европе (MILIVOJEVIĆ *et al.* 1995).

Према MILENIĆ *et al.* (2011) у српском делу Панонског басена избушено је у периоду од 1977-1988. укупно 58 бушотина укупне дубине око 50 km. У осталим геотермалним провинцијама избушено је до 1992. године 45 истражних бушотина сумарне дубине око 40 km. Од њих, само су три дубине до 1.800 m, четрнаест је дубина 1.000-1.500 m, тринаест са дубинама 500-1.000 m и петнаест 300-500 m. Већина ових истражних бушотина су са самоизливом термалних вода. Укупна издашност је око 500 l/s .

У Србији постоји изузетно велики број тзв. субгеотермалних водних појава, код којих се температура воде креће од 10-30 °C. Са развојем технологије и каскадних топлотних пумпи омогућено је подизање температура до нивоа који омогућује коришћење у већ постојећим системима грејања. То последњих година има за последицу повећање инвестиција за њихово коришћење као вида обновљиве енергије.

Оценом потенцијалности субгеотермалне енергије Србије констатовано је да би се, имајући у виду укупне резерве вода и различите потребе корисника, око 20% расположивих динамичких резерви могло енергетски искоришћавати, пре свега на подручју централног и источног дела Србије (STEVANOVIĆ *et al.* 2016). То је значајно више од 4% као процењеног могућег учешћа геотермалне енергије у „зеленом“ енергетском билансу земље како је то учињено у „енергетској стратегији“ Републике Србије.

## **ЗАКЉУЧАК**

Свет се данас суочава са низом претећих изазова, од којих они са предзнаком климатских варијација и расположивости водним ресурсима, спадају у основне, јер од њих зависи не само економски развој и благостање, већ и елементарна егзистенција целокупног живог света. Подземне воде као део укупног водног биланса и драгоцен природни ресурс обезбеђују воду за пиће за око две милијарде људи, а омогућују продукцију потребне хране за око половине светског становништва. Колико год да су са једне стране угрожене и климатским променама и прекомерном експлоатацијом, у унутрашњости Земље налазе се ресурси који могу значајно да помогну у превладавању наведених тешкоћа. Стога је био сасвим оправдан избор слогана за Светски дан вода 2022: „Подземне воде: Учинимо невидљиво видљивим“. И ништа је мање значајан закључак Светске банке у једном од извештаја за 2016: „Подземне воде могу значајно допринети прилагођавању климатским променама: њихова широко распрострањена доступност и уобичајено велике количине, а тиме и дуго време задржавања и спора реакција чине их више природно заштићеним од сезонских и међугодишњих варијација падавина и температуре. За разлику од површинског акумулисања воде, водоносни слојеви губе занемарљиве количине воде испаравањем и транспирацијом" (WORLD BANK, 2016).

Подземних вода нема увек и свуда. Највећи део налази се акумулиран у интергрануларним и карстним водоносним срединама, с тим што за разлику од површинских вода које су доминантно везане за хумидне области, њих има у стенским масама и у аридним областима. Та чињеница чини живот у тим

просторима, иначе углавном сиромашним свим природним ресурсима, ипак подношљивим.

Подземне воде треба систематски истраживати, као и организовати мониторинг који може да предупреди негативне последице надексплоатације, али и да упозори на претећа загађивања. Рационално и одрживо коришћење јесте императив, али у појединим деловима света, нужно је и хуманитарно снабдевање водом, па и повремена надексплоатација посебно током дуготрајних суша или трајања елементарних непогода.

Србија припада групи земља Европе са довољним ресурсима подземних и површинских вода за дугорочно задовољавање потреба становништва у пијаћој води, као и потреба у области индустрије, енергетике, наводњавања пољопривредних површина. Ресурси, као уосталом и на глобалном плану, нису равномерно распоређени, најбогатије водом су долине великих речних токова и планинске области источне и западне Србије, а водом најсиромашнија подручја Шумадије и горњег дела слива Јужне Мораве.

Процена је да Србија располаже са око 70 m<sup>3</sup>/s подземних вода у просечној хидролошкој години, а уз вештачко прихрањивање потенцијално и преко 100 m<sup>3</sup>/s. Ове количине су око четири пута веће од тренутно коришћених подземних вода и око три пута веће од укупно искоришћених вода (површинских и подземних) у комуналним системима и пружају солидну гаранцију за будућност водоснабдевања, наравно уз услов њиховог одрживог коришћења. Нажалост, однос према подземним водама није задовољавајући. Већ дужи низ година се не отварају нова изворишта подземних вода, постојећа се често занемарују, квалитет захваћених вода је све слабији и недовољно се чини на превенцији и систематском предупредивању и смањењу утицаја геолошких хазарда.

Потенцијал минералних и термалних вода, као и геотермалне енергије у Србији је висок и отвара перспективе за развој бањског туризма, као и активније коришћење овог енергетског ресурса у свакако далеко већем степену од националним плановима предвиђених 4% од укупне „зелене енергије“.

## **GROUNDWATER – KEY RESOURCE FOR THE FUTURE AND BEST INDICATOR OF ENVIRONMENTAL STATUS**

### **INTRODUCTION**

Groundwater is a natural resource of key importance for humanity, both now and in the future. They provide drinking water for about two billion people, enable the production of half of the world's food (ZEKTSER & EVERT, 2004). Although the calculation of this "invisible" resource in different types of rocks can be a complicated task, many authors agree that groundwater represents 98-99% of the low-mineralized (fresh) water resources of the continents. Therefore, they are also a significant reservoir of high quality water, with the rational use of which humanity can mitigate climate change more easily (IPCC, 2007).



The last decade of the 20th and the beginning of the 21st century was marked by a broad application of the concept of "sustainable development", which includes the principles of harmonious attitude of individuals, nations and states towards the natural environment and the preservation of natural resources of the Earth for future generations. In Serbia, the principles of sustainable development are being increasingly incorporated into the legislation and development planning documents, including concrete actions. Large strides have been taken in some areas (e.g. the protection of biodiversity), while in others we are still at the beginning (STEVANOVIĆ, 2011). However, attitude towards the geological environment and groundwater is unfortunately not yet satisfactory. For many years, no new groundwater sources have been opened, the existing ones are often not well maintained, the quality of tapped waters is getting weaker, reactions are mainly made when excessive soil and groundwater pollution has already occurred, and not enough is done to prevent and systematically warn and reduce geological hazards. The years and decades will show whether in the coming years and decades the declaratively presented and/or rarely properly designed plans that strive to improve the condition and the need for environmental protection, and thereby eliminate or mitigate all factors that have a negative impact on it, will be implemented in practice.

## **GLOBAL IMPORTANCE OF GROUNDWATER**

The theme of the World Water Day in 2022: „Groundwater: Making the Invisible Visible“ is not coincidentally chosen. Groundwater is essential water resource of the Earth. Groundwater is the essential water resource on Earth, which includes about 30% of all freshwater water resources on the planet (close to 70% is in glaciers and only 1% is the water of rivers and lakes). Groundwater supplies rivers, especially during droughts, and also lakes and wells and in this way provide potable water for most people of our planet. Groundwater ensures to prevail consequences of drought, represents an important part of climate change adaptation process and is often a solution for people without access to safe water. It sustains ecosystems, maintains the baseflow of rivers and prevents land subsidence and seawater intrusion.

Table 1 shows the use of groundwater resources for different purposes. It is noticeable that the largest part of this resource in the world is spent on irrigation, which is a logical consequence of rare and insufficient surface water resources in arid parts of the world where a large part of the world's population is also concentrated (Fig. 1).

As a consequence of the climatic conditions, the areas with the water shortage are from 15<sup>o</sup> to 30<sup>o</sup> north latitude. In terms of water availability per inhabitant, America is in first place with 24,000 m<sup>3</sup>/year, followed by Europe (9,000 m<sup>3</sup>/year), and due to population density, Asia is the poorest with 3,400 m<sup>3</sup>/year.

The latest analyses confirm well-known fact that in the arid areas are located some of the largest aquifer systems in the world. VAN DER GUN (2022) distinguished out 70 so-called mega aquifer systems, those that extended over more than 50,000 km<sup>2</sup> and have cumulative thickness of the productive zone of more than 100 m (Fig. 2). The largest number of mega aquifers is in Africa, a total of 19, followed by Asia with 17, North America with 12 and Europe with 11. In the Northern Mediterranean area and in

the Saharan and sub-Saharan regions are systems with abundant groundwater reserves, all with a cross-border character: at Fig. 2 by numbers are indicated the following: 1. Nubian Aquifer System, 2. North-Western Sahara Aquifer, 3. Murzuk-Djado Basin, 4. Taoudeni-Tanezrouft Basin. In the hyper-arid area of the Saudi Peninsula, a significant Arabian Aquifer System is also present (No. 22).

That groundwater should be given priority when it comes to drinking water is also evidenced by the generally accepted concept in the countries of the European Union (EU). Table 2 shows the ratio of the use of surface and ground waters in the public water supply of the population of some of EU countries. It is also noticeable that countries with a relatively unfavourable distribution of rich aquifers have a significant share of groundwater (e.g. Sweden, Finland, the Czech Republic).

Despite all these facts, for many, groundwater is just "far from sight, far from heart". Therefore, for sustainable management of this hidden resource is necessary a vision, and especially understanding of its connection with geological setting and surface waters of all kinds.

## **GLOBAL CHALLENGES IN GROUNDWATER UTILIZATION**

The World is facing today the two major threats:

- Increased water demands and uncontrolled water extraction on one, and
- Climate changes, on the other side.

These two factors provide a negative synergy, and many countries or regions are already facing water shortage and significant depletion of their water reserves (e.g. parts of USA, China, India, countries of Arabian Peninsula, Northern Africa). Such situation is likely to continue, and forecasts are even worst for the arid part of our planet.

The increase in water demands during the 20<sup>th</sup> century was enormous, and it is not so much the result of the growth of the population on the planet, but above all the accelerated urbanization, industrialization and in general the increase in living standards and conditions. From 1900 to 1975, the water demands increased 7 times, and only in the period 1975 - 2000, an additional two times (Fig. 3). The number of cities with over 5 million inhabitants increased from only 8 in 1950, to over 50 in the first decade of the 21st century, half of which are in Asia.

It is very common that intensive use of groundwater lead to overexploitation and deterioration of groundwater quality. There is a drawdown of water table in wells that cannot be stabilized, regional cone of depression expands, hydraulic gradients change, the discharge of natural springs is reducing, and finally the flow of watercourses and especially the base runoff is reducing, too (STEVANOVIĆ, 2011). Changes of water quality due to overexploitation can be positive, negative or indifferent, depending on the point of view from which groundwater is evaluated. However, surface or aquifers' water of poorer quality (polluted, salty) often reaches the exploitation zone.

The excessive use of groundwater in agriculture, which is the largest consumer at the global level, could be explained as follows: "When rainfed agriculture fails, the fallback is usually groundwater. First it is accessed to smooth over the dry periods, and then it becomes a habit..." (BURKE & MOENCH, 2000).

The enormous growth in the number of wells and installed pumping units for irrigation purposes can be seen on the example of India (Fig. 4). BURKE & MOENCH (2000) state that the number of diesel and electric pumps increased from 87,000 in 1950 to as many as 12.6 million in the last decade of the 20th century. It is estimated that there are more than 20 million wells of various depths in India. The World Bank claimed in its report that 175 million Indians were producing their crops through unsustainable use of groundwater (BROWN, 2012, 2013).

Today some 18 countries containing half the world's people are over-pumping their aquifers (BROWN, 2013). Among these are the three big grain producers – China, India and the USA - as well as several other populous countries, including Saudi Arabia, Yemen, Iraq, Syria, Iran, and Pakistan. During the last couple of decades, several of these countries have over-extracted to the point that aquifers are being depleted and wells are going dry, or new ones are drilled to depths of over 1000 m. Thus, during the 1980s, Saudi Arabia took pride in exporting grain to the then USSR, only to bring its aquifers (mentioned Arabian Aquifer System, no. 22 in Fig. 2) to a critical stage, almost completely exhausted, through overexploitation.

Climate change (CC) has an additional negative impact on the restoration of overexploited aquifers. The global rise of air temperature caused by the emission of greenhouse gases had been confirmed in several reports of the Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC, 2007-2020). Increased air temperatures changed the regime of precipitation and humidity, strongly impacting the world's fresh water supply (BATES *et al.* 2008). Groundwater, as part of the global hydrological cycle, is also affected and will be exposed to further threats from CC on the one side, and increased extraction on the other (UNESCO-IHP 2008).

In a report at a conference dedicated to the impact of climate change on groundwater resources, the author of this paper (STEVANOVIĆ, 2013) cites several examples of drastic overexploitation and its consequences. In the North China Plain, the average drop in the groundwater table has reached 3 m/year. According to the World Bank in the area of the capital Beijing, drilling now has to be five times deeper than 20 years ago. “Catastrophic consequences for future generations” are envisaged in this report, if no other options and alternatives are found (BROWN, 2013). Groundwater withdrawals in the United States have increased dramatically during the 20th century - more than doubling from 1950 through 1975 (KONIKOW, 2013). Substantial pumping of the High Plains aquifer for irrigation since the 1940s has resulted in large water-table declines (exceeding 50 m in places). An even worse case is in the neighbouring Texas aquifer: a regional cone of depression located near the city of Kingsville has been observed to deplete historically by approximately 76 m (KONIKOW, 2013). In Northern Iraq forced groundwater utilization for irrigation purposes as well as for the water supply of fast-growing urban areas has caused regional drawdown of many aquifers (STEVANOVIĆ & IURKIEWICZ, 2009). In Iran, a country with around 80 million people, grain production dropped 10% between 2007 and 2012 as irrigation wells started to go dry. One-quarter of its current grain harvest is based on over-pumping (BROWN, 2013). Pakistan, with a population of 182 million that is growing by 3 million per year, is also heavily mining its groundwater.

The negative consequences of excessive exploitation are not only the depletion of water or deterioration of water quality, the accompanying geohazards are also a

problem. In some countries, such as Northern Africa (Algeria, Tunisia, Nile delta in Egypt, Senegal-Mauritania aquifer system), Gaza Strip, southern part of USA (Florida) or South America (Mexico, Argentina), there was also heavy depletion of some aquifers, which in coastal areas is followed by sea water intrusions. Land subsidence with soil collapses is also a frequent consequence of land drying due to groundwater overexploitation (e.g. USA, China).

The first decades of the 21st century are marked by new migrations from undeveloped world, and one of the main reasons is inadequate water resources, both in terms of quantity and, even more, quality of water. The consequence is lack of basic hygiene and lack of food. Research by the UN Food and Agriculture Organization (FAO) in 8 underdeveloped countries showed that 90% of child mortality is caused by inadequate water quality or its complete lack. Every day around 25,000 people and children die for these reasons (STEVANOVIĆ, 2011).

In addition to climate changes and increased water consumption, a significant problem is also the pollution of the aquifers and associated groundwater. Fetter (1993) distinguishes six categories of sources of anthropogenic groundwater contamination: 1. septic tanks, 2. sources designed to store, treat and/or dispose of substances (landfills, open dumps, mining waste and stockpiles, graveyards, fuel reservoirs, radioactive waste disposal sites), 3. sources to retain substances during transport (pipelines, trucks and trains), 4. agriculture (irrigation, use of pesticides and fertilizers, farm animal wastes), 5. sources providing a conduit for contaminated water to enter aquifers (wells, construction excavations), 6. natural sources whose discharge is created or supported by human activity (interaction with polluted surface water, saltwater intrusion).

Geological setting and groundwater are in close interaction and the main factors when discussing environmental issues and sustainable development. The rocks and soil are recipients of pollutants of every kind, while groundwater is not only acceptor of pollution, but also transfer media which may spread contamination to large distances. This is why monitoring of groundwater quality and some of ecological indicators is of key importance for assessment of environmental conditions in urban, but also in zones of intensive industrial and mining activities. In addition to, certain indicators of the state of the environment and water (ecological) can be introduced and monitored. STEVANOVIĆ (2016) proposes the following group of indicators for quantity and sustainable use: Renewable freshwater resources, Renewable freshwater resources in recession (drought) periods, "Domicile" (and "External") freshwater resources, Renewable GW resources (Dynamic reserves), Water exploitation index, Groundwater exploitation index, Drinking water demands, Water available per capita, Groundwater depletion, Water losses. The same author proposed the following indicators for environmental and water quality: Drinking water quality, Industry wastewater index, Household waste water index, Specific pollutants index, Water reuse, Salt water intrusion, Fertilizer index, Pesticide index, "Green" energy contribution, Water demands of dependent eco system, Specific endemic and endangered species (Biodiversity status).

## **ANY SOLUTIONS?**

Of course, there are solutions. Sometimes they are demanding, and when it comes to capture, they are fraught with uncertainty because groundwater is a real "invisible" resource. On the other hand, when it comes to water quality and protection,

human carelessness and negligence are mostly repairable, but they must be financially supported.

There are enough water resources on the planet for a significantly larger number of inhabitants than there are today. MARGAT & VAN DER GUN (2013) state that in the year 2010, the use of groundwater (pumping, abstraction at springs) was at the level of 982 km<sup>3</sup>/year. If we compare this volume of water with nearly 7 billion inhabitants of the planet in that period, we come to the conclusion that each individual is theoretically entitled to 140 m<sup>3</sup> of groundwater per year. However, the fact that these quantities are limited in terms of satisfying all demands is indicated by the framework standards established by the United Nations (UN), according to which countries where less than 1,000 m<sup>3</sup>/year are available to the inhabitant are considered to be under great stress as far as water resources are concerned (UN Water, 2018). The major problem is the uneven distribution of underground water resources and national borders that divide both, people and natural resources. VAN DER GUN (2022) states that about 38% of all used amounts of groundwater are pumped from 37 mega aquifer systems out of a total of 70 allocated (Fig. 2). Despite the uncertainties in the estimates, it can be concluded that the average intensity of groundwater abstraction in the areas of the mega system is significantly higher than in other areas (almost twice). This is also logical because mega systems, in addition to their large extension, are generally characterized by higher water permeability.

The analyses of the global utilisation of karst waters have shown that they are used by close to 10% of the world's population, but that the dynamic flux used is only about 1% of the total reserves of karst waters on a global level (STEVANOVIĆ, 2019).

In the areas where groundwater will be lacking, it is possible to compensate it with other water resources. The price of seawater processing (desalination) is gradually decreasing. That solution is acceptable today for the rich countries, but tomorrow it will be for the poor as well, regardless of the price they will have to pay. Other possible solutions, especially within continents, such as the construction of large reservoirs, use of river water, rainwater, and even wastewater treatment, will be forced in certain areas. But before them, we must consider whether we can continue the normal livelihood of the population, agriculture and industry with the existing renewable groundwater resources (dynamic reserves).

Artificial recharge and regulation of aquifers are engineering interventions aimed at providing additional amounts of water, especially in critical drought periods. The first group of procedures is characteristic for intergranular aquifers (alluviums, basins), and is based on capturing and infiltrating surface waters underground for their refinement. By regulation of aquifers, we mean the balancing of their regime, and this is primarily concerns dynamic karst systems. It is not possible to apply the measures of artificial recharge or regulation of aquifers everywhere, detailed hydrogeological and other research is necessary, but in a large number of already active sources in the world, it is possible to improve the situation and provide additional amounts of water, without this leading to overexploitation.

When it comes to humanitarian water supply, it is necessary in certain parts of the world, and then we cannot talk about sustainability and optimal use of resources. More intensive pumping of groundwater during periods of prolonged drought saves

human lives and prevents new migrations (STEVANOVIĆ, 2018). Of course, these measures should be implemented only for a short time and with accompanying monitoring of the effects of pumping.

## **OUR REALITY - IS SERBIA POOR IN GROUNDWATER AND WHAT IS ITS STATUS?**

The author gave the answer to this question in several of his own and co-authored works (DIMKIĆ *et al.* 2011; STEVANOVIĆ, 2011, 2019; POLOMČIĆ *et al.* 2011; STEVANOVIĆ *et al.* 2015, 2016, 2020).

The complex geology of the territory of Serbia caused hydrogeological heterogeneity and uneven presence of groundwater within different types of aquifers. The territory of Serbia is characterized by the presence of deposits very rich in groundwater (Mesozoic carbonate rocks, Quaternary alluvial and terrace deposits, and shallower Neogene sediments), but also formations with small reserves of groundwater (Paleozoic formations, igneous and metamorphic rocks, Jurassic and Cretaceous flysch deposits, as well as thick complexes of sedimentary rocks in the basins).

Serbia is surrounded on its western and southwestern sides by countries that are significantly richer in water than Serbia, which is the result of a significant spread of karst terrains and water-rich karst aquifers. These are Montenegro, Bosnia and Herzegovina, Albania, Slovenia, Croatia and Austria (Fig. 5). On the other hand, our southern neighbour North Macedonia and partly Greece belong to a group of about 40 countries in the world that are classified as "countries under water stress".

**Groundwater used for water supply.** About 75% of the population in Serbia is currently supplied with drinking water from underground. In the Vojvodina Province, the exclusive type of water supply for the population is the use of groundwater. For public water supply, intergranular aquifers in the alluvial plains of large rivers (Danube, Sava, Velika Morava and Drina) are mostly used. In addition to them, artesian aquifer in the Neogene basins of Vojvodina and central Serbia, as well as karst aquifers in the southwestern and eastern parts of Serbia, are also actively exploited.

While after the Second World War only about 10% of the population was able to enjoy the benefits of a centralised water supply, until 1980 already more than 2/3 of Serbia's population had obtain access to public water supply systems (DIMKIĆ *et al.* 2011; POLOMČIĆ *et al.* 2011).

According to the statistical data of the water supply services, the experts of the Institute for Water Management "Jaroslav Černi" in the documentation of the Water Master Plan of Serbia (1996), state that the total amount of water used for water supply in Serbia is about  $750 \times 10^6 \text{ m}^3$  per year, of which groundwater is about  $580 \times 10^6 \text{ m}^3$ . About  $430 \times 10^6 \text{ m}^3$  are groundwater from different aquifers (most often alluvial, Fig. 6) which are captured by wells, while about  $145 \times 10^6 \text{ m}^3$  are captured spring water. It can be stated that during the last more than 20 years there have been no significant changes in terms of the amount of water used, and the share of groundwater is even decreasing. The reasons are multiple, among them demographic stagnation, slower economic development, a small number of new water supply facilities, and a reduction

in consumption. In addition, there is a forced use of Sava water for the citizens of Belgrade, new reservoirs have been built (Barje, Stubo-Rovni) and the use of river water has increased (Čačak, Požega, Arilje, Lučani and Gornji Milanovac).

The “gross” potential of renewable groundwater in Serbia is estimated at about 67 m<sup>3</sup>/s, rising to over 108 m<sup>3</sup>/s with the possibility of artificial recharge (DIMKIĆ *et al.* 2011). By evaluating groundwater reserves in distinguished water bodies STEVANOVIĆ & DOKMANOVIĆ (2015) concluded that total renewable resources are around 72 m<sup>3</sup>/s. If it is taken into account that Serbia consumes about 23 m<sup>3</sup>/s in terms of municipal water supply, of which about 17.5 m<sup>3</sup>/s is groundwater, it is clear that the natural renewable reserves are about four times larger than currently used. Of course, the distribution of groundwater resources is not even and there are not enough of them everywhere, but the long-term perspective of water supply is ensured for most of the active sources, including possible water transfer from rich to water poor regions.

A large number of potentially important aquifer systems have not been used and they represent a significant reserve for the future. The most significant aquifers in Serbia are in the areas of Mačva, the Sava valley up to the confluence with the Danube, the banks of the Danube up to Golubac, the Kučaj-Beljanica massif, Suva planina, Tara, the Metohija basin, the Velika Morava valley (STEVANOVIĆ, 2019).

In addition to the public water supply of Serbia, **groundwater is also captured and used for bottling**, as mineral water and low-mineralised i.e. table water. Based on the statistical data on the production and consumption of bottled natural mineral and natural spring water in the past few years, a clear growth trend can be detected. Serbia has about 40 such commercial sources of natural spring water - mineral or low-mineralised.

Regarding the **quality of groundwater**, one part of the groundwater resource is naturally protected, or is in the catchments of sparsely populated areas, while another part is directly threatened by anthropogenic activities. The karst aquifers are characterized by good quality water where chlorination is usually the only type of treatment. In contrast, the groundwater of the “Basic aquifer complex” in Vojvodina have high natural concentrations of organic matter and certain micro constituents: the content of iron ions, arsenic, and organic matter often and multiple times deviates from the prescribed maximum allowed concentrations. The area of central and northern Banat is particularly at risk, where unfavourable hydrogeochemical conditions limit the usability of groundwater.

The constant pollution of our rivers and consequently riverbanks’ groundwater is also evidenced by the fact that in Serbia there are installed capacities for the treatment of about 15% of the total discharged municipal wastewater, and that only about 6% are functioning at full capacity.

For the purposes of assessing the pressure on groundwater quality and thereby determining priority locations for monitoring STEVANOVIĆ *et al.* (2020) determined that of the total number of separated groundwater bodies (GWB) in Serbia:

- 57 GWBs are not under pressure,
- 31 GWBs are potentially under pressure,
- 3 GWBs are under pressure.

The situation regarding **groundwater monitoring** is far from satisfactory. From a spatial point of view, the stations of the state network under responsibility of the Republic Hydrometeorological Institute were formed exclusively in the alluvium of larger rivers and aquifers formed within the Quaternary deposits in Vojvodina (Fig. 7). With exception of groundwater of the intergranular type of porosity, in rocks of other type of porosity, especially karst, regardless of their importance, systematic observations in the past period were very rare, and were mostly carried out by geological organizations for the needs of specific projects (STEVANOVIĆ *et al.* 2015, 2020).

**Irrigation of agricultural land.** In Serbia, the level of use of groundwater is very small in view of the overall lack of irrigation. Given that only about 1% of farmland used to be irrigated earlier, and the fact that the numbers currently stand at only 2-3%, Serbia is placed at the very bottom of the European scale.

**The use of mineral and thermal waters** in medicine and for recreational purposes is one of the major development perspectives of Serbia. Serbia has over 200 natural sources of mineral and thermal water, and the total resources have been estimated at more than 1,000 l/s (FILIPOVIĆ & KRUNIĆ, 1995). These are high-quality water that may be used for the development of spa-, sport-, recreation- and eco-tourism; however, most of these locations require additional detailed exploration. Most of these sources are in central and southern parts of Serbia. However, their utilization is considerably smaller than in most of EU countries.

The **use of geothermal energy** as one of the most important aspects of "green" energy in Serbia has intensified, once again, after several decades of stagnation (MILENIĆ *et al.* 2011). The first identification of geothermal provinces in the territories of Yugoslavia and Serbia and the prognoses as to the possible values of the density of the terrestrial heat flow were done in the early 1980s. However, the first heat flow density chart for the territories of Serbia, Montenegro and Macedonia was published in the Geothermal Atlas of Europe (MILIVOJEVIĆ *et al.* 1995).

According to MILENIĆ *et al.* (2011) a total of 58 wells, with a total depth of about 50 km, have been drilled in the Serbian part of the Pannonian Basin from 1977 to 1988. By 1992, 45 exploration wells with a total depth of about 40 km have been drilled in other geothermal provinces. Of these, only three have been drilled to the depth of 1,800 metres, fourteen to a depth of 1,000-1,500 metres, thirteen to a depth of 500-1,000 metres, and fifteen to a depth of 300-500 metres. Most of these exploration wells have self-discharging thermal waters. Their total yield is about 500 l/s.

Serbia has numerous so-called sub-geothermal (lukewarm) water occurrences which the water temperature ranges from 10-30°C. The development of technology and the cascading heat pumps allowed the temperature to be increased to a level that enables the use of such water in the already existing heating systems. In the last few years this has resulted in increased investment in renewable energy.

Through the assessment of potentiality of subgeothermal energy of Serbia it has been concluded that, having regard to the total water reserves and the different needs of the users, approximately 20% of the available dynamic energy reserves could be exploited for energy purposes, particularly in the Central and Eastern parts of Serbia.



This is considerably higher than 4% as estimated contribution of geothermal energy in national „green energy“ sector in the Energetic strategy of the Republic of Serbia.

## CONCLUSIONS

The world today faces a series of threatening challenges, of which those with the signature of climate variations and the availability of water resources are among the most critical ones, because not only economic development and well-being, but also elementary human and animal existence depends on them. Groundwater, as part of the total water cycle and a precious natural resource, provides drinking water for about two billion people, and enables the production of the necessary food for about half of the world's population. As much as they are threatened by climate change and overexploitation on the one hand, there are such resources in the interior of the Earth that can significantly help in overcoming the aforementioned difficulties. Therefore, the theme of the World Water Day in 2022: „Groundwater: Making the Invisible Visible“ is not coincidentally chosen. And no less significant is the conclusion of the World Bank: “Groundwater can do much in adapting to climate change: Its widespread availability and typically large volumes and thus long retention time and slow response make it more naturally buffered against seasonal and inter-year variations in rainfall and temperature. Unlike surface storage, aquifers lose negligible amounts of water through evaporation and transpiration” (WORLD BANK, 2016).

There is no groundwater unlimited and everywhere. The largest part is found in intergranular and karst aquifers, with the fact that unlike surface waters, which are dominantly in humid areas, they are also widely present in arid areas. This fact makes life in those areas, otherwise mostly poor in all natural resources, tolerable. Groundwater requires systematic investigation, as well as monitoring that can prevent the negative consequences of overexploitation, but also warn of threatening pollution. Rational and sustainable use is imperative, but in some parts of the world, humanitarian water supply is also necessary, as well as occasional overexploitation, especially during prolonged droughts or the duration of natural disasters.

Serbia belongs to the group of European countries with sufficient surface and groundwater resources for long-term water supply of the population, as well as industry, energy, and agriculture. These resources, as in global level are not evenly distributed, the valleys of large river courses and mountain areas of eastern and western Serbia are the richest in water, and the areas with the poorest water are Šumadija and the South Morava basin.

It is estimated that renewable groundwater in Serbia is around 70 m<sup>3</sup>/s in an average hydrological year, and with artificial recharge potentially raise over 100 m<sup>3</sup>/s. These quantities are about four times higher than the currently used groundwater and about three times higher than the total used water (surface and underground) in communal systems. This provides a solid guarantee for the future of water supply, with the condition of water sustainable use. Unfortunately, the attitude towards groundwater is not satisfactory. For several years now, no new sources of groundwater have been opened, the existing ones are often neglected, the quality of the tapped waters is getting

weaker and insufficient efforts are being made to prevent and systematically warn and reduce geological hazards.

The potential of mineral and thermal waters, as well as geothermal energy in Serbia is high and opens perspectives for the development of spa tourism, as well as more active use of this energy resource to a much greater contribution than the 4% of total "green energy" included in national plans.

## ЛИТЕРАТУРА – REFERENCES:

- BATES B.C., KUNDZEWICZ Z.W., WU S., PALUTIKOF J .P. (eds) (2008): *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva
- BROWN L. (2012): *Full Planet, Empty Plates: The New Geopolitics of Food Scarcity*. Earth Policy Institute, W.W. New York: Norton & Co.
- BROWN L. (2013): *The real threat to our future is peak water*. The Observer, Cited 6 July 2013
- BURKE J.J., MOENCH H.M. (2000): *Groundwater and society: Resources, tensions and opportunities*, Spec ed. of DESA and ISET, UN public. st/esa/265, New York, pp. 1-170
- DIMKIĆ M., STEVANOVIĆ Z., DJURIĆ D. (2011): *Progress and improvement of the status of groundwater in Serbia*, Proceedings of IWA Specialist Groundwater Conference, Belgrade, pp. 81-101
- European Commission – Joint Research Centre, web site: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index_en)
- European Environmental Agency (1999), web site: <https://www.eea.europa.eu>
- EUROSTAT (1997), WEB SITE: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- FAO (2018): *World water resources by country*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://www.fao.org/docrep/005/y4473e/y4473e08.htm>
- FAO AQUASTAT (2017): Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/aquastat/statistics/query/index.html;jsessionid=B24526015223DE4A6837B2852C34237D>
- FETTER C.W. (1993): *Contaminant Hydrogeology*. Prentice-Hall, Incorporated, Upper Saddle River, New Jersey, USA, p. 458
- FILIPOVIĆ B., KRUNIĆ O. (1995): *Resursi, iskorišćavanje i zaštita mineralnih voda u Srbiji*. In: Stevanović Z. (ed.) *Vodni mineralni resursi litosfere Srbije*, Monografija, Pos.izd. RGF, Beograd, pp.151-164
- GUN VAN DER J. (2022): *Large aquifer systems around the world*. Published by the Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2022. p. 113, <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-020-4>
- IGRAC, WEB SITE: <https://www.un-igrac.org/>
- IPCC (2007): *Climate change 2007 – Physical science basis: Contribution of Working group I to the Fourth Assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge
- KONIKOW L.F., (2013): *Groundwater depletion in the United States (1900–2008)*: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013–5079, p. 63, <http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5079>
- MARGAT J., GUN VAN DER J. (2013): *Groundwater around the World. A geographic synopsis*. CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, p. 348
- MILENIĆ D., MILIVOJEVIĆ M., MARTINOVIĆ M., VRANJEŠ A., MAGAZINOVIĆ S. (2011): *Istraživanje, korišćenje i razvoj geotermalnih energetske resursa u Republici Srbiji*. In: *Naših 40 godina*, Pos. Izd. Dept. za hidrogeol. Rud.geol. fak., Beograd, pp. 79-115

- MILIVOJEVIĆ, M., MARTINOVIĆ, M., SIMIĆ M. (1995): *Geotermalni resursi Srbije: potencijalnost, stanje istraživanja, korišćenja i mogući planovi za budućnost*. In: Stevanović Z. (ed.) *Vodni mineralni resursi litosfere Srbije*, Monografija, Pos.izd. RGF, Beograd, pp. 133-150
- POLOMČIĆ D., STEVANOVIĆ Z., DOKMANOVIĆ P., PAPIĆ P., RISTIĆ-VAKANJAC V., HAJDIN B., MILANOVIĆ S., BAJIĆ D. (2011): *Vodosnabdevanje podzemnim vodama u Srbiji-stanje i perspektive*. In: *Naših 40 godina*, Pos. Izd. Dept. za hidrogeol. Rud.geol. fak. Beograd, pp. 45-77
- STEVANOVIĆ Z. (2011): *Menadžment podzemnih vodnih resursa*. Univerzitet u Beogradu – RGF, Beograd, p.340
- VOS – Vodoprivredna osnova Srbije (2002), Inst. Za vodoprivredu “J.Černi”, Beograd
- STEVANOVIĆ Z., RISTIĆ VAKANJAC V., MILANOVIĆ S. (2015): *Conception to set up a new groundwater monitoring network in Serbia*. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, 76:47-60
- STEVANOVIĆ Z., IURKIEWICZ A. (2009): *Groundwater management in northern Iraq*. *Hydrogeology Journal*, 17 (2): 367-378
- STEVANOVIĆ Z. (2013): *Global trend and negative synergy: Climate changes and groundwater over-extraction*. Proceedings of the International Conference “Climate Change Impact on Water Resources”, 17-18 Oct.2013, Institute of Wat. Manag. J.Cerni & WSDAC, Belgrade, pp.42-45
- STEVANOVIĆ Z., DOKMANOVIĆ P. (2015): *Projekat proširenja mreže stanica podzemnih voda*, fondovska dokumentacija RGF, Beograd
- STEVANOVIĆ Z. (2016): *Creating environmental impact indicators in dynamic karst system – Dinaric karst case example*, In: Stevanović Z., Kresic N., Kukuric N. (eds.) *Karst Without Boundaries*, CRC Press/Balkema, EH Leiden; Taylor & Francis Group, London, pp. 287-310
- STEVANOVIĆ Z., RADIĆ Z., RISTIĆ VAKANJAC V. (2016): *O potrebi sistematskih primenjenih hidrogeoloških i inženjersko-geoloških istraživanja u kontekstu održivog razvoja Srbije*. *Zapisi SGD za 2016, Jubilarna sveska*, Beograd, pp. 79-110
- STEVANOVIĆ Z. (2018): *Karst aquifers in the arid world of Africa and Middle East: Sustainability or humanity?* In: Younos T., Scheriber M., Kosič Ficco K. (eds.) *Karst Water Environment: Advances in Research, Management and Policy*, *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 68, Springer, Cham, pp. 1-43
- STEVANOVIĆ Z. (2019): *Procena rizika od nestašice vode za piće u Srbiji*. In: Cvetković V. (ed.) *Geohazard u Srbiji u 21. veku – Znanje je najbolji bedem protiv stihije*, Pos. izd. SANU – Cilus predavanja, knj. 5, Beograd, pp. 25-44
- STEVANOVIĆ Z. (2019): *Karst waters in potable water supply: a global scale overview*. *Environ Earth Sci* 78: 662, doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9
- STEVANOVIĆ Z., PETROVIĆ B., MARINOVIĆ V., VASIĆ LJ., MILANOVIĆ S. (2020): *Operativni monitoring podzemnih voda Srbije – koncept, rezultati i predlog integracije u postojeću mrežu*. *Vodoprivreda*, 0350-0519, Vol. 52 (2020) No. 303-305, pp. 69-80
- UNESCO-IHP (2008): *Groundwater resources assessment under the pressures of humanity and climate changes (GRAPHIC) framework document*. UNESCO. PARIS, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000163172>
- UN WATER (2018), WEB SITE: <http://www.unwater.org/water-facts/scarcity/>
- WORLD BANK GROUP (2016): *High and dry: Climate change, water, and the economy*. World Bank, Washington, DC. © World Bank. License: CC BY 3.0 IGO. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23665>
- ZEKTSER, S.I., EVERETT, G.L. (2004) *Groundwater resources of the world and their use*. IHP-VI, Series on Groundwater No.6. UNESCO, Paris, p. 346.

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les année 2022*

*REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022*

Beograd, 2023

Драгољуб Бајић<sup>1</sup>  
Dragoljub Bajić<sup>1</sup>

## РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА ОДВОДЊАВАЊА ПРИМЕНОМ „FUZZY-MCDM“ МЕТОДА ПРИ ИНЖЕЊЕРСКО- ГЕОЛОШКИМ ИСТРАЖИВАЊИМА

## SOLVING DEWATERING PROBLEMS USING FUZZY MCDM METHODS FOR ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД - PAPER

**Апстракт:** Проблематика одвођавања приликом управљања подземним водама има посебан значај код хидротехничких објеката, приобаља, мелиоративних подручја, насеља и рудника. Стратегија решавања проблема одводњавања представља значајан сегмент у менаџменту подземних вода, без којих би функционалност ових објеката и подручја била доведена у питање. Решавање проблема одводњавања применом „FUZZY-MCDM“ метода представља интердисциплинаран приступ који доводи до креирања алгорита за избор ефикасног и оптималног пројектованог алтернативног решења код плана управљања одводњавањем. Пројектовање планова одводњавања се врши у три фазе. У првој фази, примењују се нумеричке прогнозне симулације којима се креирају планови одводњавања. У другој фази, врши се анализа и дискусија критеријума који утичу на одлуку приликом избора оптималног плана одводњавања. Крајња фаза алгорита подразумева вишекритеријумско одлучивање, односно врши се извођење математичких оптимизационих прорачуна и доношење коначне одлуке о избору одрживог плана управљања одводњавањем. У том смислу, знање експерта игра кључну улогу код креирања „FUZZY-MCDM“ модела, односно оцењивања и поређења парова елемената математичких матрица, где се разматрају инжењерско-геолошки параметри. Целокупан процес извођења операција према алгоритму за креирање планова одводњавања чини холистички систем.

**Кључне речи:** планови управљања подземним водама, прогнозне нумеричке симулације, знање експерта, холистички систем, fuzzy оптимизација

**Abstract:** Dewatering as part of groundwater management is especially important in cases that involve hydraulic structures, coastal and riparian areas, land improvement activities, human

---

<sup>1</sup> Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет  
University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology  
e-mail: dragoljub.bajic@rgf.bg.ac.rs

settlements, and mines. A dewatering strategy is an important segment of groundwater management, without which the functionality of facilities and areas might be threatened. Solving dewatering problems by the Fuzzy-MCDM method is an interdisciplinary approach aimed at creating an algorithm for the selection of an efficient and optimal designed alternative solution for the dewatering management plan. The design of dewatering plans comprises three stages. The first stage involves numerical predictive simulations to create alternative dewatering plans. The criteria that affect decision-making associated with the selection of the optimal dewatering plan are analyzed and discussed in the second stage. The final stage of the algorithm includes multicriteria decision making or, in other words, mathematical optimization calculations and the selection of a sustainable dewatering management plan. In this regard, expert judgment plays a key role in the creation of the Fuzzy-MCDA model - evaluation and pairwise comparison of elements of the mathematical matrices, where engineering-geology parameters are considered. The entire process of algorithm operations for the creation of dewatering plans represents a holistic system.

**Key words:** groundwater management plans, predictive numerical simulations, expert judgment, holistic system, fuzzy optimization

## УВОД

Предментни рад је проистекао из истраживања која су изведена током израде докторске дисертације (Бајић, 2015). Специјалистички сегмент односи се на примену fuzzy логике у хидродинамичкој анализи за потребе пројектовања система одбране од подземних вода, односно креирање стратегија одводњавања за различите случајеве. Све примењене методе представљају један целовит систем, представљен јединственим алгоритмом, који је развијен том приликом, са наглашеним интердисциплинарним приступом код решавања заштите подручја од подземних вода (урбаног, пољопривредног, индустријског, рудничког).

Укратко, заштита од подземних вода и план одводњавања је неопходан код свих терена чији се радови врше испод коте нивоа подземних вода. Да би се вршило обарање нивоа подземних вода и како би се стекли повољни услови за рад, потребан је план одводњавања, односно оптималан дренажни систем. Дренажни систем чине његови елементи - хидрогеолошки, хидротехнички или рударски објекти. Њима се врши обарање нивоа подземних вода испод радне етаже или се врши спречавање кретања подземних вода. С једне стране, планови одводњавања предвиђају избор шеме распореда дренажних објеката у плану и профилу. С друге стране, подразумевају и временски редослед извођења дренажних објеката у садејству са динамиком инжењерских радова који се врше на неком подручју.

У насељеним местима, високи нивои подземних вода могу угрожавати стамбене објекте или утицати неповољно на геомеханичке карактеристике тла, па се јављају његове деформације у виду рушења или слегања, а такође и активирања процеса клижења код тла која имају те предиспозиције. Исти је случај и код хидротехничких објекта. На мелиоративним подручјима високи нивои подземних вода доводе до засићења тла водом и тиме угрожавају усеве.

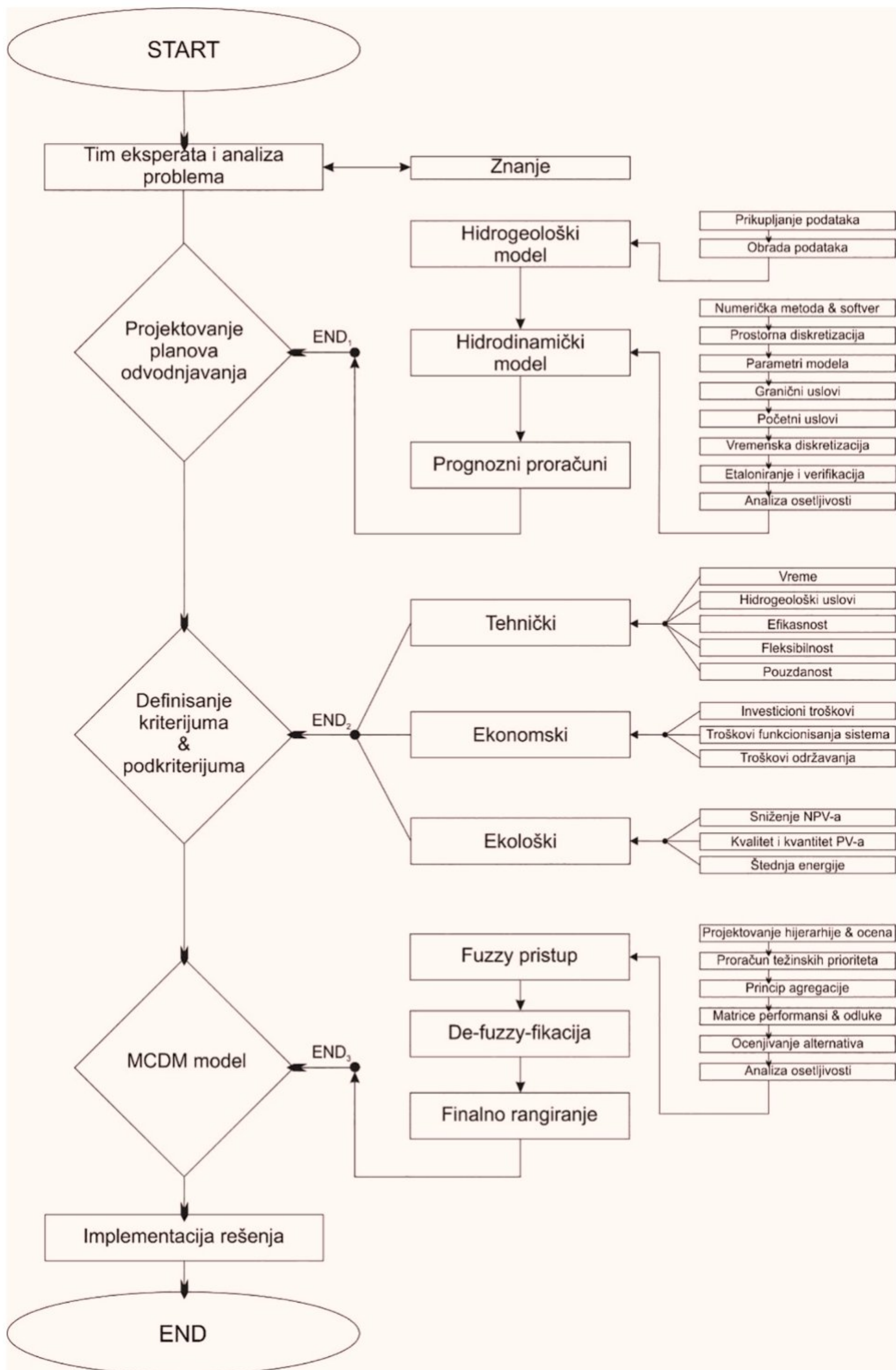
При инжењерско-геолошким истраживањима, експерти се суочавају са проблемима који настају приликом његове идентификације у геолошком и хидрогеолошком смислу. Успешно креирање планова одводњавања захтева поседовање знања из различитих дисциплина које се односе на област геологије, пре свега хидрогеологије, а потом и динамике подземних вода, хидрологије, механике стена, израде бунара и осталих дренажних објеката, затим хидротехнике, као и из области рударства.

Парцијални приступ решавања ове проблематике најчешће не доводи до ефикасног, односно, до оптималног решења и избора једне од више креираних планова одводњавања. Интеграцијом различитих фактора који подразумевају техничке карактеристике система којим се врши одводњавање, утицаје на животну средину и економске критеријуме, могуће је свеобухватније сагледати предметну проблематику. Универзалне факторе који имају утицај на карактеристике планова одводњавања у менаџменту подземних вода, приказани су у раду Бајић *et al.* (2017).

Примену концепта fuzzy логике, научно заснованог приступа који користи искуство и интуицију стручњака представио је Zadeh (1965). Оваквим приступом, проблеми неизвесности, неодређености и непрецизности се превазилазе. Ако се анализирају елементи вишекритеријумског модела, они не морају бити описати тачним нумеричким вредностима. Неструктурирана хеуристичка тврђења и знање експерата се описују лингвистичким изразима, а који могу да се кодирају у математички алгоритам. Другим речима, остварује се веза између човековог природног језика и нумеричких података које користи рачунар коришћењем неке од преферентних класичних скала (Saaty, 1977; Saaty, 1980; Lootsma, 1988), односно фазификованих скала (Zhu et al.; 1999; Lamata, 2004; Tolga et al., 2005). Chang (1996) је заслужан за прво представљање методе по којој се врши оптимизација путем fuzzy аналитичко хијерархијског процеса помоћу троугаоних fuzzy бројева и „FAHP“ скале. Методологију је додатно усавршио и развио Deng (1999). „FUZZY-MCDM“ модел је израђен у наменски развијеној апликацији „Fuzzy-GWCS“ (Бајић, 2015).

## **МЕТОДОЛОГИЈА**

Како је приказано на слици 1, развијени алгоритам се састоји генерално из 3 целине. Знање, искуство, субјективне процене и интуиција експерата битно утичу на све три дела од којих се састоји алгоритам, односно пројектовање плана одводњавања и решавање проблема заштите од подземних вода.



Слика 1. Алгоритам холистичког приступа за креирање одрживог плана одводњавања

Први део алгоритма представља пројектовање планова одводњавања. На самом старту, то се односи на успостављање адекватног хидрогеолошког (концептуалног) модела, а затим и нумеричког модела (избор нумеричке методе и софтверског кода за моделирање, избор просторне дискретизације, унос параметара модела, постављање граничних услова, постављање почетних услова, избор временске дискретизације) и на крају креирање и анализу варијантних решења система одбране од подземних вода на калибрисаном и верификованом нумеричком моделу, уз помоћ прогнозних хидродинамичких прорачуна, односно симулација. На језику вишекритеријумске оптимизације, овај поступак представља креирање алтернативних решења - планова одводњавања. Такође, нумеричко моделирање и прогнозне симулације омогућавају анализу ефеката свих предложених планова, као и разлике између тих добијених решења.

Други део алгоритма односи се на поставку и анализу критеријума који утичу на оптималну одлуку приликом избора плана одводњавања. Овај креативни поступак представља један од најважнијих делова целокупног процеса одлучивања. За потребе пројектовања планова одводњавања издвојена су три критеријума (технички - ТЦ, економски - ЕЦ, еколошки - ЕН), а у оквиру којих се издвајају 11 подкритеријума: време, прилагођеност хидрогеолошким условима, ефикасност, флексибилност, поузданост; инвестициони трошкови, трошкови функционисања система, трошкови одржавања; опадање нивоа подземних вода, квалитет и количина исцрпљених вода и штедња енергије (Бајић et al., 2015).

Трећи део алгоритма односи се на креирање „MCDM“ модела и примену апликације „Fuzzy-GWCS“, коју је аутор развио. Уопштено, оптимизациони модели помажу у процесу одлучивања, омогућајући експерту да повеже све податке и релације у датој ситуацији, а резултат тога треба да омогући избор оптималне алтернативе, савлађујући све комплексности постављеног задатка. Постоји велики број метода вишекритеријумске оптимизације којима се решавају проблеми доношења одлука о оптималном решењу постављеног проблема. Баш због те чињенице, овај део алгоритма може да се модификује. Због превазилажења поменутих проблема који се односе на непрецизност, неодређеност и неизвесност при инжењерско-геолошким истраживањима, врши се израда „Fuzzy-MCDM“ модела. Процедурама као што су фазификација и извођење математичких оптимизационих прорачуна, а затим дефазификација и рангирање алтернативних решења, доноси се оптимална одлука о плану одводњавања. Детаљно креирање „Fuzzy-MCDM“ приказано је у неколико корака.

1) Пројектовање хијерархије проблема и оцењивање. Пројектовање хијерархије се односи на идентификацију нивоа (циљ - критеријуми - подкритеријуми - под-подкритеријуми - ... – алтернативна решења). Одводњавање представља циљ, а да би се изабрало оптимално алтернативно решење, односно план одводњавања врши се анализа критеријума и подкритеријума. Затим, оцењивањем и поређењем парова, дефинишу се елементи следећих матрица: постављених критеријума (једначина 1), постављених подкритеријума (једначина 2) и добијених алтернативних решења (једначина 3):



$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где су  $a$  елементи матрице;  $a_{ij} = 1$  за све  $i = j$ , ( $i, j = 1, 2, \dots, m$ ) и  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$

$$A_j = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k_j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_j1} & a_{k_j2} & \dots & a_{k_jk_j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

где се анализирани критеријум  $C_j$  састоји од  $k_j$  подкритеријума

$$Y_k = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

где су  $N$  алтернативна решења у односу на сваки од  $K$  подкритеријума;  $k = 1, 2, \dots, K$ .

2) Рачунање вредности вектора тежинских приоритета (једначина 4) за дефинисане матрице подкритеријума. Врши се преко утврђених математичких поступака - „fuzzy extent analysis“ и обрасца за одређивање „fuzzy synthetic extent“ вредности (Chang, 1996):

$$w_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \otimes \left[ \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m a_{kl} \right]^{-1} \quad (4)$$

где је  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Израчуната вредности „тежина“ ( $w_i$ ) се потом нормализују. За те сврхе се препоручује „extension principle“ (Zadeh, 1975) јер се знатно смањује неизвесност (Deng, 1999). Применом једначина 5 и 6 и 7, рачунају се вредности вектора тежинских приоритета на та два нивоа у хијерархији:

$$w'_j = \left( \sum_{l=1}^{k_j} a_{il} \otimes \left[ \sum_{i=1}^{k_j} \sum_{l=1}^{k_j} a_{il} \right]^{-1} \right) \otimes w_j \quad (5)$$

где је  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $p = 1, 2, \dots, k_j$

$$W = \left( w_1^1, w_1^2, \dots, w_1^{k_1}; w_2^1, w_2^2, \dots, w_2^{k_2}; \dots; w_j^1, w_j^2, \dots, w_j^{k_j}; \dots; w_m^1, w_m^2, \dots, w_m^{k_m} \right) \quad (6)$$

где су  $W$  тежине подкритеријума са укупном „дужином  $K$ “

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_K). \quad (7)$$

Слично, код дефинисаних матрица које приказују оцењивање алтернативних решења, следи поступак у ком се опет врши „fuzzy extent“ анализа. Одређивање оцене перформанси алтернатива  $V_i (i=1, 2, \dots, N)$  у односу на  $j$  подкритеријума ( $j=1, 2, \dots, K$ ) се израчунава преко једначине 8:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^K a_{ik} \otimes \left[ \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N a_{lm} \right]^{-1} \quad (8)$$

где су  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $j = 1, 2, \dots, K$ .

3) Имплементирање принципа агрегације. Овим поступком се врши агрегација нивоа критеријума и подкритеријума, односно “брисање” једног нивоа из хијерархије, и њихово постављање у јединствени ниво. То значи ако је  $k_j$  број подкритеријума у односу на  $j$ -ти критеријум, укупан број подкритеријума је дефинисан једначином 9, а резултат се приказује у виду финалних “тежина” подкритеријума:

$$K = \sum_{j=1}^m k_j \quad (9)$$

4) Дефинисање fuzzy матрице одлуке и fuzzy матрице перформанси математичким операцијама. Fuzzy матрица одлуке (10) се рачуна помоћу „fuzzy extent“ анализе за алтернативе, док се укупни учинак сваког алтернативног решења за све анализиране подкритеријуме рачуна и представља fuzzy матрицом перформанси (11):

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{NK} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Z = \begin{bmatrix} x_{11} \otimes W_1 & x_{12} \otimes W_2 & \dots & x_{1K} \otimes W_K \\ x_{21} \otimes W_1 & x_{22} \otimes W_2 & \dots & x_{2K} \otimes W_K \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} \otimes W_1 & x_{N2} \otimes W_2 & \dots & x_{NK} \otimes W_K \end{bmatrix} \quad (11)$$

5) Вредновање пројектованих алтернативних решења. Математичким операцијама које се користе код fuzzy скупова, применом једначине 12, рачунају се коначне вредности оцена сваког плана одводњавања. Резултате представљају троугаони fuzzy бројеви:

$$F_i = \sum_{j=1}^K x_{ij} \otimes W_j \quad (12)$$

6) Анализа осетљивости пројектованих алтернативних решења. Упоредо са процесом вредновања пројектованих алтернативних решења, коришћењем једначине 13, која изражава став експерта према ризику (Liou & Wang, 1992; Kwang & Lee, 1999), врши се анализа осетљивости рачунањем параметра „the total integral value“:

$$I = \frac{(d\lambda + s + (1-\lambda)l)}{2}, \quad \lambda \in [0,1] \quad (13)$$

где је  $\lambda$  - оптимизациони индекс („0“ за песимистички став експерта, „1“ за оптимистички став, а „0.5“ се користи као умерена вредност); л, с и д чине параметре који представљају троугаони fuzzy број.

У кораку дефазификације, вредност оцене сваког алтернативног решења плана одводњавања се неком од метода дефазификације (Van Leekwijck & Kerre, 1999) преводи из fuzzy броја у реалан број. Збир вредности оцена, које је прорачунао експерт, свих алтернативних решења је једнак броју један („1“). Након тога следи рангирање и анализа осетљивости. Оптималан план одводњавања чини пројектовано алтернативно решење, односно дренажни систем, који носи највишу вредност оцене.

Имплементација решења је последњи корак. Експерти синтетизују целу спроведену анализу, развијену према алгоритму, у детаљан извештај. На тај начин, добија се план са унапред дефинисаним активностима које требају да се спроведу у будућности на подручју које треба заштитити од подземних вода. Имплементација решења захтева врло одговоран и озбиљан приступ, преданост пројектног тима и подршку менаџмента, што поново доводи до наглашавања чињенице да знање експерта игра веома важну улогу у целом процесу алгоритма.

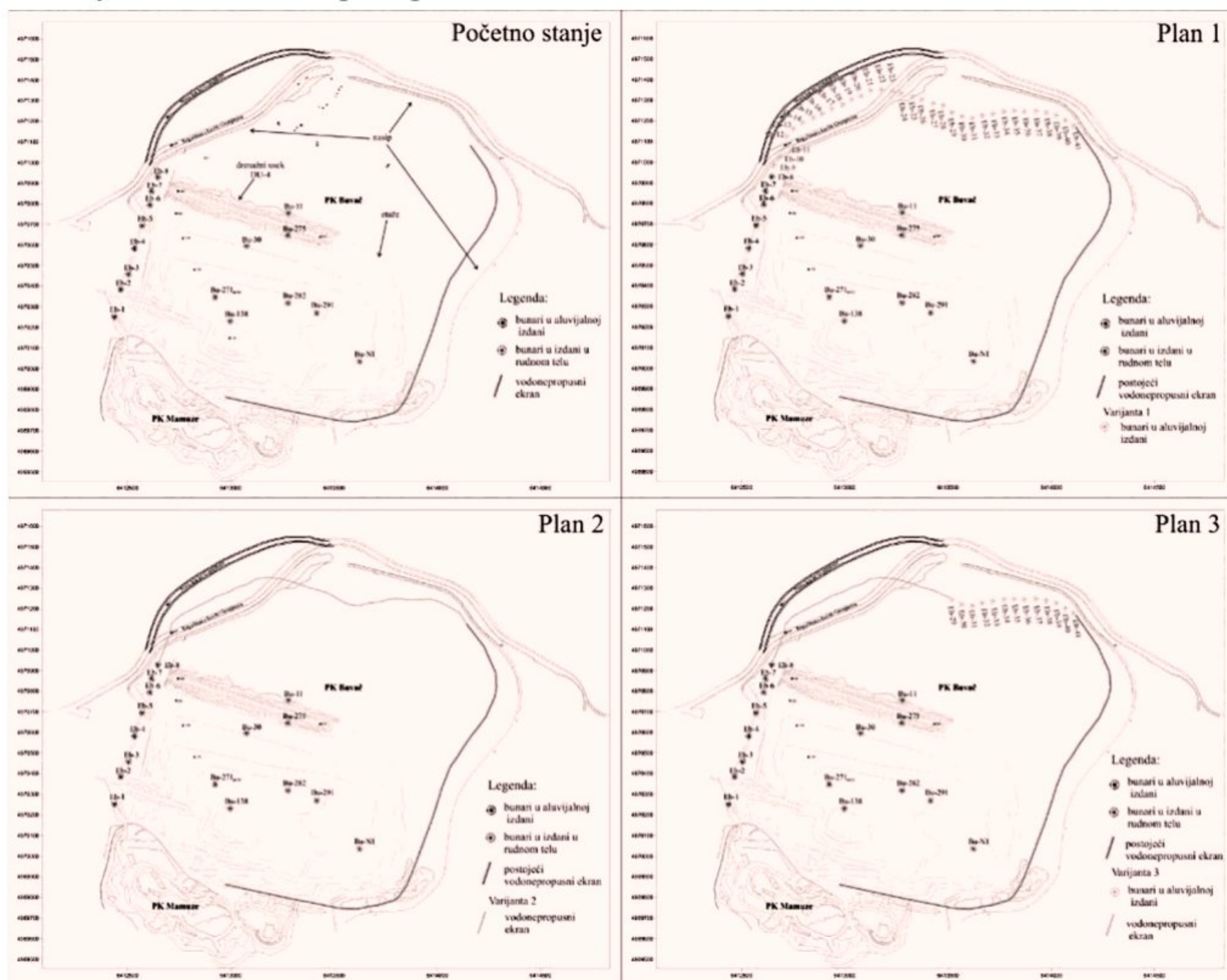
## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Приказ решавања проблема одводњавања и заштите од подземних вода, аутор је приказао у неким изабраним радовима (Бајић & Поломчић, 2014; Бајић et al., 2017; Бајић et al., 2017а; Бајић & Поломчић, 2019; Бајић & Поломчић, 2020).

У циљу приказа развијеног алгоритма за одређивање оптималног плана одводњавања и решавања проблема везаних за одбрану од подземних вода, истраживањима је био обухваћен терен лимонитског рудног лежишта „Бувач“, који се налази у Босни и Херцеговини. Решење плана одводњавања односи се на спречавање прилива подземних вода у рудник из алувијалне издани (са северне границе) и дренажање подземних вода из издани у рудном телу. Као примарни

критеријум код пројектовања плана, задато је да обарање нивоа подземних вода у рудном телу, мора бити 15 м испод коте радне етаже. То чини један од предуслова за несметане рударске активности.

Сходно првом делу алгоритма, пројектована су три алтернативна плана одводњавања (слика 2). Разлике су засноване на карактеристикама дренажног система, и то примарно из алувијалне издани, а односе се на врсту, број и динамику рада (укључење и искључење) свих елемената система. Постојећи дренажни објекти који су коришћени за предодводњавање представљају почетно стање за прогнозне симулације. Они нису занемарени, већ су у функцији целокупног система дренарања.



Слика 2. Планови одводњавања површинског копа „Бувач“

Према плану 1, у односу на почетно стање, додају се нова 33 бунара (Еб-9, ... , Еб-41) поред 8 постојећих на северном делу контуре површинског копа, који су коришћени за предодводњавање. Укупни капацитет бунара је 107 Л/с.

Према плану 2, уместо 33 дренажна бунара, израђује се водонепропусни екран на истом месту. Дужине је 1857 м, а дубина се креће до подине алувијалних наслага, са усецањем 1 м у глиновито-прашинасте насlage. Његова улога се огледа у спречавању прилива подземних вода из правца измештеног корита реке Гомјенице (север).

Према плану 3, спречавање прилива подземних вода у рудник и дренарање се врши комбинацијом дренажних бунара и водонепропусног екрана.

Водонепропусни екран се изграђује у северозападном делу рудника, где је завршна контура рудника најближа речном току Гомјенице, односно, у наставку бунара Еб-8. Дужине је 1143 м и сачињен је од истог материјала, који је предходно описан. У наставку водонепропусног екрана израђују се 13 дренажних бунара (Еб-29, ... , Еб-41) укупног капацитета од 65 Л/с.

Сходно другом делу алгоритма, за приказане и дефинисане критеријуме и подкритеријуме, врши се њихова анализа у складу са проблемом прављења плана одводњавања на руднику „Бувач“. Уопштено, напоменуће се неколоко чињеница. Што се тиче техничких критеријума, временски пресеци су дефинисани унапред, као и времена укључења и искључења појединих објеката дренажног система. Током прогнозних прорачуна, симулирани су ефекти рада различитих дренажних објеката, за ту врсту хидрогеолошке средине, са сврхом што ефикаснијег одводњавања лежишта и евентуалном могућности измене техничких карактеристика целокупног система у смислу дренажања вода и смислу обезбеђивања сигурности на раду у руднику. Што се тиче економских критеријума, највећу економску вредност имају водонепропусни екрани, у погледу инвестиционих трошкова, а дренажни бунари у погледу трошкова функционисања система. Поређењем те две врсте објеката, бунари захтевају економске трошкове чија је последица утрошак електричне енергије за рад пумпи, периодична замена бунарских пумпи или поправка, а затим и регенерација бунара. То није случај код водонепропусних екрана. Што се тиче еколошких критеријума, прорачунати су нивои подземних вода, односно депресије, имајући у виду различите дренажне објекте за сваки пројектовани план. С друге стране, квантификоване су и количине дренажних вода за сва три плана. Принцип штедње енергије, као битне ставке у екологији, у овом случају се огледа у томе да су бунари са пумпама велики потрошачи електричне енергије, док водонепропусни екрани, као физички објекти који представљају баријеру подземним водама, не користе те ресурсе.

Сходно трећем делу алгоритма, извршена је експортација резултата оптимизационих прорачуна спроведених у апликацији „Fuzzy-GWCS“. Улазне елементе у апликацији „Fuzzy-GWCS“ представљају нумеричке вредности лингвистичких варијабли, које су дефинисане у виду троугаоног фуззу броја.

Рачунским операцијама, у „позadini“, између више „layers“ који чине апликацију „Fuzzy-GWCS“, формира се fuzzy матрица одлуке и дефинишу се вредности матрице укупног учинка сваког пројектованог алтернативног решења. Вредности коначних оцена у виду троугаоног fuzzy броја срачунате су и приказане у табели 1. Резултати анализе осетљивости дати су такође у табели за сваки план у виду распона вредности оцена везаних за оптимистички, песимистички и неутралан став експерта. Последњим корацима алгоритма, односно дефазификацијом су fuzzy бројеви генерисани у не-fuzzy бројеве. Оцене у виду класичних реалних бројева су приказане у табели 1.

Сходно приказаном, оптималну варијанту плана, пројектованог за рудник „Бувач“, чини алтернативно решење број 2. На другом месту налази се план број 3, а најнеповољније решење односи се на план 1.

Табела 1. Рангирање пројектованих алтернативних решења планова одводњавања

Планови одводњавања	Fuzzy број			Реални бројеви			Финално рангирање
				$\lambda=1$	$\lambda=0.5$	$\lambda=0$	
	Анализа осетљивости						
П-1	0.066	0.309	1.684	<b>0.270</b>	<b>0.277</b>	<b>0.321</b>	3
П-2	0.066	0.390	2.457	<b>0.386</b>	<b>0.387</b>	<b>0.390</b>	1
П-3	0.037	0.301	2.233	<b>0.344</b>	<b>0.336</b>	<b>0.289</b>	2

## ЗАКЉУЧАК

Рад приказује савремен приступ проблематици истраживања у научној области гео-наука и менаџмента подземних вода. Специфичност алгорита се огледа и у постављеним критеријумима и њиховим подкритеријумма, који су могу сматрати универзалним за све планове одводњавања. Веома битна чињеница се односи на могућност примене само појединих делова алгорита, или измену његових делова. То се највише огледа у трећем делу алгорита и могућност замене неке друге методе fuzzy оптимизације која се примењује приликом доношења одлуке.

За потребе доношења одлуке приликом развоја FUZZY-MCDM модела, развијена је и наменска апликација „Fuzzy-GWCS“. Уз помоћ ове апликације, уношењем оцена и поређеном парова који су сачињени од хијерархијског низа „критеријуми-подкритеријуми-алтернативна решења“, обимни математички прорачуни су поједностављени и може се лако пратити осетљивост модела на промену улазних параметара.

Кључна ставка и посебно наглашена је примена знања, интуиције и искуства експерата приликом истраживања како би се стекле све информације о природном систему рудника. То се протеже и кроз остале кораке алгорита, у којима се пројектанти планова одводњавања сусрећу са проблемима који се могу, релативно са лакоћом, решити применом хеуристике.

Сprovedено истраживање указује на неопходност интердисциплинарног приступа код различитих проблема у науци. Приказаним алгоритмом, то се односи и на проблеме одводњавања различитих терена и објеката. Развијени комплексни интердисциплинарни алгоритам доприноси квалитетном и одрживом управљању проблематиком заштите од прилива подземних вода. Овакав интегрисани приступ креирања оптималног плана, верификованим на изабраном примеру, има изражен практичан значај у решавању проблематике дренажа угрожених подручја од подземних вода.

## ЗАХВАЛНИЦА

Аутор се захваљује Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије за пружање подршке научно-истраживачкој делатности,

неопходној за напредак друштва заснованог на знању. Посебну захвалност дугујем рецензенту, Проф. др Тини Дашић, која је уложила своје време и труд и тиме допринела унапређењу квалитета публикације.

## ЛИТЕРАТУРА

- Bajić D. (2015). Fuzzy optimization in the hydrodynamic analysis for the purposes of groundwater control system design). Ph.D. thesis, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, 296 pp.
- Bajić D., Polomčić D. & Močević J. (2015). Factors that influence the selection of an optimal groundwater protection system at open-pit mines. Proceedings of the VII International Conference “Coal 2015”, Zlatibor, Serbia, 14-17 October 2015; Pavlović V, Eds.; Yugoslav Opencast Mining Committee: Belgrade; pp. 9-16. ISBN: 978-86-83497-22-5
- Bajić D. & Polomčić D. (2014). Fuzzy optimization in hydrodynamic analysis of groundwater control systems: Case study of the pumping station “Bezdan 1”, Serbia. *Geološki anali Balkanskoga poluostrva*, 75: 103-110. DOI: 10.2298/GABP1475103B ISSN: 0350-0608
- Bajić D. & Polomčić D. (2019). Development of the algorithm of the fuzzy optimization in the hydrodynamic analysis for the purposes of groundwater control system design. *Tehnika*, 70(4): 527-536. DOI: 10.5937/tehnika1904527B
- Bajić D. & Polomčić D. (2020). How to make a sustainable dewatering management plan? In Mihajlović D. & Đorđević B. (Eds.), Proceedings of the 10th International Symposium on Natural Resources Management, Zaječar, Serbia, 26 September 2020, pp. 98-104. Zaječar: Faculty of Management, Zaječar, Megatrend University, Belgrade. ISBN 978-86-7747-624-3
- Bajić D., Polomčić D. & Ratković J. (2017). Multi-criteria decision analysis for the purposes of groundwater control system design. *Water Resources Management*, 31(15): 4759-4784. DOI: 10.1007/s11269-017-1777-4
- Bajić D., Polomčić D., Ristić Vakanjac V., Ratković J. & Čokorilo Ilić M. (2017a). Application of the VIKOR and FAHP multi-criteria optimisation methods for choosing the optimal groundwater control system: case of pumping station Bezdan 1 (Serbia). Proceedings of the national conference with international participation „Geosciences 2017“, Sofia, Bulgaria, 07-08 December, 2017; Yotzo Y., Ed.; Bulgarian Geological Society: Sofia; pp. 131-132. ISSN: 1313-2377
- Chang D.Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95: 649-655.
- Deng H. (1999). Multicriteria analysis with fuzzy pair-wise comparison. *International Journal of Approximate Reasoning*, 21: 215-231.
- Kwang H.C. & Lee H.J. (1999). A method for ranking fuzzy numbers and its application to decision making. *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, 7(6): 677-685.
- Lamata M.T. (2004) Ranking of alternatives with ordered weighted averaging operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 19: 473-482.
- Liou T.S. & Wang M.J.J. (1992). Ranking fuzzy numbers with integral value. *Fuzzy Sets and Systems*, 50(3): 247-256.
- Lootsma F.A. (1988). Numerical scaling of human judgment in pairwise-comparison methods for fuzzy multi-criteria decision analysis, *Mathematical Models for Decision Support. Computer and System Sciences, NATO ASI Series*, 48: 57-88.
- Saaty T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15: 234-281.
- Saaty T.L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, 287 pp. New York: McGraw-Hill.

- Tolga E., Demircan M. & Kahraman C. (2005). Operating system selection using fuzzy replacement analysis and analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, 97: 89-117.
- Van Leekwijck W. & Kerre E. E. (1999) Defuzzification: criteria and classification. *Fuzzy Sets and Systems* 108(2):159-178
- Zadeh L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3): 338–353.
- Zadeh L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information sciences*, 8: 199-249.
- Zhu K., Jing Y. & Chang D. (1999). A discussion on extent analysis method and applications of fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 116: 450-456.



# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les années 2022

REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022

Beograd, 2023

Катарина Брадић-Милиновић<sup>1</sup>, Werner Schwarzhans<sup>2</sup>

## ОТОЛИТИ *IN SITU* СА ТЕРИТОРИЈЕ СРБИЈЕ (СТРАТИГРАФСКИ, ПАЛЕОЕКОЛОШКИ И ПАЛЕОГЕОГРАФСКИ ЗНАЧАЈ)

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД - PAPER

**Апстракт-** У овом раду је приказан до сада публиковани материјал миоценских отолита *in situ* са територије Србије. Приказани материјал је прикупљен у два језерска басенска система (Бабушнички и Ваљевско-мионички), а један део материјала представља сарматску бракичну рибљу асоцијацију (стадион Црвене звезде, Београд). Најстарији материјал је из језерских седимената Бабушничког басена (јужна Србија), и потиче са три локалитета (Дучевац, Калуђарево и Раљин). Сви примерци прикупљени са ових локалитета идентификовани су у оквиру породице Ambassidae и роду *Dapalis*. Још један извор рибљих скелета са отолитима *in situ*, који такође потичу из језерских седимената, је из млађег доњег миоцена локалитета Клинци (Ваљевско-мионички басен, западна Србија). Материјал из Клинаца је сврстан у три рода са четири врсте описане у BRADIĆ-MILINOVIĆ et al. (2019): *Klincigobius serbiensis*, *Klincigobius andjelkovicae*, *Rhamphogobius varidens* и *Toxopyge campylus*. Најмлађи материјал потиче из бракичних седимената сармата с.с. са стадиона Црвене звезде Београд. Асоцијација риба са отолитима *in situ* садржи пет различитих таксона: *Paratrisopterus caspius* (у SCHWARZHANS et al., 2017a), *Aphia macrophthalma* (у SCHWARZHANS et al., 2017b), „*Scorpaena*“ *minima* (у SCHWARZHANS et al., 2017c), *Parasolea serbica* (у SCHWARZHANS et al., 2017d) и *Sarmatella doljeana* (у BAYKINA & SCHWARZHANS, 2017).

Појава различитих породица и различитих врста риба са отолитима *in situ* током миоцена са територије Србије одражава промене животне средине које су се дешавале током овог периода. На већем подручју територије Србије током старијег миоцена, преовладала је језерска средина са разноврсним слатководним рибама. Затим, током старијег средњег миоцена већи део Србије био је под утицајем мора Паратетиса (баденска морска трансгресија). Касније, током млађег средњег миоцена долази до знатнијег уноса слатке воде у такав морски басен (бракични сармат). И коначно, додатним уносом копнених вода у постојећи морско-бракични басен, услед географске изолације целог Панонског домена, већи део северне Србије је био под тзв. каспибракичним, сланкастим језером (горњи миоцен, језеро Панон). Повезујући проучавани фосилни рибљи материјал

<sup>1</sup> Геолошки завод Србије, Београд, Србија

<sup>2</sup> <sup>2</sup> Natural History Museum of Denmark, Zoological Museum, København, Denmark  
E-mail autora: [katarina.bradicmilinovic@gzs.gov.rs](mailto:katarina.bradicmilinovic@gzs.gov.rs); [wwschwarz@aol.com](mailto:wwschwarz@aol.com)

са оним из других делова Паратетиса, можемо помоћи да се разјасне палеогеографски догађаји у Паратетису током миоцена.

**Кључне речи:** отолити *in situ*, миоцен, фосилне рибе, палеоеколошки значај

**Abstract-** This paper presents the material published so far by Miocene otoliths *in situ* from the territory of Serbia. The presented material was collected in two lake basin systems (Babušnica and Valjevo-Mionica), and one part of the material represents the brackish Sarmatian fish association (Red Star Stadium, Belgrade). The oldest material belongs the lacustrine sediments of the Babušnica Basin (southern Serbia), and comes from three localities (Dučevac, Kaluđarevo and Raljin). All the specimens collected from these sites were identified within the family Ambassidae and the genus *Dapalis*. Another source of fish skeleton with otoliths *in situ*, which also originate from lake sediments, belongs the late early Miocene Klinци locality (Valjevo-Mionica Basin, western Serbia). The material from Klinци is classified into three genera with four species described by BRADIĆ-MILINOVIĆ et al. (2019): *Klincigobius serbiensis*, *Klincigobius andjelkovicae*, *Rhamphogobius varidens* and *Toxopyge campylus*. The youngest material comes from the brackish sediments of the Sarmatian s.s. from the Red Star Stadium, Belgrade. The association of fish with otoliths *in situ* contains five different taxa: *Paratrisopterus caspius* (in SCHWARZHANS et al., 2017a), *Aphia macrophthalma* (in SCHWARZHANS et al., 2017b), “*Scorpaena*” *minima* (in SCHWARZHANS et al., 2017a), *Parasolea serbica* (in SCHWARZHANS et al., 2017d) and *Sarmatella doljeana* (in BAYKINA & SCHWARZHANS, 2017).

The appearance of different families and different species of fish with otoliths *in situ* during the Miocene from the territory of Serbia reflects the changes in the environment that occurred during this period. In a larger area of the territory of Serbia during the early Miocene, the lake environment with a variety of freshwater fish prevailed. Then, during the early Middle Miocene, a large part of Serbia was under the Paratethys Sea influence (Badenian marine transgression). Later, during the late Middle Miocene there was significantly input of fresh water in this sea basin (Sarmatian s.s.). Finally, with the additional input of inland waters into marine-brackish basin due to the geographical isolation of the entire Pannonian domain, the northern part of Serbia was under the so-called caspi-brackish, saline lake (Upper Miocene, Lake Pannon). By connecting the studied fossil fish material with that from other parts of Paratethys, we can help clarify the paleogeographic events in Paratethys during the Miocene.

**Key words:** otoliths *in situ*, Miocene, fossil fish, palaeoecology

## УВОД

Миоценски седименти су широко распрострањени на територији Србије. Током трајања ове епохе, дешавале су се бројне промене, које су праћене типом седимената који су се депоновали, а самим тим и фосилном асоцијацијом у њима. Сходно томе, током старијег миоцена на територији наше земље имамо распрострањење језерских седимената. Ови седименти су настали у више језера, која су међусобно комуницирала током свог постојања; овај систем језера је у литератури познат као Српски језерски систем – SLS (KRSTIĆ et al., 2012, SANT et al., 2018). Касније, током старијег средњег миоцена (бадена) долази до трансгресије Паратетиса, па на подручју Србије долази до надирања мора, што је познато као баденска трансгресија (RÖGL, 1999). Током млађег средњег миоцена (сармата), долази до ослађивања морске воде, па током овог ката, егзистују бракични водени ентитети. Тренд ослађивања је настављен и кроз горњи миоцен, што је резултирало сменом бракичних са каспибракичним срединама. Све

промене у салинитету водених средина, прати и промена фауне риба која је у њима обитавала. С обзиром да рибе представљају у еколошком смислу веома осетљиве организме, сведоче нам о салинитету, температури, дубини, хемијском саставу (пре свега количини раствореног кисеоника), хранљивим материјама и др. водених средина које су насељавале. Разлог зашто су рибе једне од најуспешнијих сведока палеоеколошких промена је у томе што насељавају скоро комплетан батиметријски стуб. И као што је то данас познато, скоро да не постоји водена средина са живим светом коју не насељавају рибе. Такође, ако узмемо за пример SLS, и ако нађемо исту фауну риба у два језера овог система, то нам може бити поуздан показатељ о њиховој међусобној комуникацији. Ово се може пренети као модел на крупније системе, односно на регионалне језерске системе (нпр. SLS и DLS), као и на Паратетис уопште, када већ говоримо о мигративности одређених група риба, што има значаја како у стратиграфском, тако и у еволутивном смислу.

## ДИСКУСИЈА

### Горњи олигоцен/доњи миоцен

Током година су се многи аутори (ANĐELKOVIĆ, 1970; PANTIĆ, 1962; MAROVIĆ et al., 2002; MAROVIĆ et al., 2007; BRUIJN et al., 2018), бавили проблематиком старости седимената Бабушничког басена и давали им различиту старост. Стратиграфски положај велике већине језерских седимената на подручју Србије је проблематичан. Разлог за контроверзне одредбе језерских седимената је мали број података, ретка фауна и недостатак података о прецизном датовању ових седимената. Тренутно је у изради публикација која ће се детаљно бавити проучавањем фосилне фауне риба са отолитима *in situ* са три локалитета у Бабушничком басену, надамо се да ће резултати ове студије дати прецизнију стратиграфску позицију ових седимената, као и да ће дати важне палеоеколошке и палеогеографске податке за геолошка дешавања током олигоценско/миоценске границе. Такође, се надамо да ће ова студија подстаћи и друге истраживаче да се баве проблематиком старости језерских седимената.

За потребе овог рада је могуће само дати неке од општих података везаних за сам род *Dapalis*, а више података биће изнето у будућој публикацији од стране истих аутора.

Род *Dapalis* је распрострањен у слатким и бракичним водама, као и у приобалним морима јужне Азије и Аустралије (NELSON et al., 2016). Овај род је заступљен у седиментима горњег олигодена Allier-а, Француска. Такође, познао је и распрострањење овог рода и у језерским олигоценским наслагама западне Европе. Поред олигоценских наслага забележено је присуство овог рода и у олиго-миоценским наслагама околине Vichy-а, Француска (GAUDANT, 1992). Позната је и једна врста овог рода из олигоценских наслага Трансилванијског басена (REICHENBACHER & CODREA, 1999). Ова група риба спада у еурихалинске организме, суптропског до тропског палеоклимата (REICHENBACHER & CODREA, 1999).

## Млађи доњи миоцен

На простору Србије, фосилна фауна са отолитима *in situ*, пронађена је у лапорцима, млађег доњег миоцена на локалитету Клинци (Ваљевско-мионички басен). Материјал из Клинаца разврстан је у три рода са четири врсте описане код BRADIĆ-MILINOVIĆ et al. (2019): *Klincigobius serbiensis*, *Klincigobius andjelkovicae*, *Rhamphogobius varidens* и *Toxopyge campylus*. Важно је напоменути да је на територији Србије током старијег миоцена преовладавала језерска средина, односно егзистовало је неколико језера, која су у различитим периодима током свог постојања међусобно комуницирала. У литератури (KRSTIĆ et al., 2012, SANT et al., 2018) је систем ових језера познат као Српски језерски систем (SLS).

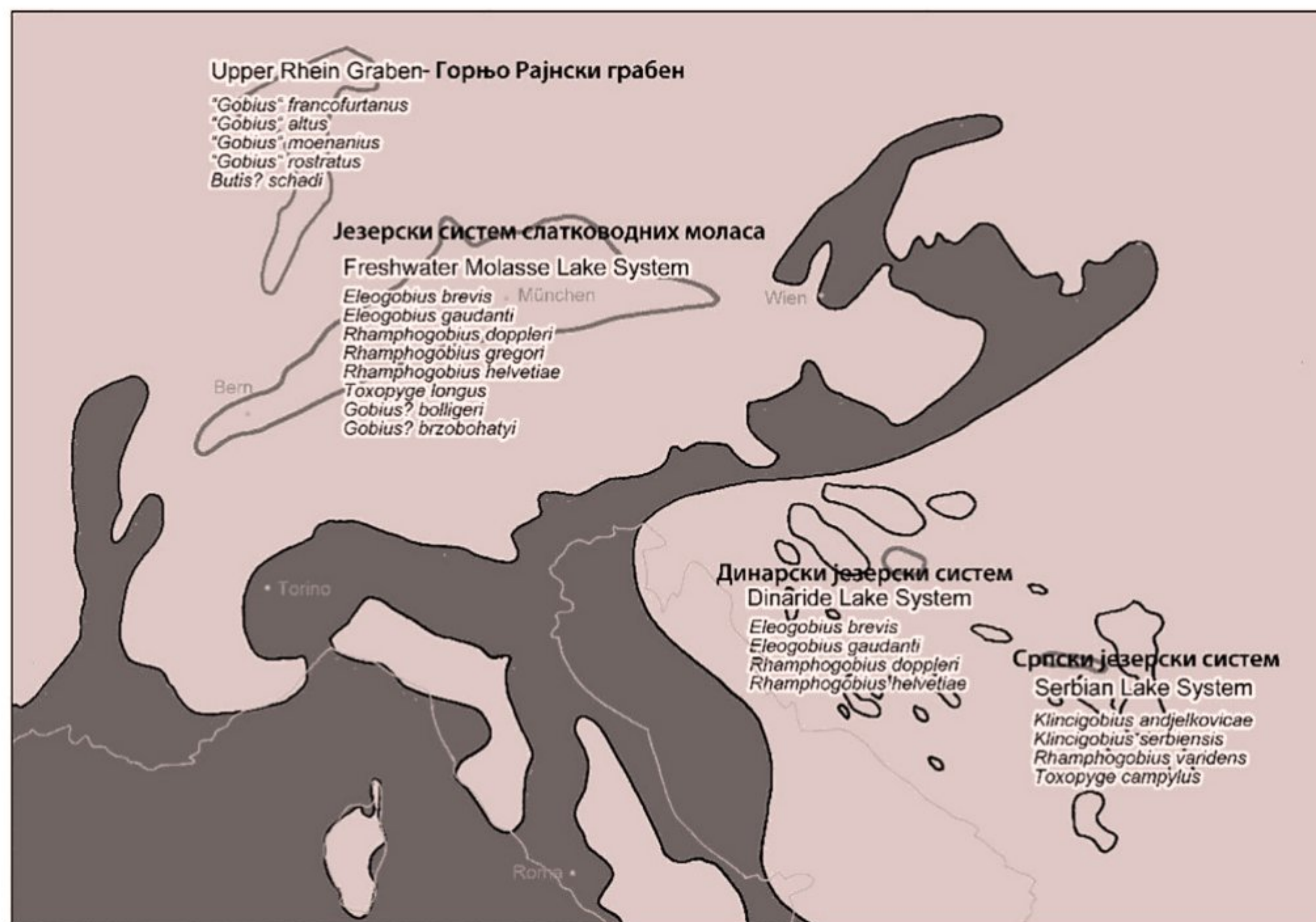
Ваљевско-мионички басен је формиран пре баденске трансгресије, односно током старијег миоцена до раног средњег миоцена (KRSTIĆ et al., 2012, SANT et al., 2018, MANDIĆ et al., 2019). На основу литературе познате су три доњомиоценске формације овог басена: пиро-битуминозна Мионичка формација, лапоровита формација Ваљева и кластична формација Табановића. Мионичка формација је богата палеофлором (LAZAREVIĆ et al., 2013) чији фосилни садржај сведочи о постојању зимзелених кишних шума, карактеристичних за суптропске средине. Осим по садржају палеофлоре седименти ове формације су познати и по садржају фосилних риба (GAUDANT, 1998). Асоцијација фосилних риба је представљена клупеидама и ципринидама. Обе ове групе фосилних риба живе у батиметријском стубу близу површине језера, где је био највећи проценат раствореног кисеоника у води (BRADIĆ-MILINOVIĆ et al., 2019). Важно је напоменути да су циприниди група типичних стенохалинских слатководних риба. Ова чињеница је веома важна јер употпуњује палеоеколошку слику овог језера. На основу бројних студија (JOVANOVIĆ et al., 1994; ŠAJNOVIĆ et al., 2009; BRADIĆ-MILINOVIĆ et al., 2019) ово језеро је било мало и затворено са слабом хоризонталном циркулацијом и анаеробном средином, што је резултирало таложењем уљних шкриљаца у оквиру ове формације.

За разлику од Мионичке формације, формација Ваљева се карактерише бољом циркулацијом воде и већим процентом кисеоника у њој. Овакве промене у палеоеколошком окружењу су пропраћене и другачијим типом фосилне фауне риба. Наиме, за разлику од претходне формације у седиментима ове формације је присутна асоцијација бентоских риба, које припадају фамилији Gobiidae. На основу утврђене велике бројности гобида у фосилном запису ових седимената, а у исто време потпуног одсуства епипелашке рибље фауне, могло би се претпоставити да је дошло до недостатка кисеоника, који је утицао само на бентоске рибе, које су осетљива на овакве варијације (BRADIĆ-MILINOVIĆ et al., 2019).

Како би се што боље разумели стратиграфско-палеоеколошки услови током доњег и млађег доњег миоцена на овим просторима, важно је дати кратак осврт на регионалан тип фосилне рибље фауне присутан у језерским системима централне и југо-источне Европе. Такође, важно је навести и податак да ова рибља фауна има мало сличности са фауном риба која живи у данашњим европским слатким водама. Доњомиоценска фауна риба централне и југо-источне Европе је представљена асоцијацијом ципринодонта, гобида,

атеринида, елеотрида, чији су рецентни представни познати само из југо-источне Азије. Неки аутори (BRATISHKO et al., 2017; REISCHENBACHER et al., 2018; BRADIĆ-MILINOVIĆ et al., 2019) сматрају да је овакав тип фосилне рибе фауне био индикатор тада много топлије, суптропске климе и да су вероватно изумрле у Европи током средњег миоцена.

Заједница слатководних гобида млађег доњег миоцена централне и југо-источне Европе даје доказе о присуству ишчезле доњомиоценске фауне слатководних риба, која у случају проучаваних гобида није у вези са данашњим Понто–каспијским гобидама. Доњомиоценска фауна је представљена ендемичним врстама чију корелацију је могуће извршити само до неке мере. Наиме ова фауна се може корелисати са фауном језерског система слатководних моласа и фауном Динаридског језерског система (DSL Сл., 1), где је примећена подударност родова *Rhamphogobius* и *Toxopyge*, али представљених различитим врстама (REICHENBACHER, 1993; REICHENBACHER et al., 2007; GIERL & REICHENBACHER, 2015; BRADIĆ-MILINOVIĆ et al., 2019).



Слика 1. Слатководни језерски системи Европе током старијег миоцена (BRADIĆ-MILINOVIĆ et al., 2019, модификовано).

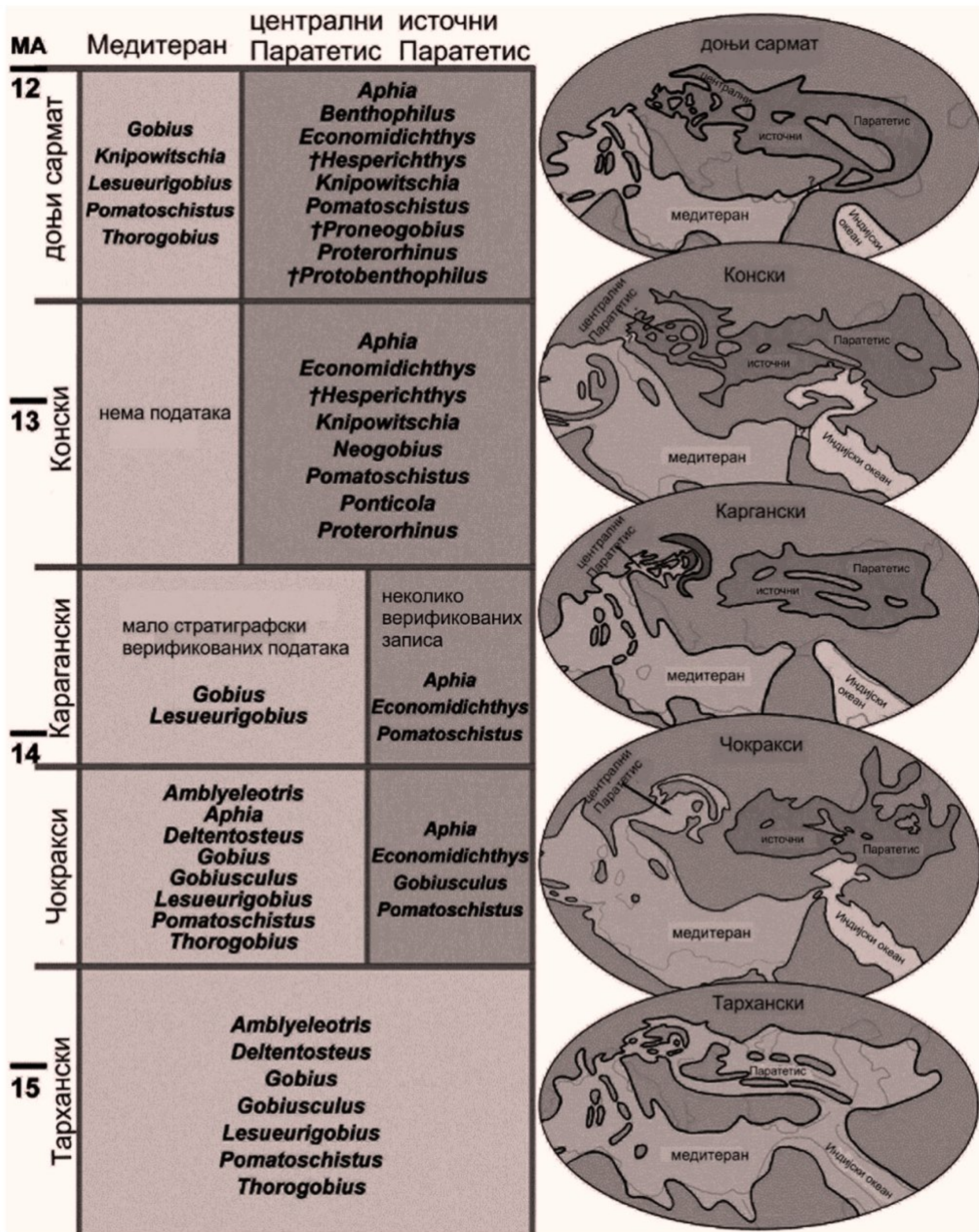
Figure 1. Freshwater lake systems of Europe during the Early Miocene (BRADIĆ-MILINOVIĆ et al., 2019, modified).

### Средњи миоцен (сармат)

Након старијег миоцена, у старијем средњем миоцену, форме гобида поменуте у претходном поглављу нестају и уступају место тако званом Понто–каспијским гобидама (BRADIĆ-MILINOVIĆ et al., 2019). Услед баденске

трансгресије имамо промену палеоеколошких средина, која је резултирала променама у асоцијацији риба. Пратећи ове промене у еколошкој ниши, као и смену фауне могу се извући закључци значајни за палеогеографску анализу. SCHWARZHANS et al. (2015) истичу да су рибе посебно значајне за истраживање морских веза, због брзе прилагодљивости, као и због њихове специјализације на одређене услове у животном окружењу (температура воде, салинитет, дубина воденог стуба и др.). Одређене групе су посебно значајне у овом погледу: Clupeidae, Gadidae и Gobiidae. Овакви аспекти углавном разматрани на основу представника фамилије Gobiidae, због богате ендемске фауне Понто–каспијских гобида, као и рецентне фауне која од њих води порекло. Широм Паратетиса и Тетиса је почетком бадена егзистовала у великој мери равномерна, рибља фауна отвореног мора. Ова фаза је праћена драматичним прекидом постојања фауне између доњег и горњег бадена у Централном Паратетису и слично у Источном Паратетису између чокаркски/караганског и конског ката (Сл. 2). Рибља фауна отвореног мора нестаје и ендемска еволуција риба цвета унутар ове три фамилије (Clupeidae, Gadidae и Gobiidae). Период између старијег и млађег бадена је време када се многи ендемски Понто–каспијски родови Gobiidae први пут појављују (Сл. 2). Овакве смене фауне се дешавају истовремено са изменама у трансгресивно–регресивним циклусима у Паратетису (KOVACĀ et al., 2007), који су очигледно били погодни за еволуцију гобида и њихову диверзификацију. Састав фауне сарматских отолита Караманског басена (Турска), поседује богату плиткоморску рибљу фауну са пуно припадника фамилије Gobiidae, чији представници поседују сличне афинитете, као старија рибља фауна Централног Паратетиса (SCHWARZHANS, 2014). Овакве карактеристике такође показује горњобаденска и сарматска рибља фауна из Барајева и Сланаца у околини Београда (SCHWARZHANS et al., 2015). Стога се закључује да рибља фауна не потврђује повезаност Паратетиса са Медитераном током серавалиана (горњи баден/сармат), нити у северозападном делу као што је приметио BARTOL et al., (2014), нити у југоисточном делу где би се Карамански басен идеално налазио на пола пута везе између ова два басена.

Као што је већ наведено у уводном делу са сарматског локалитета са којег су описани скелети са отолитима *in situ*, припадају различитим фамилијама, па је самим тим и њихов стратиграфски значај различит. Такође, и палеоекошке карактеристике ових група нису једнако значајне, као ни њихов значај за корелацију у регионалну слику Паратетиса. Једино посматране заједно дају потпуну слику. Остаци рибљих скелета и изоловани отолити породица Gadidae и Lotidae су чести налази телеостеи риба током средњег миоцена централног и источног Паратетиса. Током доњег бадена већина отолитних врста гадида централног Паратетиса се јавља и у Северноморском басену, где представља доминантну фауну риба (SCHWARZHANS, 2010). У централном и источном Паратетису гадиде и лотиде, током сармата постају једне од најзаступљенијих група риба о чему сведоче бројни артикулисани скелети и отолити. У прилог овој тврдњи је и наш налаз *Paratrisopterus caspius* са отолитом *in situ* са стадиона Црвене звезде (SCHWARZHANS et al., 2017a).



Слика 2. Дистрибуција гобида Паратетиса у периоду касног бадена/сармата, (модификовано према SCHWARZHANS et al., 2017c).

Figure 2. Distribution of Paratethys gobids in the Late Badenian/Sarmatian period (modified by SCHWARZHANS et al., 2017c).

Gobiidae су доминантна и најразноврснија група риба у сарматском фосилном запису Паратетиса (BRATISHKO et al., 2015; SCHWARZHANS et al., 2015). Приметна је већа заступљеност изолованих отолита у односу на целе скелете ове групе риба. Таква разлика у обиљу би могла бити повезана са крхком природом и малом величином тела ових риба, други фактори који би могли спречити

фосилизацију зглобних скелета је њихова улога као малог плена већих риба што оправдава њихово обиље у виду изолованих отолита. Сарматско море је можда било нешто мање богато врстама од садашњег Каспијског мора, али богатство разноликости врста гобида простире се у временском интервалу од конкијанског (горњобаденског) до касносарматског с.л. ката. Постоје јасне индикације еволуционих линија унутар одређених група, на пример *Aphia*, *Knipowitschia* и можда такође *Ponticola* и *Benthophilus* (Сл. 2), што указује да неке од уочене диверзификације имају стратиграфску компоненту (SCHWARZHANS et al., 2017b).

Осим горе наведених фамилија, седименти сармата стадиона Црвене звезде садрже плеуронектиформне рибе. *Parasolea serbica* представља изумрли ендемски таксон паратетиског солеида. Овај налаз проширује број познатих ендемских таксона који су цветали током миоцена у области Паратетиса (BAYKINA & SCHWARZHANS, 2016; SCHWARZHANS et al., 2017d) и представља доказ о динамичној еволуцији која се догодила убрзо након одвајања Паратетиса од светских океана.

Када говоримо о фамилији Clupeidae, из ових седимената је познат налаз отолита *in situ*, врсте *Sarmatella doljeana* (BAYKINA & SCHWARZHANS, 2017). Овај налаз је веома важан за реконструкцију еволуције клупеида у Паратетису. У случају овог налаза *Sarmatella* подржава порекло рода од касног бадена до сармата и показује ширу географску распрострањеност него што је документовано налазима скелета, односно у басену Северног мора, што указује да род није био примарни ендемски облик Паратетиса (BAYKINA & SCHWARZHANS, 2017).

## ЗАКЉУЧАК

Пре свега треба истаћи важност налаза отолита *in situ*. Сматрамо да шира геолошка публика са ових простора није у довољној мери упозната са значајем ових налаза. Такође, овакви налази нам пружају податке који могу имати мултидисциплинарну примену. Налази отолита *in situ* су пре свега веома важни јер нам дају информације за детаљну систематску класификацију. Отолити *in situ* нам дају боље информације за разумевање дистрибуције риба кроз време и простор. Осим ових података важних за усаглашавање систематике риба, дају и важне стратиграфске, палеогеографске и палеоеколошке податке.

Сходно томе можемо набројати неке од најважнијих закључака који су изведени на основу истраживања три асоцијације фосилних риба са отолитима *in situ*:

- налаз рода *Dapalis* нам сведочи о палеоеколошким условима језерских басена током старијег доњег миоцена.
- материјал ендемских врста са локалитета Клинци, нам сведочи да гобиде описане у тој студији нису у вези са Понто-Каспијским формама, које су познате из средњомиоценских седимената. Ове доњомиоценске форме су морале изумрети да би ослободиле животни



простор за Понто-Каспијске форме. Ова чињеница их сврстава у добре стратиграфске и палеоеколошке репере.

- Треба истаћи и подударност неких родова са другим басенима са којима се може корелисати само до неког нивоа. Фауна слатководних моласа и фауна Динаридског језерског система, показује подударност родова *Rhamphogobius* и *Toxoruge*, али представљених различитим врстама.
- У случају сарматских седимената постоје јасне индикације еволуционих линија унутар одређених група, на пример *Aphia*, *Knipowitschia* и можда такође *Ponticola* и *Benthophilus*, што указује да неке од уочене диверзификације може имати стратиграфски значај.
- Налаз врсте *Parasolea serbica* у сарматским бракичним седиментима сведочи о динамичној еволуцији која се догодила убрзо након одвајања Паратетиса од светских океана.

Надамо се да ће у будућности бити још студија које ће се бавити овом проблематиком, не само са подручја Србије, већ и из региона.

## SUMMARY

On the territory of Serbia, Miocene sediments are widely distributed. During this epoch, numerous changes took place, which were accompanied by the type of sediments that were deposited, and thus the fossil association in them. Accordingly, during the Lower Miocene in the territory of our country we have the distribution of lake sediments. These sediments formed in several lakes, which communicated with each other during their existence; this lake system is known in the literature as the Serbian Lake System (KRSTIĆ et al., 2012, SANT et al., 2018). Then, during the early Middle Miocene (Badenian), there was a transgression of the Paratethys in the area of Serbia. During the Late Middle Miocene (Sarmatian), input of fresh water occurs, so during this period, brackish aquatic entities exist. The additional refreshing by inland waters continued through the Upper Miocene, which resulted in the change of brackish into caspi-brackish environment (Lake Pannon). All changes in the salinity of aquatic environments are accompanied by changes in the fauna of fish that lived in them.

The oldest material (Oligocene / Lower Miocene) is from the lake sediments of the Babušnica Basin (southern Serbia). All the collected specimens were identified within the family Ambassidae and the genus *Dapalis*. The genus *Dapalis* is widespread in freshwater and brackish waters, as well as in the coastal seas of South Asia and Australia (NELSON et al., 2016). This genus is represented in the sediments of the Upper Oligocene from Allier, France. Also, this genus is known from the Oligocene lake deposits of Western Europe. One species of this genus from the Oligocene of the Transylvanian Basin is also known (REICHENBACHER & CODREA, 1999). In addition to Oligocene deposits, the presence of this genus has also been noted in Oligo-Miocene sediments around Vichy, France (GAUDANT, 1992). This group of fish belongs to euryhaline organisms, subtropical to tropical paleoclimate (REICHENBACHER & CODREA, 1999).

Fossil fauna with otoliths *in situ*, from the late Lower Miocene, is known from the Klinči marls (Valjevo-Mionica Basin). The material from Klinči was classified into three genera with four species described by BRADIĆ-MILINOVIĆ et al. (2019): *Klincigobius serbiensis*, *Klincigobius andjelkovicae*, *Rhamphogobius varidens* and *Toxopyge campylus*. It is important to note that in the territory of Serbia during the early to middle Miocene, the lake environment prevailed, that is, there were several lakes, which communicated with each other in different periods during their existence. In the literature (KRSTIĆ et al., 2012, SANT et al., 2018), the system of these lakes is known as the Serbian Lake System (SLS).

The community of freshwater gobies of the late Lower Miocene of Central and South-Eastern Europe provides evidence of the presence of extinct Lower Miocene fauna of freshwater fish, which in the case of the studied gobies is not related to today's Ponto-Caspian goby fishes. Lower Miocene fauna is represented by endemic species whose correlation can be performed only to a certain extent. Namely, this fauna can be correlated with the fauna of the freshwater molasses lake system and the fauna of the Dinaride lake system (DLS; Fig., 1), where the similarity of the genera *Rhamphogobius* and *Toxopyge* was observed, but represented by different species (REICHENBACHER, 1993; REICHENBACHER et al.; GIERL & REICHENBACHER, 2015; BRADIĆ – MILINOVIĆ et al., 2019).

The association of fish with otoliths *in situ* from Sarmatian sediments from the Red Star Stadium contains five different taxa: *Paratrisopterus caspius* (in SCHWARZHANS et al., 2017a), *Aphia macrophthalma* (in SCHWARZHANS et al., 2017b), “*Scorpaena*” *minima* SCHWARZHANS et al., 2017c), *Parasolea serbica* (in SCHWARZHANS et al., 2017d) and *Sarmatella doljeana* (in BAYKINA & SCHWARZHANS, 2017).

After the Lower Miocene, in the lower Middle Miocene, the forms of gobies disappear and give way to living space to the so-called Ponto-Caspian gobies (BRADIĆ – MILINOVIĆ et al., 2019). Due to the Badenian transgression, we have a change in the paleoecological environment, which resulted in changes in the association of fish. Following these changes in the ecological niche, as well as the change of fauna, conclusions can be drawn that are important for paleogeographic analysis. SCHWARZHANS et al. (2015) point out that fish are especially important for the research of marine connections, due to their quick adaptability, as well as their specialization to certain environmental conditions (water temperature, salinity, water column depth, etc.). Certain groups are particularly important in this regard: Clupeidae, Gadidae and Gobiidae. Such aspects are mainly considered based on representatives of the Gobiidae family, due to the rich endemic fauna of Ponto-Caspian gobies, as well as the recent fauna that originates from them. Across Paratethys and Tethys, at the beginning of the Badenian, there was a largely even, fishy fauna of the open sea. This phase was followed by a dramatic interruption of the fauna between the Lower and Upper Badenian in the Central Paratethys and similarly in the Eastern Paratethys between the Tshokrakian/ Karaganian and Konkian stage (Fig. 2). The fish fauna of the open sea is disappearing and the endemic evolution of flowering fish within these three families (Clupeidae, Gadidae and Gobiidae). The period between the older and younger Badenian is the time when many endemic Ponto-Caspian genera Gobiidae first appear (Fig. 2). Such fauna changes occur simultaneously with changes in the transgressive-

regressive cycles in Paratethys (KOVAČ et al., 2007), which were obviously conducive to the evolution of gobies and their diversification. The fauna of the Sarmatian otoliths of the Karaman Basin (Turkey) has a rich shallow-sea fish fauna with many members of the Gobiidae family, whose representatives have similar affinities as the older fish fauna of the Central Paratethys (SCHWARZHANS, 2014). Such characteristics are also shown by the Upper Badenian and Sarmatian fish fauna from Barajevo and Slanci in the vicinity of Belgrade (SCHWARZHANS et al., 2015). Therefore, it is concluded that fish fauna does not confirm the connection of Paratethys with the Mediterranean during the Serravallian, neither in the northwestern part as noted by BARTOL et al., (2014), nor in the southeastern part where the Karaman Basin would ideally be halfway between the two basins.

By following all these changes in the composition of the fish association over time, we can help clarify the paleogeographic events in the Paratethys during the Miocene. Also, important data can be obtained based on which the paleoecological reconstruction of the water entities in which these fish lived can be performed.

## ЛИТЕРАТУРА

- ANDELKOVIĆ, J. (1970). Tercijarne ribe Srbije. *Annales Géologiques de la Péninsule Balkanique*, 35, 281-365.
- BARTOL, M., MIKUZ, V. & HORVAT, A. (2014). Palaeontological evidence of communication between the Central Paratethys and the Mediterranean in the late Badenian/early Serravallian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 394, 144–157.
- BAYIKINA, E. M. & SCHWARZHANS, W. (2016). Description of *Karaganops* n. gen. *perrata* (Daniltshenko, 1970) with otoliths in situ, an endemic karaganian (Middle Miocene) herring (Clupeidae) in the Eastern Paratethys, *Swiss Journal of Palaeontology*. DOI 10.1007/s13358-016-0115-4
- BAYKINA, E. & SCHWARZHANS, W. (2017). Description of *Karaganops* n. gen. *perratus* (Daniltshenko, 1970) with otoliths in situ, an endemic Karaganian (Middle Miocene) herring (Clupeidae) in the Eastern Paratethys. *Swiss Journal of Palaeontology*, 136, 129-140.
- BRADIĆ-MILINOVIĆ, K., AHNELT, H., RUNDIĆ, LJ. & SCHWARZHANS, W. (2019). The lost fresh water goby fish fauna (Teleostei, Gobiidae) from the early Miocene of Klinči (Serbia). *Swiss Journal of Palaeontology*, 138, 285–315.
- BRATISHKO, A., KOVALCHUK, O. & SCHWARZHANS, W. (2017). Bessarabian (Tortonian, late Miocene) fish otoliths from a transitional freshwater-brackish environment of Mykhailivka, southern Ukraine. *Palaeontologica Electronica*, 20.3.44A, 1-13.
- BRUIJN, H., MARKOVIĆ, Z., WESSELS, W. & MILIVOJEVIĆ, M. (2018). Rodent faunas from the Paleogene of south-east Serbia. *Palaeobio. Palaeoenv.*, 98, 441-458.
- GAUDANT, J. (1992). Presence des genres *Dapalis* Gaudant et *Dapalis* Gistel (Poissons teleostéens, Percoidei) dans l'Oligo-Miocène lacustre de la Limagne bourbonnaise. *Bull. Mus. nalt. Hist. nat.*, 14, 289-300.
- GAUDANT, J. (1998). L'ichthyofaune des eaux continentales miocènes de Serbie (Yougoslavie): une révision (The fish-fauna of Miocene continental waters from Serbia (Yugoslavia): a revision). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen*, 207 (1), 107-123.
- GIERL, C. & REICHENBACHER, B. (2015). A New Fossil Genus of Gobiiformes from the Miocene Characterized by a Mosaic Set of Characters. *Copeia*, 103, 4, 792-805.

- JOVANOVIĆ, O., GRGUREVIĆ, D. & ZUPANČIĆ, N. (1994). The Neogene sediments in Valjevo–Mionica basin., *Bulletin d'Geozavoda*, Series A, B, 46, 207-222 (In Serbian, English summary).
- KOVAČ, M., ANDREYEVA-GRIGOROVICH, A., BAJRAKTAREVIC, Z., BRZOBOHATY, R., FILIPESCU, S., FODOR, L., HARZHAUSER, M., NAGYMAROSY, A., OSZCZYPKO, N., PAVELIC, D., RÖGL, F., SAFTIC, B., SLIVA, L. & STUDENCKA, B. (2007). Badenian evolution of the Central Paratethys Sea: paleogeography, climate and eustatic sea-level changes. *Geologica Carpathica*, 58 (6), 579-606.
- KRSTIĆ, N., SAVIĆ, LJ., JOVANOVIĆ, G. (2012). The Neogene Lakes on the Balkan Land. *Annales Géologiques de la Péninsule Balkanique*, 73, 37–60.
- LAZAREVIĆ Z., MILIVOJEVIC, J., BOGIĆEVIC, K. & NENADIC, D. (2013). Early Miocene flora from the Valjevo-Mionica Basin (Western Serbia). *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaeontologie – Abhandlungen*, 267, 3, 297-307.
- MANDIĆ O., HAJEK-TADESSE, V., BAKRAČ, K., REICHENBACHER, B., GRIZELJ, A. & MIKNIĆ, M. (2019). Multiproxy reconstruction of the middle Miocene Požega palaeolake in the southern Pannonian Basin (NE Croatia) prior to the Badenian transgression of the Central Paratethys Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 516, 203-219.
- MAROVIĆ, M., ĐOKOVIĆ, I., MILIĆEVIĆ, V., TOLJIĆ, M. & GERZINA N. (2002). Paleomagnetism of the late Paleogene and Neogene rocks of the Serbian Carpatho-Balkanides: Tectonic implication. *Annales Géologiques de la Péninsule Balkanique*, 64, 1-12.
- MAROVIĆ M., TOLJIĆ, M., RUNDIĆ, LJ. & MILIVOJEVIĆ, J. (2007). Neoalpine tectonics of Serbia. *Serbian Geological Society*, 1-82.
- NELSON, J., S., GRANDE, C., T. & WILSON, H., V., M. (2016). Fishes of the World, fifth edition. *John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (New Jersey, USA)*, 1-707.
- PANTIĆ, N. (1962). Fosilni ostaci kopnenih biljaka u Jugoslaviji i njihov stratigrafski značaj. *Referati 5. savetovanja*, 1,
- REICHENBACHER, B. (1993). Mikrofaunen, Paläogeographie und Biostratigraphie der miozänen Brack-und Süßwassermolasse in der westlichen Paratethys unter besonderer Berücksichtigung der Fisch-Otolithen. *Senckenbergiana lethaea*, 73 (2), 277-374.
- REICHENBACHER, B. & CODREA, V. (1999). Fresh- to brackish water fish fauna from continental Early Oligocene deposits in the Transylvanian Basin (Romania). *Bulletin de l'institut Royal des sciences Naturelles de Belgique*, 69, 197-207.
- REICHENBACHER, B., GAUDANT, J. & GRIESSEMER, W. (2007). A late Burdigalian gobiid fish, *Gobius brevis* (AGASSIZ, 1839), in the Upper Hydrobia Beds in the middle Upper Rhine Graben (W-Germany). *Paläontologische Zeitschrift*, 81/4, 365-375.
- REISCHENBACHER, B., FILIPESCU, S. & MICLEA, A. (2018). A unique middle Miocene (Sarmatian) fish fauna from the coastal deposits in the eastern Pannonian Basin (Romania). *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 99, 177-194.
- RÖGL, F. (1999). Mediterranean and Paratethys. Facts and hypothesis of an Oligocene to Miocene Paleogeography (short overview). *Geologica Carpathica*, 59, 339–349.
- SANT K., MANDIC, O., RUNDIĆ, LJ., KUIPER, K. & KRIJGSMAN, W. (2018). Age and evolution of the Serbian Lake System: integrated results from Middle Miocene Lake Popovac. *Newsletter on Stratigraphy*, 51/1, 117-143.
- SCHWARZHANS, W. (2010). The otoliths from the Miocene of the North Sea Basin. *Weikersheim: Backhuys publishers, Leiden and Margraf Publishers*, 1-352.
- SCHWARZHANS, W. (2014). Otoliths from the Middle Miocene (Serravalian) of the Karaman Basin, Turkey. *Cainozoic Research* 14 (1), 35-69.
- SCHWARZHANS, W., BRADIĆ, K. & RUNDIĆ, LJ. (2015). Fish-otoliths from the marine-brackish water transition from the Middle Miocene of the Belgrade area, Serbia. *Paläontologische Zeitschrift*, 89, 815-837.

- SCHWARZHANS, W., CARNEVALE, G., BRATISHKO, A., JAPUNDŽIĆ, S. & BRADIĆ, K. (2017a). Otoliths in situ from Sarmatian fishes of the Paratethys. Part II: Gadidae and Lotidae. *Swiss Journal of Palaeontology*, 136, 19-43.
- SCHWARZHANS, W., AHNELT, H., CARNEVALE, G., JAPUNDŽIĆ, S., BRADIĆ, K. & BRATISHKO, A. (2017b). Otoliths in situ from Sarmatian (Middle Miocene) fishes of the Paratethys. Part III: tales from the cradle of the Ponto-Caspian gobies. *Swiss Journal of Palaeontology*, 136, 45-92.
- SCHWARZHANS, W., CARNEVALE, G., JAPUNDŽIĆ, S. & BRADIĆ-MILINOVIĆ, K. (2017c). Otoliths in situ from Sarmatian (Middle Miocene) fishes of the Paratethys. Part IV: Scorpaenidae, Labridae and Gobiesocidae. *Swiss Journal of Palaeontology*, 136, 93-108.
- SCHWARZHANS, W., CARNEVALE, G., JAPUNDŽIĆ, S. & BRADIĆ-MILINOVIĆ, K. (2017d). Otoliths in situ from Sarmatian (Middle Miocene) fishes of the Paratethys. Part V: Botidae and Soleidae. *Swiss Journal of Palaeontology*, 136, 109-127.
- ŠAJNOVIĆ, A., STOJANOVIĆ, K., JOVANČIČEVIĆ, B. & GOLOVKO, A. (2009). Geochemical investigation and characterisation of Neogene sediments from Valjevo-Mionica Basin (Serbia). *Environmental Geology* (2009) 56, 1629–1641.

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les années 2022

REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022

Beograd, 2023

Милош Велојић<sup>1</sup>  
Miloš Veljić<sup>1</sup>

## ГЕОЛОГИЈА ХИДРОТЕРМАЛНОГ Cu-Au СИСТЕМА ЧУКАРУ ПЕКИ

## THE GEOLOGY OF HYDROTHERMAL Cu-Au SYSTEM ČUKARU PEKI

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД - PAPER

**Апстракт:** Хидротермални Cu-Au систем Чукару Пеки је један од највећих рудоносних система откривених на простору Европе у XXI веку. На основу данашњег степена истражености, сматра се да садржи више од 2,3 милијарди тона руде, односно више од 17 милиона тона бакра и више од 380 тона злата у металу.

Просторно и генетски посматрано, овај систем је настао у вези са продуктима прве фазе магматске активности Тимочког магматског комплекса. У рудоносном систему Чукару Пеки су издвојена три основна типа минерализације: 1) Порфирски тип (тзв. Доња зона) која се налази у дубљим деловима хидротермалног система, у распону од -180 m до -1900 m н.в.; 2) Прелазна епитермална зона (која се такође назива *Overprint* минерализација), између зоне високе сулфидације и порфирског дела рудоносног система; 3) Зона високе сулфидације (тзв. Горња зона) изграђена од масивних сулфида са пиритом, ковелином и енарцитом.

Димензије и облик Доње зоне система Чукару Пеки нису детаљно одређене због велике дубине лежишта и ниског степена истражености. Претпоставља се да су најдубљи делови лежишта на дубини већој од 2100 m од површине терена. Најзаступљенији типови алтерације у овој зони су калијска метасоматоза, кварцно-серицитска алтерација и хлоритизација. На основу теренских, рудномикроскопских испитивања и анализе флуидних инклузија, утврђено је да је минерализација бакра и злата у Доњој зони настала у два стадијума. Порфирски стадијум је формиран у температурном интервалу од 600-400°C и током њега је депоновано четири типа жица: 1) кварцне жице типа А без рудних минерала, 2) кварцне жице типа Б са халкопиритом, борнитом и пиритом, 3) пиритске жице типа Д са малим зрнима халкопирита и борнита и 4) магнетитске жице са хематитом, пиротином и халкопиритом. Млађи, епитермални стадијум обухвата три типа жица насталих на температурама око 300-200°C: 1) љубичасте анхидритске жице са пиритом, халкопиритом, ковелином и енарцитом, 2) сулфидне жице са пиритом и ковелином и 3) наранџасте анхидритске жице без рудних минерала.

<sup>1</sup> Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд,  
Србија; milos.velojic@rgf.bg.ac.rs

Прелазна епитермална зона се карактерише преовлађујућим типом аргилитске алтерације. Представљена је системом анхидритских и гипсних жица, са пратећим рудним минералима - ковелином, халкопиритом, дигенитом и енарцитом, као и локалним појавама самородног сумпора.

Горња зона је издужено-овалног облика са приближним димензијама у плану око 300x350 m. Вертикални интервал минерализације је око 550 m. Доминантна фазија хидротермалне алтерације у Горњој зони система Чукару Пеки је напредна аргилитска алтерација са кварцом и алунином. На основу теренских и рудномикроскопских испитивања, установљено је да је Горња зона формирана у више сукцесивних стадијума: 1) Масивни пирит (Py1); 2) Py-en жице са пиритом и енарцитом; 3) Py-cov жице са пиритом, ковелином и енарцитом; 4) Py2 жице са ситнозрним пиритом; 5) Маркаситске жице са арсенопиритом и сфалеритом и 6) Калцитско-анхидритске жице без рудних минерала.

**Кључне речи:** Тимочки магматски комплекс, бакар, злато, порфирска лежишта, масивни сулфиди

**Abstract:** The Ćukaru Peki hydrothermal system is one of the largest Cu-Au deposits discovered in Europe in the 21<sup>st</sup> century. The current estimates imply that this system contains more than 2,3 billion tonnes of ore, containing 17 million tonnes of Cu and 380 tonnes of Au.

This system is genetically and spatially associated with the products of the first magmatic phase of the Timok magmatic complex. Three types of mineralization can be distinguished in this hydrothermal system: 1) Porphyry zone (also called Lower zone) is located in deeper parts of the hydrothermal system, at depth interval between -180m and -1900 meters below the surface; 2) Transitional epithermal zone (also called *Overprint* mineralization) located between the porphyry zone and the high-sulfidation zone and 3) High-sulfidation zone (also called Upper zone) consisting of massive sulfides with pyrite, covellite and enargite.

The dimensions and the shape of the Lower zone of this system are still not defined due to the large depth of the deposit and the low level of exploration. It is assumed that the deepest parts of this zone are located at more than 2100 meters from the surface. The most common types of alterations in this zone are potassic alteration, sericitic (phyllic) alteration and chloritization. Using the methods of core logging, ore microscopy examinations and fluid inclusion analysis, it is determined that the Lower zone was formed in two stages. The porphyry stage was formed at temperatures between 600 and 400°C and it consists of four types of veins: 1) quartz veins type A without mineralization; 2) quartz veins type B with chalcopyrite, pyrite and bornite; 3) pyrite veins type D with subordinate chalcopyrite and bornite and 4) magnetite veins with hematite, pyrrhotite and chalcopyrite. The younger epithermal stage was formed at temperatures between 300 and 200°C and it includes three types of veins: 1) purple anhydrite veins with pyrite, with subordinate chalcopyrite, covellite and enargite; 2) sulfide veins with pyrite and covellite and 3) orange anhydrite veins without mineralization.

The transitional epithermal zone is characterized by argillic alteration (with quartz, clay minerals and sericite). It consists of a system of anhydrite and gypsum veins, whereas the main ore minerals in this zone are covellite, chalcopyrite, digenite and enargite with occasional native sulfur.

Upper zone has an extended oval shape with approximate dimensions of 300x350 m in plan view. The vertical interval is around 550m. The dominant alteration in this zone is advanced argillic alteration with quartz and alunite. Using the methods of core logging and ore microscopy examinations, it is determined that the Upper zone mineralization was formed in several successive stages: 1) Massive pyrite (Py1); 2) Py-en veins with pyrite and enargite; 3) Py-cov veins with pyrite, covellite and enargite; 4) Py2 veins with fine-grained pyrite; 5) Marcasite veins with arsenopyrite and sphalerite and 6) Calcite-anhydrite veins without mineralization.

**Key words:** Timok magmatic complex, copper, gold, porphyry deposits, massive sulfides

## УВОД

Хидротермални рудоносни систем Чукару Пеки је откривен 2011. године и представља једно од највећих лежишта бакра и злата откривених на простору Европе у 21. веку. Налази се само 5 km јужно од града Бора у источној Србији. Vanješević & Large (2014) су генетски класификовали хидротермални систем Чукару Пеки као порфирско Cu-Au лежиште са високосулфидационом епитермалном зоном (Cu-As-Au) која садржи масивне сулфиде.

Хидротермални рудоносни систем Чукару Пеки се налази у средишњем делу Борске металогенетске зоне, која је део Карпатско-балканске металогенетске провинције (Јанковић, 1990; Kolb et al., 2013; Jelenković et al., 2016). Многи аутори је тумаче као источни сегмент великог магматског и металогенетског лука кредне старости, који се протеже кроз Румунију, Србију и Бугарску (тзв. АВТС појас - скраћено од Апузени-Банат-Тимок-Средњогорје појас, Neubauer, 2002), који се у литератури такође назива и ВММВ појас (скраћено од Банатитски магматски и металогенетски појас; Verza et al., 1998). У ужем смислу, хидротермални рудоносни систем Чукару Пеки је део рудног рејона Бор у којем се налази и светски познато, Борско лежиште бакра и злата.

У Борској металогенетској зони је налази неколико великих порфирских лежишта која су у вишедеценијској експлоатацији (Бор, Мајданпек, Велики Кривељ), као и други типови лежишта: епитермална лежишта високе сулфидације (Тилва Мика, Камењар), епитермална лежишта ниске сулфидације (Злаће), хидротермална вулканогена лежишта (Липа, Краку Бугартеску), скарновска лежишта (Ваља Сака) и недавно откривена лежишта злата карлинског типа (Коркан, Краку Пештер, Бигар Хил) (Јанковић и др., 2002; Jelenković et al., 2016). Укупни минерални ресурси ове металогенетске зоне су процењени на преко 20 Mt бакра и преко 1000 тона злата (Jelenković et al., 2016).

Настанак хидротермалног рудоносног система Чукару Пеки, као и других лежишта бакра и злата у Борској металогенетској зони, просторно и генетски је везан за Тимочки магматски комплекс. Слично осталим лежиштима у АВТС појасу, Тимочки магматски комплекс је формиран дејством субдукционих процеса на простору Неотетиског океана и формирањем остврског лука, у временском периоду око 92 до 75 Ma (Neubauer, 2002, Fügenschuh & Schmid, 2005).

## ГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ТИМОЧКОГ МАГМАТСКОГ КОМПЛЕКСА

Тимочки магматски комплекс је формиран током три вулканске фазе (Дровеник, 1961; Јанковић, 1990):

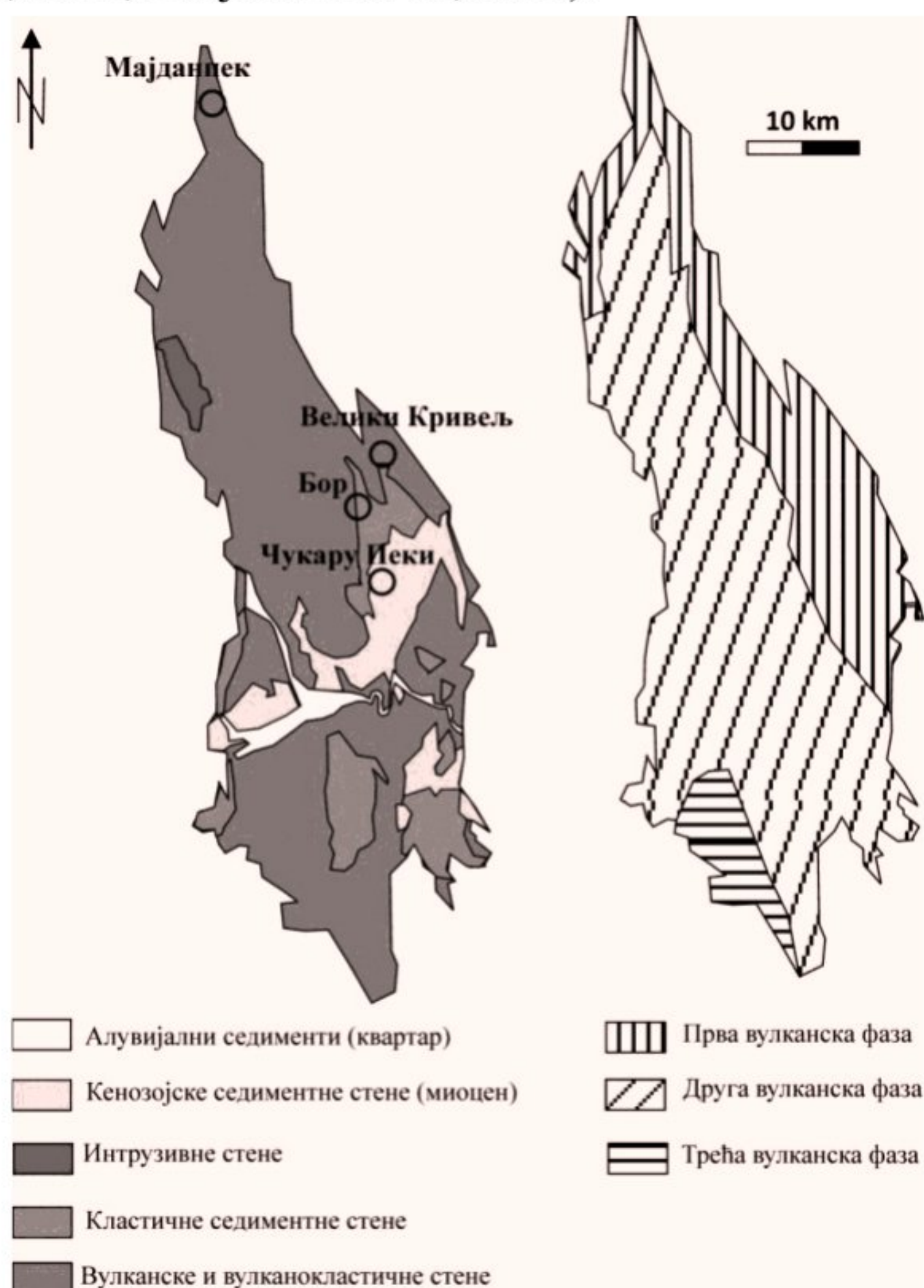
- 1) Прва вулканска фаза или тзв. Тимоцитска асоцијација је развијена у источним деловима овог комплекса (слика 1). Старост стена ове фазе је одређена на око 89-84 Ma (von Quadt et al., 2002). Карактеристике стена су: микропорфирска структура са фенокристалима хорнбленде и биотита и ретким



пироксенима, што указује да је магма била богата водом (Kolb et al., 2013). Сматра се да је већина порфирских и епитермалних лежишта бакра и злата у Тимочком магматском комплексу везана за творевине прве вулканске фазе (Jelenković et al., 2016).

2) Друга вулканска фаза је углавном развијена у западним деловима Тимочког магматског комплекса. Представљена је пироксенским или пироксен-хорнбленда андезитима и албитским трахитима са великом количином вулканокластичног материјала. Стене су углавном настале хлађењем магме засићене силицијом, која је садржала малу количину воде (Јанковић и др., 2002). Старост ове фазе је одређена на 83-80 Ма (von Quadt et al., 2002). За ову фазу су везане мања лежишта и појаве бакра у рудном пољу Црни врх (Ваља Стрж, Думитру поток и др.).

3) Трећа вулканска фаза или тзв. Латитска асоцијација присутна је само у југозападним деловима комплекса. Представљена је латитима и трахит-базалтима. Поједини аутори сматрају да су ове стене везане за тектонске промене које су се десиле након завршетка друге вулканске фазе (Јанковић и др., 2002; Кожељ, 2002), док други сматрају да овај стадијум не треба издвајати као посебну вулканску фазу, односно да он представља завршне продукте друге вулканске фазе (Knaak et al., 2016; Vanješević et al., 2019).



Слика 1: Упрошћена геолошка карта Тимочког магматског комплекса са положајем већих порфирских лежишта бакра и злата и шематским приказом распрострањења различитих вулканских фаза (модификовано из Јанковић и др., 2002 и Knaak et al., 2015).

Упоредо са вулканском активношћу, на простору Тимочког магматског комплекса вршено је и утискивање магми чијом су кристализацијом настали штокови и дајкови. Укупна површина интрузивних стена у Борској металогенетској зони је око 16 km<sup>2</sup>, од чега највећи део (14 km<sup>2</sup>) заузима интрузивни комплекс Ваља Стрж (Јанковић и др., 2002).

## ГЕОЛОШКА ГРАЂА ЛЕЖИШТА ЧУКАРУ ПЕКИ

Хидротермални систем Чукару Пеки се налази у стенама прве вулканске фазе: у андезитима, андезитским бречама и хидротермалним бречама, а у дубљим деловима су углавном присутни диорити. Преко ових стена лежи формација релативно нелатерисаних андезита (интерно названих „Горњи андезити”), максималне дебљине око 50m. Изнад њих је горњокредна седиментна секвенца лапораца, пешчара и конгломерата која благо залеже ка западу. Изнад поменуте секвенце дискордантно леже миоценски конгломерати и пешчари, дебљине 200-400 м (Јакубец et al., 2018; Ванјешевећ et al., 2019) (слика 2).

Jelenković et al. (2016) су у хидротермалном систему Чукару Пеки дефинисали три зоне минерализације:

1) Зона високе сулфидације (такође позната и као Горња зона), изграђена од масивних сулфида бакра, рудних жица са пиритом и ковелином и хидротермалних бреча. За њу су карактеристични високи садржај пирита и развиће напредне аргилитске алтерације. Налази се на дубини од 400 до 1000 m испод савремене површине терена.

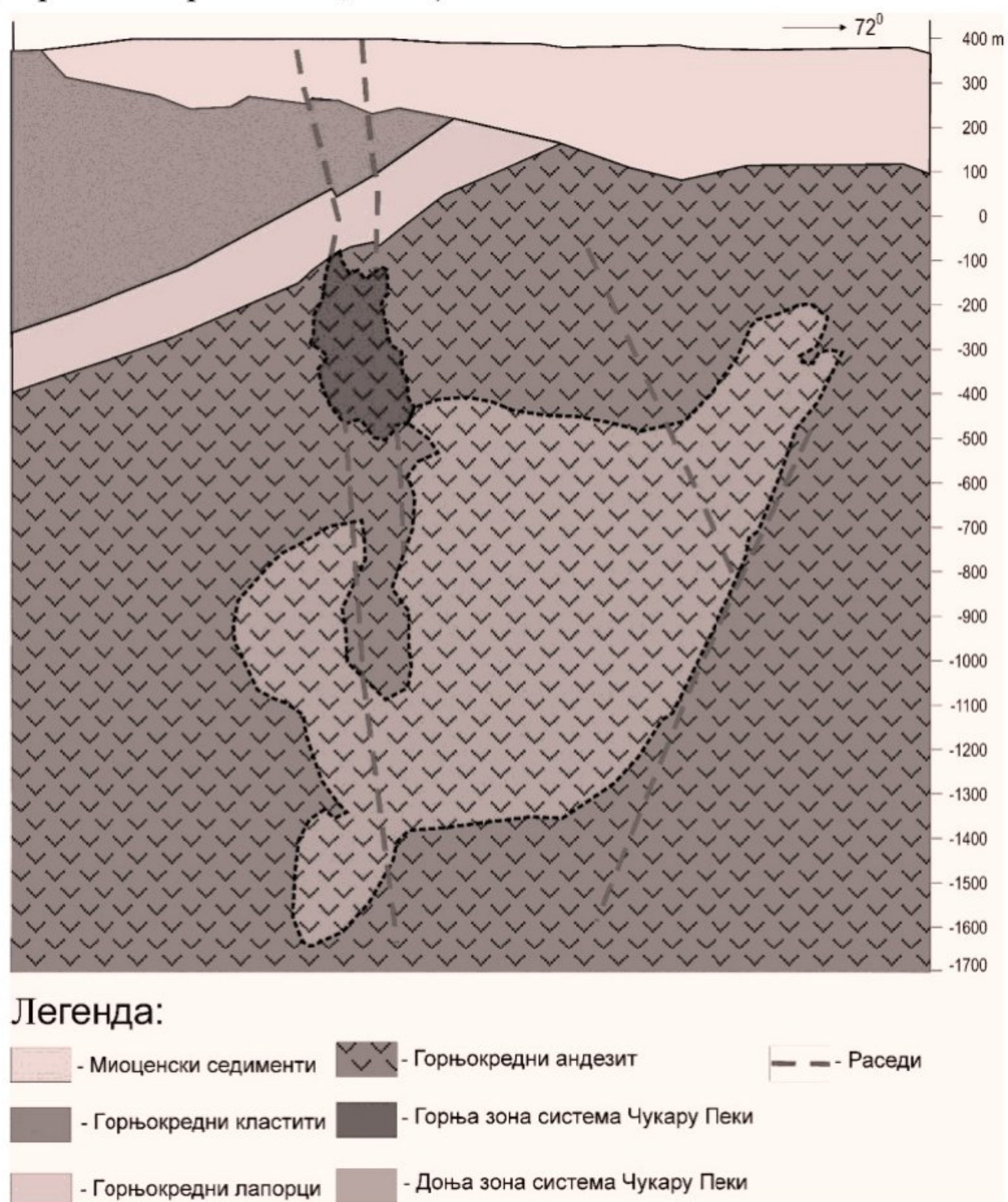
2) Прелазна епитермална зона, између зоне са високосулфидационим типом минерализације и порфирског дела рудоносног система. У прелазној зони ковелин и енаргит замењују примарне сулфиде (халкопирит) настале у порфирској минерализација. Карактерише се бројним анхидритским, гипсним и калцитским жицама, док је главни тип хидротермалних промена аргилитска алтерација која замењује калијску и хлоритску алтерацију.

3) Порфирска зона, која се налази у нижим деловима хидротермалног рудоносног система на дубинама >1000 m од површине терена. Минерализација је углавном везана за кварцне и анхидритске жице које садрже халкопирит, пирит и борнит. Доминантне хидротермалне измене су калијска, серицитска и хлоритска алтерација.

## ЗОНА ВИСОКЕ СУЛФИДАЦИЈЕ

Горња зона је издужено-овалног (бубрежастог) облика са приближним димензијама у плану око 300x350 m, док је вертикално пружање око 550 m. У овој зони је садржано око 50 милиона тона руде са 2,43% Cu, 1,53 g/t Au и 2,92 g/t Ag. У највишим деловима рудоносне зоне је заступљен масивно-сулфидни тип минерализације, тзв. „апикална капа” у чијем саставу преовлађују пирит и ковелин. У односу на друге делове рудоносног система, садржи највиши садржај бакра (са више од 9% Cu). Горња граница Горње зоне система Чукару пеки је

раседна зона (енгл. тзв. *Moonlight fault*) представљена раседним глинама дебљине 1-3 m (Бугарин и Маринковић, 2018).



Слика 2: Упрошћени геолошки профил лежишта Чукару Пеки са приказаном Горњом и Доњом рудном зоном и већим раседима (модификовано из Бугарин и Маринковић, 2018).

Повлатна граница Горње зоне и њене „бочне границе“ су оштре, са наглим преласком из минерализације у околне стене, док је доња граница зоне одређена на основу граничног садржаја бакра (Бугарин и Маринковић, 2018). Идући ка нижим деловима, количина сулфида опада, стене постају кохерентније а минерализација из масивних сулфида постепено прелази у жиличасти и штокверкни тип орудњења (Jakubec et al., 2018).

На основу резултата геолошких истраживања, претпостављен је следећи хронолошки редослед депоновања жица у високосулфидационом (масивно-сулфидном) делу лежишта (табела 1):

1) Масивни пирит (Py1): У овом стадијуму ситнозрни пирит је заменио већину стенске масе, чиме су формиран масивни сулфиди. Депоновању пирита је вероватно претходила напредна аргилитска алтерација читаве Горње зоне и депоновање велике количине силиције са алунином.

2) Пиритско-енаргитске (Py-en) жице: Углавном садрже пирит и енаргит са пуно кварца и алунита. Местимично се примећују мање ковелинске жице које их пресецају.

3) Пиритско-ковелинске (Py-cov) жице: Овај тип рудних жица је најзаступљенији у Горњој зони лежишта и садрже највећу количину ковелина и енаргита. Поједине од њих садрже само ковелин, док је у другима овај минерал у асоцијацији са енаргитом и пиритом. У овом типу жица се често јавља колоформни пирит, што вероватно указује на брзо хлађење хидротермалних флуида.

4) Py<sub>2</sub> жице: Овај тип жица садржи ситозрни пирит и кварц и пресеца пиритско-ковелинске жице. Вероватно су настале од преосталих флуида након депоновања главног дела минерализације.

5) Маркаситске жице: Ове жице садрже коломорфни маркасит, арсенопирит и коломорфни сфалерит у виду уклопака у маркаситу.

6) Калцитско-анхидритске жице: За разлику од других анализираних жица, ове жице садрже калцит, сулфате и фосфате (анхидрит, целестин, апатит). Преовлађују у ободним деловима лежишта.

Доминантна фација хидротермалних измена у Горњој зони система Чукару Пеки је напредна аргилитска алтерација са кварцом и алунитом. Местимично се уочава и шупљикава силиција, углавном у централним деловима зоне. Око Горње зоне налази се узана зона аргилитске алтерације (Бугарин и Маринковић, 2018).

## ПРЕЛАЗНА ЕПИТЕРМАЛНА ЗОНА

Прелазна епитермална зона (позната је и под називом Overprint минерализација) се налази између порфирске и високосулфидационе зоне, на дубинама од 900-1400 m од савремене површине терена. Рудна минерализација је обично везана за анхидритске жице, док су главни рудни минерали ковелин и дигенит са ретким појавама енаргита, халкозина и локалним појавама самородног сумпора. Сматра се да је овај тип минерализације настао деловањем каснијих флуида, који су били киселији и богатији сумпором од флуида у порфирском делу лежишта (Бугарин и Маринковић, 2018). Ова зона се карактерише преовлађујућим типом аргилитске алтерације са кварцом, минералима глинама и серицитом.

Табела 1: Парегенетски односи рудних жица у високосулфидационој (Горњој) зони система Чукару Пеки (модификовано из Велојић, 2021).

	Py <sub>1</sub> стадијум	Py-en стадијум	Py-cov стадијум	Py <sub>2</sub> стадијум	Маркаситске жице
Пирит					
Кварц					



минерал, док су пратећи минерали борнит и пирит. У овим жицама су СЕМ испитивањима на , детектована и зрна злата и електрума малих димензија.

3) Пиритске жице (тип Д): Састоје се од међусобно повезаних зрна пирита, праћених мањим зрнима халкопирита, борнита и рутила. Углавном су праћене хлоритском алтерацијом.

4) Магнетитске жице (тип М): Овај тип жица се налази у хипсометријски нижим деловима порфирског система. Главни минерали су магнетит и хематит, праћени пиротином и халкопиритом; магнетит је често делимично конвертован у хематит, што указује на процесе мартитизације.

5) Љубичасте анхидритске жице: Пирит је главни минерал. Пратећи минерали су: халкопирит, ковелин, борнит и енаргит. Овај тип жица се поред порфирске зоне, јавља и у прелазној епитермалној зони.

6) Сулфидне жице: Главни рудни минерали су пирит и ковелин, а главни нерудни анхидрит и алтерисана глина (вероватно каолинит). Слично претходном, и овај тип жица је чест у прелазној епитермалној зони.

7) Наранџасте анхидритске жице: Јасно се разликују од љубичастих анхидритних жица по жуто-наранџастој боји. Пресецају све раније типове жице и не садрже рудне минерале.

Табела 2. Парегенетски односи рудних жица у порфирској (Доњој) зони система Чукару Пеки (модификовано из Velojić et al., 2020).

	Кварцне жице типа Б	Пиритске жице (тип Д)	Магнетитске жице (тип М)	Љубичасте анхидритске жице	Сулфидне жице
Пирит					
Халкопирит					
Борнит					
Магнетит					
Хематит					
Пиротин					
Рутил					
Ковелин					
Енаргит					

Најзаступљенији тип хидротермалних промена у овој зони су калијска и хлоритска алтерација везане за А и В кварцне жице, док је кварцно-серицитска алтерација везана за жице типа Д. Поред тога, богатији делови порфирске минерализације карактеришу се интензивном силификацијом (Jakubec et al., 2018).

## ГЕНЕЗА ЛЕЖИШТА

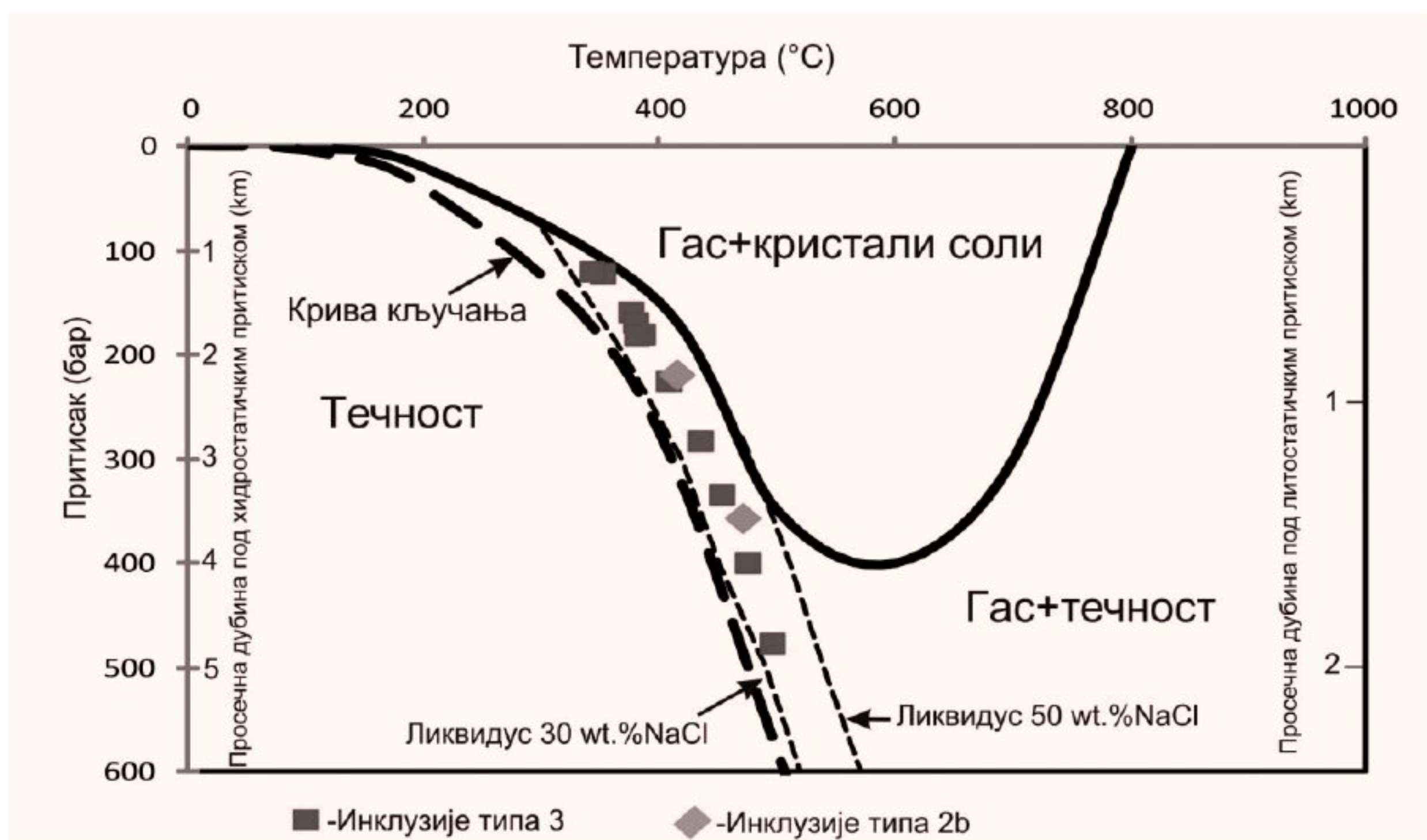
Резултати добијени мерењем старости циркона из хидротермалног рудоносног система Чукару Пеки указују да је депоновање минерализације започело пре око  $86,78 \pm 0,23$  Ма, што се поклапа се са првом вулканском фазом Тимочког магматског комплекса. Крај минерализационог процеса је обележен утискивањем млађих неминерализованих п10 дајкова, пре  $85,19 \pm 0,09$  Ма (Велојић, 2021).

У почетним стадијумима формирања хидротермалног система Чукару Пеки, из матичног интрузива су издвојени врели магматски раствори који су касније мешани са метеорским водама (Бугарин и Маринковић, 2018). Пошто је анализа флуидних инклузија показала да су у хидротермалном систему Чукару Пеки били присутни флуиди високе температуре и салинитета (преко  $400^{\circ}\text{C}$  са 30-40 теж.% NaCl екв.) закључено је да су ови флуиди вероватно били магматског порекла (Velojić et al., 2020). На присуство метеорских флуида у саставу хидротермалних раствора указују флуидне инклузије ниског салинитета и температуре хомогенизације, као и присуство нискотемпературних алтерација (попут широко распрострањене аргилитске алтерације у прелазној епитермалној зони).

На основу аналогије са Борским лежиштем бакра и злата и на основу стабилности различитих минералних фаза у систему Чукару Пеки (Gržetić, 1992), као и изучавања гасно-течних инклузија (Velojić et al., 2020), претпоставља се је пренос рудних елемената вршен хидротермалним флуидима чија је рН вредност била између 7 и 2 (неутрална до веома кисела) и који су били редукционог карактера (са вредностима Eh између 0 и -0,5), док је депоновање рудних минерала извршено у процесу кључања високотемпературних хидротермалних раствора на температурама између  $350^{\circ}\text{C}$  и  $450^{\circ}\text{C}$ , при салинитету флуида између 28 и 43 теж.% NaCl екв. и притисцима између 100 и 500 бара. На основу дијаграма односа притиска и температуре приказаним у Redmond et al. (2004), овај притисак одговара варирањима између литостатичког и хидростатичког притиска на дубинама између 1 km и 2 km (слика 3).

Sillitoe (2017) сматра да је Горња (високосулфидациона) зона лежишта Чукару Пеки формирана у зони полимиктне интрузивне брече током 5 стадијума:

1. Алтерација вулканске брече напредном аргилитском алтерацијом.
2. Замењивање алтерисане брече ситнозрним пиритом.
3. Депоновање мањих, неправилних нагомилања браон силиције која прекрива пирит.
4. Образовање пиритско-енаргитских жица.
5. Формирање пиритско-ковелинских жица.



Слика 3: Дијаграм односа притиска и температуре за NaCl-H<sub>2</sub>O систем (модификовано према Redmond et al., 2004), на коме су приказане израчунате вредности притиска сланих инклузија формираних процесом кључања из порфирског система Чукару Пеки. Модификовано из Velojić et al. (2020).

На депоновање високосулфидационе минерализације велики утицај су имале интрузивно-хидротермалне брече формиране путем фреатомагматске или фреатске ерупције флуида под притиском (закључци су базирани на анализама језгра бушотина из хидротермалног система Чукару Пеки; Велојић, 2021) Бречизирање стена у овом систему се одвијало у два стадијума:

1) Интрузивно бречизирање, које се карактерише матриksom од уситњеног стенског праха, а су фрагменти заобљени, мономиктни и добро сортирани. Ове брече су вероватно формиране флуидизацијом стена дејством врелих киселих раствора.

2) Колапсно бречизирање, код кога је матрикс брече такође од уситњеног стенског праха, док су фрагменти угласти, полимиктни и лоше сортирани. Ове брече су вероватно формиране урушавањем материјала након наглог утискивања раствора.

На основу аналогије са високосулфидационим делом Борског лежишта, могу се донети закључци о карактеристикама хидротермалних флуида у високосулфидационом делу система Чукару Пеки. Према Gržetić (1992) хидротермални флуиди у високосулфидационом делу Борског лежишта били су веома врели (око 300°C) и имали су високу фугасност сумпора, са рН вредношћу између 5,5 и 3,5. Слично томе, Кожељ (2002) наводи да је температура хидротермалних флуида из високосулфидационих лежишта у Борској зони била око 130-250°C, са рН мањим од 4 и високом фугасношћу сумпора и арсена.

## ЗАКЉУЧАК

Хидротермални систем Чукару Пеки се може дефинисати као порфирски Cu-Au систем са развијеном високосулфидационом минерализацијом (Cu-As-Au)



масивно-сулфидног типа. Његов настанак је слично другим порфирским лежиштима у Борској металогенетској зони, везан за прву фазу развоја Тимочког магматског комплекса. У овом систему се могу издвојити три зоне минерализације: Горња (високосулфидациона), прелазна епитермална зона и Доња (порфирска) зона.

Минерализација бакра и злата у Доњој зони је настала у два стадијума: 1) порфирском који је формиран у температурном интервалу од 600-400°C и 2) епитермалном, на температурама око 300-200°C. Спроведена испитивања флуидних инклузија указују да је депоновање минерализације бакра и злата извршено услед кључања хидротермалног раствора на температурама између 350°C и 450°C.

Редослед депоновања рудних жица у порфирском стадијуму је следећи:

- 1) Кварцне жице типа А без рудних минерала;
- 2) Кварцне жице типа Б са халкопиритом, борнитом и пиритом;
- 3) Пиритске жице типа Д са пиритом, халкопиритом и борнитом;
- 4) Магнетитске жице са хематитом, пиротином и халкопиритом.

Најважнији стадијум за депоновање бакра и злата у овом делу система биле су кварцне жице типа Б. Пиритске жице типа Д и магнетитске жице такође садрже повишене садржаје бакра, али у знатно мањој мери од кварцних жица.

Епитермални стадијуму порфирског дела система Чукару Пеки садржи следеће типове жица:

- 1) Љубичасте анхидритске жице са пиритом, халкопиритом, ковелином и енарцитом;
- 2) Сулфидне жице са пиритом и ковелином;
- 3) Наранџасте анхидритске жице без рудних минерала.

На основу присуства ковелина и енаргита у љубичастим анхидритским жицама, може се закључити да овај тип жица вероватно садржи почетну фазу флуида из којих су депоновани масивни сулфиди у Горњој зони система.

Редослед депоновања жица и минералних парагенеза у високосулфидационом и прелазно-епитермалном делу система Чукару Пеки је следећи:

- 1) Масивни пирит (Py1);
- 2) Py-en жице са пиритом и енарцитом;
- 3) Py-сов жице са пиритом, ковелином и енарцитом;
- 4) Py2 жице са пиритом;
- 5) Маркаситске жице са арсенопиритом и сфалеритом;
- 6) Калцитско-анхидритске жице без рудних минерала;
- 7) Калцитске жице без рудних минерала.

На основу спроведених испитивања, закључује се да су најважније жице за депоновање бакра и злата у овом делу система биле Py-сов жице. Py-en жице

такође садрже високе концентрације бакра у енаргиту, али пошто не садрже ковелин, нижи је од садржаја у Ру-сов жицама.

## ЛИТЕРАТУРА

- Banješević, M. & Large, D., 2014. Geology and mineralization of the new copper and gold discovery south of Bor Timok magmatic complex. *Proceedings of the XVI Serbian Geological Congress, Serbian Geological Society, Donji Milanovac, 2014*, 739–741.
- Banješević, M., Cvetković, V., von Quadt, A., Ljubović-Obradović, D., Vasić, N., Pačevski, A. & Peytcheva, I. 2019. New Constraints on the Main Mineralization Event Inferred from the Latest Discoveries in the Bor Metallogenetic Zone (BMZ, East Serbia). *Minerals*, 9(11), 672.
- Berza, T., Constantinescu, E., & Vlad, S.N., 1998. Upper Cretaceous magmatic series and associated mineralisation in the Carpathian–Balkan Orogen. *Resource Geology*, 48(4), 291-306.
- Бугарин, М., Маринковић, В., 2018. Елаборат о минералним ресурсима и резервама бакра и злата у хидротермалном систему – лежишту Чукару Пеки, стање 31.12.2017.године, Институт за рударство и металургију, Бор, стр. 1-103
- Drovenik, M., 1961. Geološko-petrološka studija šire okolice rudnika Bor (vzhodna Srbija), Doktorska disertacija, Ljubljana, 344 str.
- Fügenschuh, B. & Schmid, S. M., 2005. Age and significance of core complex formation in a very curved orogen: Evidence from fission track studies in the South Carpathians (Romania). *Tectonophysics*, 404(1-2), 33-53.
- Gržetić, I. 1992. Fizičko-hemijska analiza sulfidnih mineralnih asocijacija u porfirskim rudnim ležištima Borske metalogenetske zone. *Tehnika- Rudarstvo, geologija i metalurgija*, broj 3-4, 203-209.
- Jakubec J., MacSporran G., Duinker P., Pittuck M., Manoljović P., Sucharda M., Samouković M., Bunyard C., Arseneau G., 2018. NI 43-101 Technical Report-Timok Copper-Gold Project, Serbia: Upper Zone Prefeasibility Study and Resource Estimate for the Lower Zone, Nevsun Resources Ltd, 1-427.
- Јанковић, С., 1990. Рудна лежишта Србије: регионални металогенетски положај, средине стварања и типови лежишта, Рударско-геолошки факултет, Београд, 760 стр.
- Јанковић, С., Јеленковић, Р. & Кожељ, Д., 2002. Борско лежиште бакра и злата. QWERTY, Бор, 298 стр.
- Jelenković, R., Milovanović, D., Koželj, D., & Banješević, M., 2016. The mineral resources of the Bor metallogenic zone: a review. *Geologia Croatica*, 69 (1), 143-155.
- Knaak, M., Márton, I., Tosdal, R. M., Van der Toorn, J., Davidovic, D., Strmbanovic, I. & Hasson, S. 2016. Geologic setting and tectonic evolution of porphyry Cu-Au, polymetallic replacement, and sedimentary rock-hosted au deposits in the northwestern area of the timok magmatic complex, Serbia. Serbia: *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 19, 1-28.
- Kolb, M., von Quadt, A., Peytcheva, I., Heinrich, C. A., Fowler, S. J., & Cvetković, V., 2013. Adakite-like and normal arc magmas: distinct fractionation paths in the East Serbian segment of the Balkan–Carpathian arc. *Journal of Petrology*, 54(3), 421-451.
- Koželj, D., 2002. Epitermalna mineralizacija zлата borske metalogenetske zone: morfogenetski tipovi, strukturno-teksturni varijeteti i potencijalnost. RTB Bor, Institut za bakar, Indok centar, 220 str.
- Neubauer, F., 2002. Contrasting Late Cretaceous with Neogene ore provinces in the Alpine-Balkan-Carpathian-Dinaride collision belt: *Geological Society London Special Publication* 204, 90–100.

- Redmond, P. B., Einaudi, M. T., Inan, E. E., Landtwing, M. R., & Heinrich, C. A., 2004. Copper deposition by fluid cooling in intrusion-centered systems: New insights from the Bingham porphyry ore deposit, Utah. *Geology*, 32(3), 217-220.
- Velojić, M., Jelenkovic, R., & Cvetkovic, V., 2020. Fluid Evolution of the Čukaru Peki Cu-Au Porphyry System (East Serbia) inferred from a fluid inclusion study. *Geologia Croatica*, 73(3), 197-209.
- Велојић, М. 2021. Генеза хидротермалног Cu-Au система Чукару Пеки (источна Србија), докторска теза, Рударско-геолошки факултет, Београд
- von Quadt, A., Peytcheva, I., Heinrich, C., Cvetković, V., Banjesević, M. and Andrew, C.J., 2007. Upper Cretaceous magmatic evolution and related Cu–Au mineralization in Bulgaria and Serbia. In *Ninth Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits SGA, Dublin. Dublin: Irish Association for Economic Geology*, 861-864.

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les années 2022

REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022

Beograd, 2023

**Dragana Đurić<sup>1</sup>**

## PRIMENA SAR INTERFEROMETRIJE ZA ODREĐIVANJE KOSEIZMIČKIH DEFORMACIJA: TRENDovi I DOSTIGNUĆA

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД - PAPER

**Apstrakt:** U radu je prikazan pregled razvoja, metodologije i primene radara sa sintetičkom blendom (*eng: Synthetic Aperture Radar - SAR*), interferometrijskog SAR-a (InSAR) i pratećih tehnika, za potrebe proučavanja i detekcije kretanja po rasedima usled zemljotresa magnitude preko 5. Primarna upotreba diferencijalne radarske interferometrije (DInSAR) je utvrđivanje 1 D pomeranja, odnosno pomeranja u pravcu pogleda senzora (LOS). Zapravo, ova veličina je jedina veličina koja se može dobiti direktnim očitavanjem sa SAR snimaka, odnosno InSAR-a i njihovom obradom. Dalje razlaganje na komponente uključuju 2D, odnosno pomeranja u pravcu gore/dole (sa učešćem pomeranja u pravcu sever/jug) i istok/zapad. Razlaganje na 3D komponente je kompleksnija i razvijeno je nekoliko modula za njihovo određivanje, koji mogu uključivati pored SAR podataka i podatke optičkih snimaka, GPS podatke, ali i podatke azimuta leta satelita i upadnog ugla snimanja, kao i druge.

Svi podaci, prezentovani u ovom radu uključuju podatke otvorenog i javno dostupnog tipa, odnosno podatke Sentinel misije, kao i ostale dostupne podatke od javnog značaja. Obrada podataka je vršena u, takođe, otvorenim i besplatnim programskim paketima, SNAP i SNAPHU, kao i MicMac/StaMPS. U radu su dati koraci obrade podataka i primenjene metodologije, koja je praćena realnim primerima.

Glavni pravac razvoja upotrebe InSAR-a se ogleda u javnoj dostupnosti snimaka i njihovoj masovnoj primeni, kroz umrežavanje istraživača i razmena podataka, rezultata i informacija. Evropska svemirska agencija (ESA), sprovodeći Kopernikus program, kroz obuke, kakav je bio TAT-6 teži ka uspostavljanju ovakve mreže istraživača i širokoj primeni postupaka obrade javno dostupnih podataka i programa.

**Ključne reči:** DInSAR, zemljotres, rased, komponente kretanja, otvoreni podaci

## UVOD

Zemljotresi su jedan od najvećih prirodnih hazarda, koji generišu veliku materijalnu i nematerijalnu štetu. Nakon pojave većeg zemljotresa (magnituda iznad 5) od velike važnosti je pravovremeno reagovanje i eventualno lociranje pogođenih

---

<sup>1</sup> Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija  
dragana.djuric@rgf.bg.ac.rs

područja kao i logistika pri realizaciji humanitarnih i spasilačkih misija ukoliko su neophodne. Često su štete od zemljotresa tolike da nije moguće fizički doći do svih pogođenih područja usled značajnih oštećenja saobraćajne infrastrukture. U ovim slučajevima od velike pomoći može biti primena daljinske detekcije i to u vidu upotreba podataka radara sa sintetičkom blendom (SAR), odnosno SAR interferometrije (InSAR). Pored navedenog, mogućnost utvrđivanja dinamike aktivnih raseda je od velikog značaja za naučnu javnost i istraživače.

Sam koncept SAR-a razvio je Carl Wiley 1951. godine (Wiley, 1965), da bi naučnoj javnosti postao jasan značaj upotrebe SAR-a u geonaukama tek 1978. godine, kada je lansirana prva SAR misija (SEASAT-SAR). Iako je u orbiti bila samo 105 dana, dala je značajne i dobre podatke, koji su kasnije primenjivani u geonaukama, ali i u inženjerskim naukama. Tokom druge polovine XX veka ubrzan je i omasovljen razvoj SAR misija, pa samim tim i tehnike njihove obrade tj. procesiranja, proširene su oblasti njihove primene, a naročito je napredovala SAR interferometrija, koja se prvi put 1993. godine pominje u kontekstu utvrđivanja koseizmičkih deformacija u čuvenom časopisu *Nature* (Massonnet et al., 1993) i tom prilikom skreće veliku pažnju naučne javnosti.

Razvoj tehnike ide u pravcu proračuna deformacija u pravcu pogleda senzora (LOS), kada je neophodno analizirati interferograme pre i nakon zemljotresa iz jedne putanje leta senzora. Upotrebom parova snimaka iz dva pravca leta (uzlazni i silazni) moguće je računati pomeranja u vertikalnom i horizontalnom pravcu. U publikacijama je predstavljeno i predloženo nekoliko DInSAR algoritama, koji koriste vremenske serije (Bagnardi & Hooper, 2018; Bechor, 2006; Chen et al., 2020; Canizares et al., 2019; Decriem et al., 2010). Kako je dostupan veliki broj SAR snimaka prikupljenih sa nekoliko radaskih sistema različitih karakteristika, uključujući i različite talasne dužine, vremenske serije, opsege, različite pravce snimanja, postavlja se zadatak usklađivanja podataka i njihovo međusobno kombinovanje. Zahvaljujući ovome, moguće je prevazići glavno ograničenje DInSAR tehnike, koja je prevashodno primenjivana u određivanju pomeranja u LOS pravcu i odrediti i 3D komponente kretanja, odnosno pomeranja u pravcu istok-zapad, gore-dole i sever-jug (Canizares, 2020). U poslednje vreme je predloženo nekoliko algoritama za rešavanje 3D komponenti kretanja, koje su zasnovane na kombinovanju merenja iz više uglova, kombinovanjem InSAR podataka sa GPS, GNSS podacima, ali i optičkim snimcima (Canizares, 2020; Emery & Camps, 2017; ESA, 2007; ESA, 2012; Fiako, 2001; Fielding et al., 2019; Gabriel et al., 1989).

## STUDIJA SLUČAJA

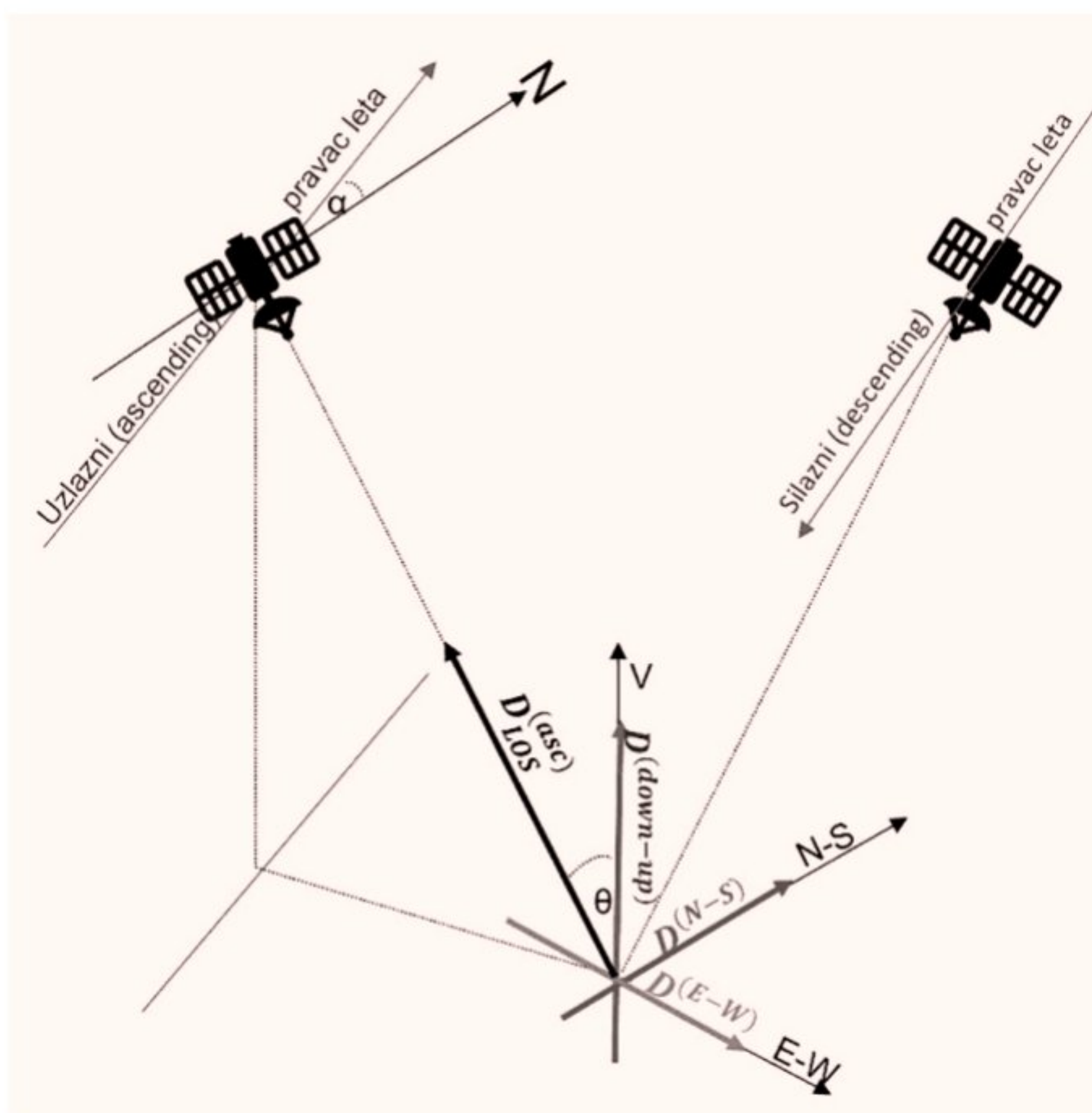
U cilju prikaza mogućnosti metodologije i rezultata korišćen je primer izuzetno snažnog zemljotresa, magnitude 7,3 na dubini od 25 km, koji je 12.11.2017. godine pogodio pogranično područje Iran-Irak. Ovaj potres odneo je preko 600 ljudskih života i ostavio veoma veliku materijalnu štetu na pogođenom području.

Epicentar je lociran u zoni kolizije Arapske i evroazijske ploče, tačnije severozapadno od Zagros planine, čije je izdizanje direktno povezano sa kolizijom. Zemljotres je posledica kretanja po rasedu kosog navlačenja. Lokacija zemljotresa, njegova dubina, kao i rešenja fokalnog mehanizma (earthquake.usgs.gov) su,

generalno, u saglasnosti sa rupturnim sklopom (Dilek et al., 2009) na području granica dveju ploča.

## PODACI

Sentinel 1 misija (A i B) je SAR misija, čije putanje prate polarne orbite sa uzlaznim (*ascending*) i silaznim (*descending*) pravcima leta u odnosu na sever. U oba slučaja satelit uvek snima područje koje se nalazi sa njegove desne strane (Slika 1), a isto područje se snima dva puta, sa različitom geometrijom i u različito vreme (Mora et al, 2016).



Slika 1. Uzlazna i silazna putanja satelita,  $\alpha$ - azimut leta satelita,  $\theta$ - upadni ugao snimanja, LOS- pravac spogleda senzora,  $D_{LOS}^{(asc)}$  - deformacija u LOS pravcu sa uzlaznog pravca kretanja, V- vertikalni pravac, N-S- pravac sever-jug, E-W- pravac istok-zapad,  $D^{(N-S)}$ - deformacija u pravcu sever-jug,  $D^{(E-W)}$ - deformacija u pravcu istok-zapad,  $D^{(down-up)}$ - deformacija u pravcu gore-dole

Figure 1. Sentinel 1 ascending and descending trajectory,  $\alpha$ -range angle,  $\theta$ -LOS,  $D_{LOS}^{(asc)}$  – LOS deformation from the ascending mode,  $D^{(N-S)}$  N-S deformation,  $D^{(E-W)}$  E-W deformation,  $D^{(down-up)}$  vertical deformation

Osnovne karakteristike Sentinel 1 misije su snimanje u C kanalu, pri čemu kvalitet podataka i mogućnost snimanja ne zavisi od doba dana, a koje podrazumeva opseg frekvencija 4 – 8 GHz; talasne dužine 3,75 – 7,5 cm unutar mikrotalasnog, radarskog dela elektromagnetskog spektra, zbog čega ne mogu prodirati duboko kroz gustu vegetaciju. Sentinel 1 misija vrši merenja u jednom od četiri režima akvizicije: Stripmap (SM) režim; Interferometrijski režim širokog zahvata snimka (IW), koji su i

najčešće korišćeni; Režim ekstra širokog zahvata snimaka (EW); Talasni režim (WV). IW snimci obuhvataju tri snimka tzv. „*single look*“ (SL) zahvaljujući snimanju terena sa progresivnim skeniranjem SAR-a (TOPSAR) i sadrže podatke u širini od 250 km, sa prostornom rezolucijom od 5 x 20 metara. SAR senzori imaju specifičnu geometriju akvizicije, pri čemu je pravac snimanja (LOS) pod uglom  $\theta$ , koji kod Sentinel C-SAR instrumenta iznosi između 20° i 46° (Mora et al, 2016). Sentinelov SAR instrument u C-opsegu, kod IW režima podržava rad sa jednostrukom i dvostrukom polarizacijom. Svaki od režima generiše proizvode u različitim nivoima, od koji su korišćeni Level-1 SLC (*Single-Look Complex*) i Level-1 GRD.

Princip otvorenih i besplatnih podataka, omasovio je korišćenje i primenu SAR podataka Sentinel misije. Ovi snimci su, radi ilustracije postupaka korišćeni u radu, a njihove karakteristike su prikazane u tabeli 1. Podaci Sentinel 1 misije se mogu pretraživati, pregledati i preuzimati na lokalni računar sa sajta: <https://scihub.copernicus.eu/>, pri čemu je neophodno prilikom odabira podataka definisati prostor, datum snimanja, putanju leta (uzlazna, silazna), Platformu (Sentinel 1 A ili B), tip podataka (SLC, GRD, OCN, RAW), i polarizaciju (VV, HH, VH, VH, HH+HV, VV+VH).

Tabela 1. Osnovni podaci o korišćenim SAR snimcima

Misija	Datum snimanja	Pravac leta	Režim	Polarizacija	Namena	Tip proizvoda
Sentinel 1 A	06.11.2017.	Uzlazno (ascending)	IW	VV VH	Glavni	SLC
	18.11.2017.				Podređeni	
	07.11.2017.	Silazno (descending)			Glavni	
	19.11.2017.				Podređeni	

## SAR INTERFEROMETRIJA (InSAR)

SAR interferometrija (InSAR) predstavlja jednu od značajnijih primena SAR snimaka (Massonnet i Feigl, 1998; Massonnet et al., 1993). SAR interferometrija koristi fazne razlike parova SAR snimaka koji su sačinjeni u različito vreme i sa različitim orbita leta, tako da isti pikseli imaju iste vrednosti amplitude, a različite faze, u cilju proračuna visine topografije, promene površine terena tokom vremena, uključujući i deformacije, odnosno koseizmičke deformacije (Pepe, 2019).

Vremensko kašnjenje signala izražava se kao fazno pomeranje između rasutog i originalnog signala. Ukoliko je došlo do pomeranja površine terena usled tektonskih ili drugih uticaja, faza podređenog snimka će se razlikovati u odnosu na glavni snimak (Heck et al, 2010). Postupak generisanja interferograma obuhvata standardnu proceduru koja uključuje dva SAR snimka, pri čemu je izlaz interferogram u opsegu  $-\pi$  do  $\pi$  i gde svaki otisak predstavlja jedan pomak od oko 2,8 cm. Interferogram je polazni, odnosno ulazni podatak za dalju obradu. Otisci na intefreogramu ukazuju na pojavu deformacija u pravcu pogleda senzora (LOS).

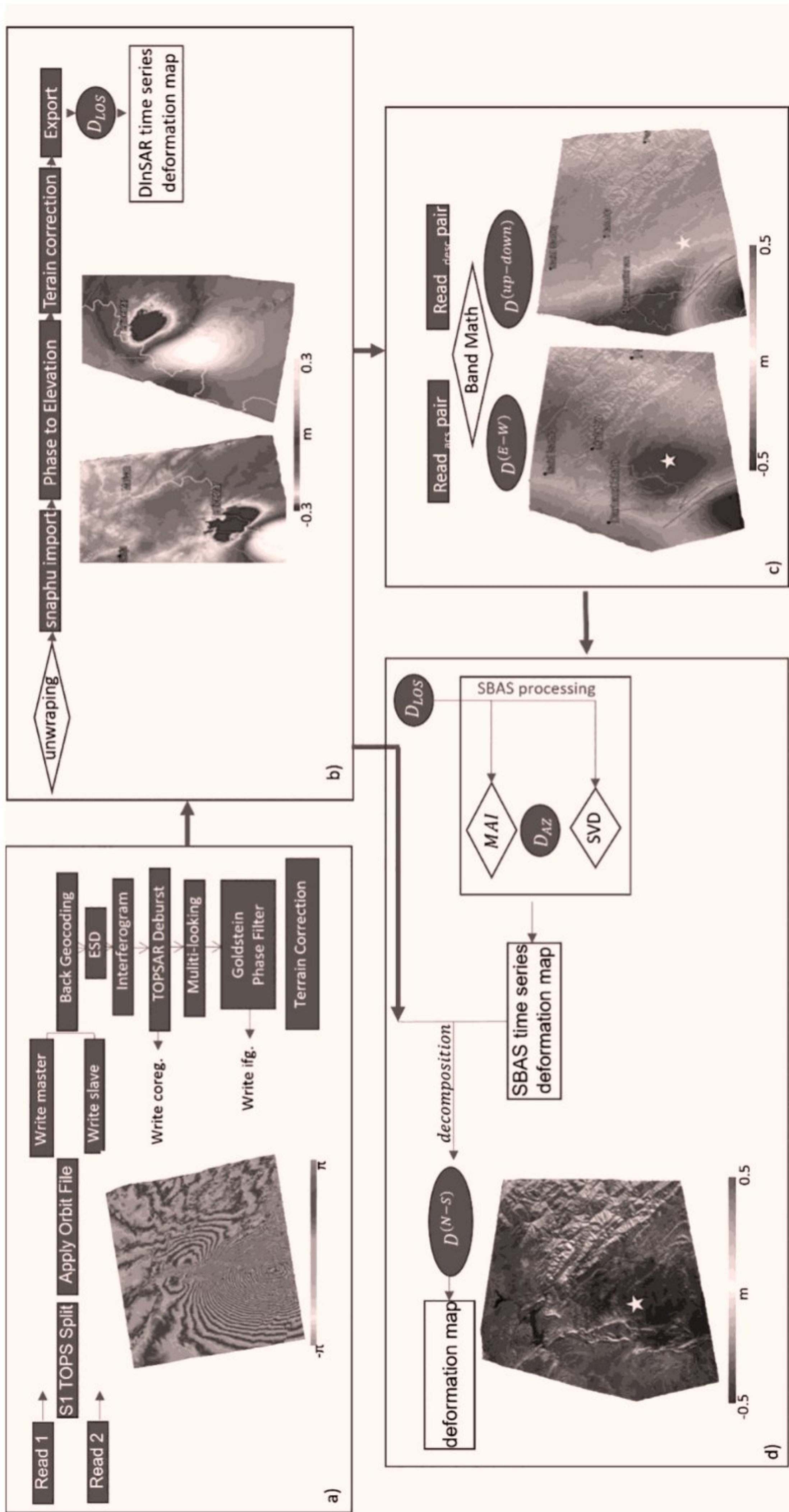
Prilikom generisanja interferograma korišćen je standardan postupak u Sentinel aplikacionoj platformi (SNAP), detaljno opisan u Đurić & Ilić (2018), a koji je prikazan na slici 2a. Za izradu interferograma (Slika 2a) korišćeni su parovi snimaka načinjeni pre i nakon zemljotresa, oba pravca leta. Na taj način generisana su dva interferograma, jedan za uzlazni režim, drugi za silazni režim, koji nedvosmisleno ukazuju da je na terenu došlo do deformacije.

## **DInSAR – 1D- LOS pravac deformacija**

Diferencijalna satelitska radarska interferometrija (DInSAR) je mikrotalasna tehnika u okviru daljinske detekcije, koja se koristi za proučavanje površinskih deformacija sa centimetarskom do milimetarskom preciznošću. Ova tehnika koristi razliku u fazi dva SAR snimka načinjenih iznad iste površine, ali u različito vreme (Slika 1). Primenom DInSAR tehnike, dobija se karta površinskih deformacija projektovana duž LOS pravca (Lanari et al., 2007). Moguće je primeniti nekoliko načina za generisanje diferencijalnog interferograma, pri čemu je najčešće korišćen način koji podrazumeva upotrebu jednog para SAR snimaka i bazne linije bliske nuli. Obradom svakog snimka, prikupljaju se informacije neophodne za izradu digitalnog elevacionog modela (DEM) područja, koje pokriva snimak. Uz podatke DEM-a, DInSAR tehnika omogućava računanje deformacija tla (Ullo et al., 2019) u LOS pravcu u deliću talasne dužine, ukoliko je koherencija, koja kod interferograma ukazuje na nivo korelacije, između dva SAR snimka dovoljno visoka. Vrednosti koherencije su u opsegu od 0 do 1 (u idealnom slučaju 1). Lokalna koherencija je kros-korelacija koeficijentata dva SAR snimka, procenjenih iznad malog prozora (par piksela i azimut), a utvrđene fazne komponente su linearne i u azimutu i u razdaljini (Ferretti et al., 2007).

Korišćenjem referentnih distanci između satelita i objekta na Zemlji, kao i DEM-a, računa se fazna razlika između dva SAR snimka (Vollrath et al., 2017). Ulazni podatak je interferogram (Sl. 2a) koji zahteva dvodimenzionalno (2D) fazno odvijanje (Sl. 2b). 2D fazno odvijanje se vrši u sklopu statističke procene nedvosmislenih podataka o fazi iz 2D niza poznatog samo po modulu  $2\pi$  rad (Chen and Zebker, 2001). Fazno odvijanje je vršeno u nezavisnoj aplikaciji SNAPHU (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping). Nakon učitavanja odvijene faze u dalji program za obradu (SNAP), vrednosti faze se transformišu u vrednosti visina, na koje se dodatno primenjuje korekcija za teren. Izlazna vrednost je deformacija u LOS pravcu (Sl. 2b). Na ovaj način kreirane su vremenske serije karata DInSAR deformacija u LOS pravcu za oba režima leta, koje ukazuju da je u severoistočnom delu terena došlo do pomeranja ka senzoru, odnosno da je u jugozapadnom delu došlo do kretanja od senzora. Kumulativne vrednosti, koje je moguće proceniti na ovakav način, iznosile su 0,6 m.





Slika 2. Šema obrade SAR snimaka za izradu (epicentar: usgs.or, rupturni sklop: McQuarrie, 2004) a) Interferogramske faze; b) Karte deformacija tla u LOS pravcu – uzlazna i silazna putanja satelita; c) Karta deformacija u istok-zapad (E-W) i vertikalnom (up-down) pravcu; e) Karta deformacija u pravcu sever-jug (N-S)

Figure 2. SAR image processing scheme (epicenter: usgs.or, rupture assembly: McQuarrie, 2004) for a) Interferogram phase; b) Maps LOS deformations (ascending and descending); c) Map of E-W and vertical (up-down) deformations; d) Map of N-S deformation

## DInSAR – 2D- vertikalna i horizontalna (istok-zapad) komponenta deformacija

Za razdvajanje na komponente istok-zapad (E-W) i vertikalnu (gore-dole) iz utvrđenih pomeranja u LOS pravcu, neophodno je obraditi podatke istog područja i u uzlaznom i u silaznom režimu, koristeći parove snimaka načinjene pre i nakon događaja. Ovaj proces je moguće sprovesti u okviru SNAP programa korišćenjem *Band Math* prozora (Sl. 2c), kao i u drugim otvorenim i besplatnim programima MicMac i StaMPS, ali i u COSI-Corr ENVI programu, GAMMA, komercijalnim programima, koji su namenjeni pre svega za PSInSAR (engl. *Persistent Scatterer InSAR*).

Matematička pozadina utvrđivanja 2D deformacija svodi se na zbir uzlaznih/silaznih LOS-projektovanih pomeranja, koji je povezan sa vertikalnom komponentom deformacije tla (u čiju sumu ulaze i deformacije u pravcu sever-jug), dok je razlika uzlaznih/silaznih vezana za E-W komponentu deformacije (Slika 1). Kada su LOS uglovi,  $\theta$ , u uzlaznom i silaznom režimu približno iste vrednosti mogu se izračunati:

$$D_{LOS}^{(E-W)} \approx \frac{D_{LOS}^{(desc)} - D_{LOS}^{(asc)}}{2\sin\theta} \quad \text{i} \quad D_{LOS}^{(up-down)} \approx \frac{D_{LOS}^{(desc)} + D_{LOS}^{(asc)}}{2\cos\theta} \quad [1]$$

gde je  $\theta$  LOS ugao,  $D_{LOS}^{(asc)}$  je deformacija u LOS pravcu sa uzlaznog pravca kretanja,  $D_{LOS}^{(desc)}$  deformacija u LOS pravcu u silaznom pravcu kretanja.

Odnosno, kada je LOS ugao ima različite vrednosti za uzlaznu i silaznu putanju (Mora et al., 2016):

$$\begin{bmatrix} -\cos(\theta_{as})\sin(\theta_{as})\cos(\alpha_{asc}) \\ -\cos(\theta_{desc})\sin(\theta_{desc})\cos(\alpha_{desc}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} D_{LOS}^{(asc)} \\ D_{LOS}^{(desc)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{(E-W)} \\ D^{(down-up)} \end{bmatrix} \quad [2]$$

gde  $\theta_{as}$  predstavlja LOS ugao sa uzlaznog pravca kretanja, dok  $\theta_{desc}$  predstavlja LOS sa silaznog pravca kretanja,  $\alpha_{asc}$  predstavlja vrednost azimuta po kojem se kreće satelit u uzlaznom pravcu kretanja, dok je  $\alpha_{desc}$  predstavlja vrednost azimuta po kom se kreće satelit u silaznom pravcu kretanja.

Na osnovu utvrđenih vrednosti deformacija kreirane su karte deformacija u E-W vertikalnom pravcu (Sl.2c). Rezultati ukazuju na izdizanje terena južno od epicentra u iznosu od oko 0,4 m, na spuštanje terena od oko 0,2 m u okolini epicentra, kao i na pomeranje u pravcu istoka u iznosu od oko 0,5 m.

## DinSAR – 3D – vertikalna, istok-zapad i sever-jug komponente deformacija

Jedan od većih izazova u obradi InSAR podataka je izdvajanje komponente kretanja sever-jug (N-S) zbog činjenice da se orbita satelita skoro poklapa sa polarnom orbitom. Kako bi razdvajanje sve tri komponente bilo moguće, neophodno je u analizu uključiti GPS, odnosno GNSS podatke ili prilikom obrade koristiti otklone azimuta leta i LOS uglova u svakom pikselu (engl. *range (LOS) offset /azimuth offset*) korišćenjem SBAS (engl. *Small baseline subset*) algoritma (Sl. 2d). Algoritam uključuje ulazne

podatke vremenskih serija deformacija u LOS pravcu i podatke SVD postupka (eng. *singular value decomposition*), pri čemu se za odedivanje odklona azimuta, najčešće koristi MAI metod (engl. *multi-aperture radar interferometry*) (Ren i Feng, 2020).

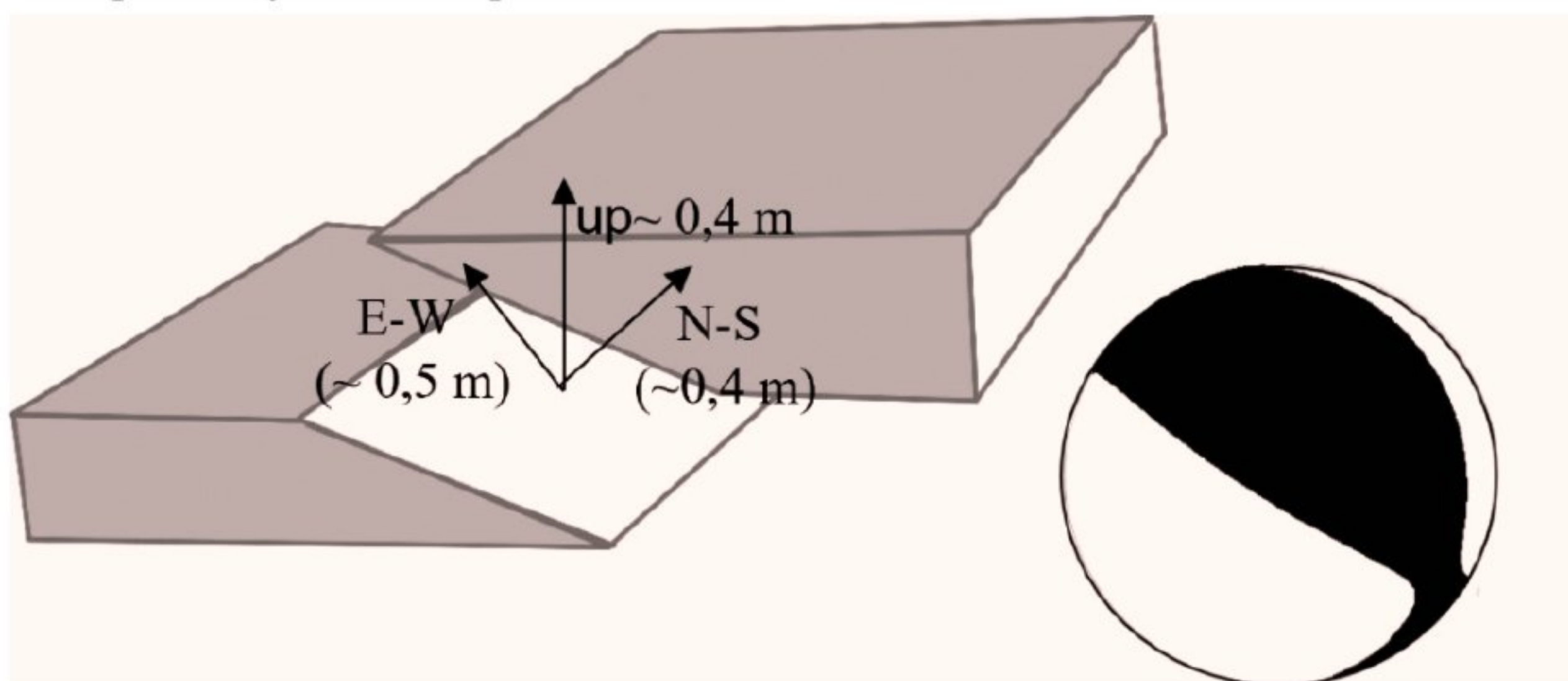
Pomeranje u LOS pravcu,  $D_{LOS}$ , predstavlja vektorski zbir pomeranja u vertikalnom i horizontalnom pravcu (sever-jug i zapad-istok), pri čemu je osetljivost u vertikalnoj komponenti veća od one u horizontalnoj usled slabe osetljivosti na pomeranja u pravcu sever-jug. Deformacija zapad-istok je usko povezana sa upadnim uglom snimanja,  $\theta$ . Transformacija u 3D komponente (Sl.2d) obavljena je u skladu sa odnosnom, koji je predložio Shi et al. (2018):

$$\begin{bmatrix} D_{LOS} \\ D_{AZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) - \sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) & -\sin(\theta) - \cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) \\ 0 - \cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) & \sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D^{(up-down)} \\ D^{(E-W)} \\ D^{(N-S)} \end{bmatrix} \quad [3]$$

gde je  $D^{(N-S)}$  deformacija u pravcu sever-jug, pri čemu je deformacija u pravcu azimuta ( $DAZ$ ) definisana (Hanssen, 2001; Wang et al., 2018) kao:

$$D_{AZ} = \left[ -\cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) * \sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) \right] \begin{bmatrix} D^{(E-W)} \\ D^{(N-S)} \end{bmatrix}$$

Na osnovu rezultata karte deformacija u N-S pravcu, utvrđeno je kretanje prema severu u iznosu od oko 0,4 m (Sl. 2d). Upoređujući rezultate InSAR podataka sa rešenjima fokalnog mehanizma zemljotresa (USGS), moguće je prostorno rekonstruisati kretanje u sve tri ravni u prostoru (Sl. 3). Rezultati istraživanja ukazuju na izuzetno kompleksno kretanje po rasedu i kretanje velikog intenziteta i iznosa. Podaci, dobijeni upotrebom SAR interferometrije i pratećih postupaka obrade, upoređeni su sa drugim dostupnim podacima (Zare et al., 2017; Feng et al., 2018) pri čemu je utvrđeno da se rezultati pravaca i iznosa pomeranja u velikoj meri poklapaju. Geodetska osmatranja na terenu su dala vrlo slične rezultate, ali ti podaci nisu korišćeni za analizu u radu, već za samo poređenje izlaznih podataka.



Slika 3. Šematski prikaz rekonstrukcije koseizmičkog kretanja i iznosa kretanja po rasedu pravca pružanja SZ-JI i fokalni mehanizam zeljotresa (earthquake.usgs.gov)

Figure 3. Schematic reconstruction of cosmic displacement along the NW-SE fault and the focal mechanism (earthquake.usgs.gov)

## ZAKLJUČAK I DISKUSIJA

Definisanje komponenti kretanja na osnovu SAR snimaka razvija se preko dve decenije, međutim, i dalje ostaje prostora za poboljšanje, naročito u pravcu dobijanja što kvalitetnijih podataka o sve tri komponente kretanja. Iako je putanja satelita ograničavajući faktor, postoje načini da se prevaziđe upotrebom dodatnih tehnika i podataka. Za osnovno raščlanjivanje komponenti, odnosno 2D, dovoljni su podaci InSAR i to par iz uzlazne putanje i par iz silazne putanje satelita, pri čemu par podrazumeva snimke istog područja načinjene pre i nakon potresa. Drugi ograničavajući faktor je magnituda zemljotresa, koja mora biti minimum 5.

Prepoznajući značaj i moguće benefite, Evropska svemirska agencija, kroz program Kopernikus, razvila je i načinila javno dostupnim podatke Sentinel misija, ali i i programske pakete u kojima je moguće izvršiti obradu (SNAP). Glavni pravac razvoja je u dostupnosti i širokoj, masovnoj primeni uz uključivanje ostalih javno dostupnih podataka, kao što su podaci sa servera USGS-a i ostalih. Umrežavanje istraživača i razmena podataka, rezultata i informacija, kroz obuke (kao što je TAT-6, 2018) u cilju stvaranja baze podataka istraživača ali i rezultata koji bi mogli potencijalno biti korišćeni za brzo reagovanje u kriznim situacijama. Osim toga, rešavanje dinamike aktivnih raseda na određenom prostoru ostavlja mogućnost unapređivanja saznanja istraživača i naučne zajednice koja se bavi datom problematikom.

Bitno je napomenuti da se opisana metodologija može primeniti i u druge svrhe, kao što je praćenje aktivnosti vulkana, dinamike klizišta, gde se češće koristi PSInSAR, ali i poplava, šumskih požara i sl.

## ZAHVALNICA

Rad sproveden zahvaljujući „Ugovoru o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2022. godini“, br. 451-03-68/2022-14/ 200126. Ličnu zahvalnost dugujem prof. Vesni Cvetkov, čije su sugestije i komentari u velikoj meri doprinele kvalitetu i konačnom izgledu rada.

## LITERATURA

- Bagnardi, M. and Hooper, A. 2018. Inversion of surface deformation data for rapid estimates of sources parameters and uncertainties: A bayesian approach. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19:2194–2211.
- Bechor, N. 2006. Extending Interferometric Synthetic Aperture Radar measurements from one to two dimesions. PhD dissertation, Stanford University.
- Canizares, C., 2020: „Resolving 3D coseismic deformation of the 2019 Mw 7.1 Ridgecrest earthquake using radar and optical data”, Institute of Photogrammetry Geodesy and Geoinformatics, Master of Science, 98 str.
- Canizares, C., Motagh, M., and Haghshenas Haghghi, M.2020.: Resolving 3D coseismic deformation of the 2019 Mw 7.1 Ridgecrest earthquake using radar and optical data,

- EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-13659, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-13659>, 2020
- Chen, C. and Zebker, H., 2001. "Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization," *J. Opt. Soc. Am. A* 18, 338-351.
- Chen, K., J, A., Aati, S., Milliner, C., Zheng, F., and Shi, C., 2020. Cascading and pulse-like ruptures during the 2019 ridgecrest earthquakes in the eastern california shear zone. *Nature Communication*, 11.
- Decriem, J., Árnadóttir, T., Hooper, A., Geirsson, H., Sigmundsson, F., Keiding, M., Ófeigsson, B., Hreinsdóttir, S., Einarsson, P., LeFemina, P., and Bennett, R. 2010. The 2008 may 29 earthquake doublet in sw iceland. *Geophysical Journal International*, 181:1128–1146.
- Dilek, Y., Imamverdiyev, N., Atunkaynak, S. 2009. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collisioninduced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review* 1-42, DOI:10.1080/0020681093360422.
- Duman TY, Emre O (2013) The East Anatolian fault: geometry, segmentation and jog characteristics. *Geol Soc* 372:495–529. doi:10.1144/sp372.14
- Emery, W. and Camps, A. 2017. Introduction to satellite remote sensing: Atmosphere, ocean, land and cryosphere applications. ISBN: 978-0-12-809254-5.
- ESA (2007). InSAR principles: Guidelines or sar interferometry processing and interpretation. ESA Publications, (ISBN: 92-9092-233-8).
- ESA (2012). Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services. Number ISBN: 978-92-9221-418-0. ESA Communications, Leiden.
- Feng, W., Samsonov, S., Almeida, R., Yassaghi, A., Li, J., Qiu, Q., et al. (2018). Geodetic constraints of the 2017 Mw7.3 Sarpol Zahab, Iran earthquake, and its implications on the structure and mechanics of the northwest Zagros thrust-fold belt. *Geophysical Research Letters*, 45. <https://doi.org/10.1029/2018GL078577>
- Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., and Rocca F., 2007, InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, ESA Publications, ISBN: 92-9092-233-8, ISSN: 1013-7076, 2007 European Space Agency
- Fiako, Y. 2001. The complete (3-d) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 mw 7.1 hector mine earthquake, california, from space geodetic observations. *Geophysical Research Letters*, 28:3063–3066.
- Fielding, E., Liu, Z., Stephenson, O., Zhong, M., Liang, C., Moore, A., Yun, S., and M, S. 2019. Surface deformation related to the 2019 mw7.1 and mw6.4 ridgecrest earthquakes in californiafrom gps, sar interferometry, and sar pixel offsets. *Seismological Research Letters*.
- Gabriel, A., Goldstein, R., and Zebker, H. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94:9183–9191.
- Hanssen, R. F. 2001. *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Lanari R., Casu F., Manzo M., Zeni G., Berardino P., Manunta M., and Pepe A., 2007, An Overview of the Small BAseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis, *Pure and Applied Geophysics*, 164 (2007) 637–661, 0033–4553/07/040637–25, DOI 10.1007/s00024-007-0192-9
- Massonnet D, Feigl KL. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*; 36:441-500
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, Adragna F, Peltzer G, Feigl K, Rabaute T., 1993. The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*;364:138-142, <https://doi.org/10.1038/364138a0>

- McQuarrie, N. 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran. *J Struct Geol* 26, 519–535.
- Mora O., Ordoqui P., Iglesias R., Blanco P., 2016, Earthquake Rapid Mapping Using Ascending and Descending Sentinel-1 TOPSAR Interferograms, *Procedia Computer Science*, Volume 100, Pages 1135-1140
- Pepe, A. 2019. "Generation of Earth's Surface Three-Dimensional (3-D) Displacement Time-Series by Multiple-Platform SAR Data" In *Time Series Analysis and Applications*, edited by Nawaz Mohamudally. London: IntechOpen, 2017. 10.5772/intechopen.71329
- Ren H., Feng, X. 2020. Calculating vertical deformation using a single InSAR pair based on singular value decomposition in mining areas, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 92, 102115, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102115>
- Shi, X.G., Zhang, L., Zhou, C., Li, M.H., Liao, M.S. 2018. Retrieval of time series three-dimensional landslide surface displacements from multi-angular SAR observations, *Landslides*, 15 (5) (2018), pp. 1015-1027, 10.1007/s10346-018-0975-3
- Ullo S., Addabbo P., Martire Di D., and Sica S., 2019, Application of DInSAR Technique to HighCoherence Sentinel-1 Images for Dam Monitoring and Result Validation Through In Situ Measurements, *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, PP(99):1-16, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2896989
- Veci L., 2015, SAR Basics Tutorial, Array Systems Computing Inc.
- Vollrath A., Zucca F., Bekaert D., Bonfirtè A., Guglielmino F., Hooper J. A., Stramondo S., 2017, Decomposing DInSAR Time-Series into 3-D in Combination with GPS in the Case of Low Strain Rates: An Application to the Hyblean Plateau, Sicily, Italy, *Remote Sensing*, Volume 9, Issue 1, 10.3390/rs9010033
- Wang, Z.W. , Yu, S.W., Tao, Q.X., Liu, G.L., Hao, H.D., Wang, K., Zhou, C.Y., 2018. A method of monitoring three-dimensional ground displacement in mining areas by integrating multiple InSAR methods, *Int. J. Remote Sens.*, 39 (4), pp. 1199-1219, 10.1080/01431161.2017.1399473.
- Wiley, Carl A. "Pulsed Doppler radar methods and apparatus." U.S. Patent 3,196,436, issued July 20, 1965.
- Zare, M., Kamranzad, F. Parcharidis, Is., Varvar, T. (2017). Preliminary report of Mw7.3 Sarpol-e Zahab, Iran earthquake on November 12, 2017. <https://earthquake.usgs.gov/> - pristupljeno// accessed 03.02.2020. <https://scihub.copernicus.eu/>- pristupljeno/ accessed 10.02.2020.

## **SAR INTERFEROMETRY FOR COSEISMIC DISPLACEMENT DETERMINATION: TRENDS AND ACHIEVEMENTS**

**Key words:** DInSAR, earthquake, fault, displacement component, open-source data

### **SUMMARY**

The concept of SAR was developed by Carl Wiley in 1951 (Wiley, 1965), while its importance in geosciences was established in 1978, when the first SAR mission,

SEASAT-SAR, was launched. Although it was in orbit for only 105 days, it gave very good data, which were later used in geosciences, but had great application also in engineering. Over the years, the development of SAR missions, and thus the processing techniques and application has expanded. In the context of determining cosmic deformations, it was mentioned in 1993 for the first time in the Nature Journal (Massonnet et al., 1993) and attracts scientific public attention.

After the strong earthquake (magnitude above 5), fast reaction is crucial. Location of the affected areas and organization of assistance if necessary is, also necessary. Earthquake damage is often so great that it is not possible to physically reach all affected areas. In these cases, the use of remote sensing can be very helpful, especially the use of synthetic aperture radar systems (SAR), or SAR interferometry (InSAR). In addition, determining the dynamics of active faults is of great importance for researchers and the scientific community. Such a great earthquake, magnitude 7.3, hit on 11.12.2017. Iran-Iraq border area. This earthquake took over 600 lives and left a great deal of material damage in the affected area. The epicenter is located within the collision zone of the Arabian and Eurasian plates, responsible for uplift of Zagros Mt. located northeast of affected area. This earthquake was located within the oblique thrust fault. Focal mechanism solution (earthquake.usgs.gov) and depth of earthquake, generally, coincidence with tectonic assembly of the area (Dilek et al., 2009). This event was used in this study as an example for methodology and result illustration.

The most widely used data for InSAR analysis, in recent times, and which are also used in this paper (Table 1), are the Sentinel mission data. The Sentinel 1 mission (A and B) is an SAR mission, where the range follows polar orbits ascending and descending mode. In both cases, the satellite LOS is always to the right, and the same area is recorded twice. Sentinel 1 mission data can be accessed and downloaded from the website: <https://scihub.copernicus.eu/>, where it is necessary to define the area, sensing period, flight path (ascending, descending), satellite platform (A or B), product type (SLC, GRD, OCN, RAW), and polarization (VV, HH, VH, VH, HH + HV, VV + VH).

Table 1. Sentinel 1 SAR data used in study

Mission	Date	Direction	Regime	Polarization	Used as	Product type
Sentinel 1 A	06.11.2017.	Ascending	IW	VV VH	Master	SLC
	18.11.2017.				Slave	
	07.11.2017.	Descending			Master	
	19. 11.2017.				Slave	

The basic characteristics of the Sentinel 1 mission are: recording in C channel, which includes the frequency range 4-8 GHz; wavelengths 3.75 - 7.5 cm, due to which they cannot penetrate deep through dense vegetation, but where the quality of data does not depend on the time of day. The Sentinel 1 mission work in one of four acquisition modes: Strip map (SM), Interferometric Wide Swath (IW), Extra Wide Swath (EW), Wave (WV). The most frequently used data were made in IW mode, which includes 3 images of the so-called "Single look" (SL) thanks to progressive SAR scanning

(TOPSAR) and contain data in the width of 250 km, with a spatial resolution of 5 x 20 meters. Sentinel C-SAR sensors have a specific acquisition geometry, with LOS angle ( $\theta$ ) between 20 ° and 46 ° (Mora et al, 2016). Sentinel's C-band SAR instrument supports single polarization (HH or VV) and dual polarization (HH+HV, VV+VH) in IW mode. Each of the modes generates products at different levels, of which Level-1 SLC (Single-Look Complex) and Level-1 GRD were used for SAR interferometry (InSAR) processing.

InSAR, one of the main applications of SAR data (Massonnet and Feigl, 1998; Massonnet et al., 1993), uses the phase differences of pairs of SAR images collected at different times and from different flight orbits to calculate topography altitude, change terrain surfaces over time, including deformations, i.e. cosmic deformations (Pepe, 2019). While interferograms itself could indicate deformation, a Differential SAR interferometry (DInSAR) was used for values of these deformations. DInSAR represents a microwave technique within remote sensing, which is used to study surface deformations with centimeter to millimeter precision. This technique uses the difference in phase two SAR images taken above the same surface, but at different times. Using the DInSAR technique, a map of surface deformations projected along the LOS direction was obtained (Lanari et al., 2007). Several methods can be used to generate a differential interferogram, while the most used method involving the use of a single pair of SAR images and a baseline close to zero. By processing each image, the information necessary to create a digital elevation model (DEM) of the area covered by the data is collected. In addition to DEM data, the DInSAR technique allows the calculation of terrain deformations (Ullo et al., 2019) in the LOS direction in a fraction of the wavelength, if the coherence, which indicates a correlation level in the interferogram, is high enough between two SAR images. Coherence values are ideally 1, in the range 0 to 1. Local coherence is the cross-correlation of the coefficients of two SAR images, estimated above a small window (a couple of pixels and azimuth), and the identified phase components are linear in both azimuth and distance (Ferretti et al., 2007). Using the reference distances between the satellite and the object on Earth, as well as the DEM, the phase difference between the two SAR images was calculated (Vollrath et al., 2017). Time series of DInSAR LOS deformation maps were created for both flight modes, which indicate that in the northeastern part of the terrain there was a shift towards the sensor. The cumulative values, which can be estimated in this way, were 0.6 m.

For determination of the components, i.e., east-west (E-W) and vertical (up-down) from the determined LOS deformation, it was necessary to process data from the same area in both ascending and descending mode, where the sum of ascending / descending LOS-projected displacements is related to the vertical component of terrain deformation, and the difference of ascending / descending components gives an estimate for the E-W component of deformation. This process can be carried out within the SNAP program using the Band Math window, as well as in other open and free programs MicMac and StaMPS, but also in the COSI-Corr ENVI program, GAMMA, commercial programs designed primarily for Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR). Deformations in the E-W and vertical directions, when the LOS angles,  $\theta$ , in the ascending and descending modes are approximately the same values can be calculated:



$$D_{LOS}^{(E-W)} \approx \frac{D_{LOS}^{(desc)} - D_{LOS}^{(asc)}}{2\sin\theta} \quad \text{and} \quad D_{LOS}^{(up-down)} \approx \frac{D_{LOS}^{(desc)} + D_{LOS}^{(asc)}}{2\cos\theta} \quad [1]$$

where  $\theta$  - LOS angle,  $D_{LOS}^{(asc)}$  - LOS deformation from ascending mode,  $D_{LOS}^{(desc)}$  - LOS deformation from descending mode.

If the LOS angle has different values for the ascending and descending path (Mora et al., 2016):

$$\begin{bmatrix} -\cos(\theta_{as})\sin(\theta_{as})\cos(\alpha_{asc}) \\ -\cos(\theta_{desc})\sin(\theta_{desc})\cos(\alpha_{desc}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} D_{LOS}^{(asc)} \\ D_{LOS}^{(desc)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{(E-W)} \\ D^{(down-up)} \end{bmatrix} \quad [2]$$

where  $\theta_{as}$  represents the LOS angle from the ascending direction, while  $\theta_{desc}$  represents the LOS from the descending direction,  $\alpha_{asc}$  represents the value of the azimuth in which the satellite moves in the ascending direction, while  $\alpha_{desc}$  represents the flight azimuth value for descending orbit.

Applied methodology resulted in maps of deformations in the E-W and vertical direction, that indicate an elevation southward of the epicenter of about 0.4 m, and a descent of the terrain of about 0.2 m in the vicinity of the epicenter, as well as a shift in the east direction of about 0.5 m.

As the trajectory of modern radar systems, including the Sentinel, is almost polar orbit, the component in the north-south (N-S) direction cannot be calculated in this way, and represents one of the major challenges in InSAR data processing. In order to be able to separate all three components, it is necessary to include GPS or GNSS data in the analysis or to use LOS and range offset / azimuth in each pixel using the Singular value decomposition method (SVD). To determine the azimuth offset, the Multi-Aperture radar Interferometry method (MAI) is most often used (Ren and Feng, 2020). The procedure is contained in the application of Small baseline subset (SBAS) algorithm. The offset in the LOS direction is the vector sum of the displacements in the vertical and horizontal directions (north-south and west-east), where the sensitivity in the vertical component is higher than in the horizontal due to low sensitivity to north-south deformation. The west-east deformation is closely related to the incident angle of the satellite radar. Based on SAR principles, a final transformation into 3D components expressed as (Shi et al., 2018):

$$\begin{bmatrix} D_{LOS} \\ D_{AZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) - \sin(\alpha - \frac{3\pi}{2}) & -\sin(\theta) - \cos(\alpha - \frac{3\pi}{2}) \\ 0 - \cos(\alpha - \frac{3\pi}{2}) & \sin(\alpha - \frac{3\pi}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D^{(up-down)} \\ D^{(E-W)} \\ D^{(N-S)} \end{bmatrix} \quad [3]$$

where  $D^{(N-S)}$  is N-S deformation, and azimuth deformation ( $D_{AZ}$ ) can be shown as (Wang et al., 2018):

$$D_{AZ} = \left[ -\cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) * \sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) \right] \begin{bmatrix} D^{(E-W)} \\ D^{(N-S)} \end{bmatrix} \quad [4]$$

Based on the N-S deformation map, the displacement towards the north of about 0.4 m was determined. Comparing the results of InSAR data with the solutions of the focal mechanism (earthquake.usgs.gov), it is possible to spatially reconstruct the movement in all three planes in space. The results of the research indicate extremely complex movement along the fault and movement of high intensity and amount. The data, obtained using SAR interferometry and accompanying processing procedures, were compared with other available data (Zare et al., 2017; Feng et al., 2018) and it was concluded that the results of directions and the amount of displacement largely coincide. Geodetic observations in the field gave very similar results. However, these data were not used for analysis in the paper, but only for the comparison of output data.

Defining components of deformation based on SAR images has been evolving for over two decades, however, there is still place for improvement, especially in the direction of obtaining the highest quality data on all three motion components. Although satellite trajectory is a limiting factor, there are ways to overcome it by using additional techniques and data.

Recognizing the importance and possible benefits, the European Space Agency, through the Copernicus program, has developed and made publicly available the data of the Sentinel missions, as well as software packages in which it is possible to perform processing (SNAP). The main direction of development is in the availability and wide, mass application with the inclusion of other publicly available data, such as data from the USGS and others. Networking of researchers and exchange of data, results and information, through trainings (such as TAT-6, 2018) in order to create a database of researchers but also results that could potentially be used for quick response in crisis situations. Therefore, solving the dynamics of active faults in a certain area leaves the possibility of improving the knowledge of researchers and the scientific community that deals with this issue.

It is important to note that the described methodology can be applied for other purposes, such as monitoring the activity of volcanoes, landslide dynamics, where PSInSAR is more often used, but also floods, forest fires etc.

## **ACKNOWLEDGMENT**

The study was supported by "Agreement on the realization and financing of scientific research work in 2022", no. 451-03-68 / 2022-14 / 200126. Personal acknowledge to prof. Vesna Cvetkov, whose suggestions and comments greatly contributed to the quality of the paper.

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les années 2022

REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022

Beograd, 2023

Милош Марјановић<sup>1</sup>

Miloš Marjanović<sup>1</sup>

## АНАЛИЗА ОДРОНА У СТЕНСКИМ КОСИНАМА: САВРЕМЕНИ ПРИСТУПИ

## ROCKFALLS ANALYSIS IN ROCK SLOPES: STATE-OF- THE-ART APPROACHES

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД - PAPER

**Апстракт:** У Србији и региону познате су бројне појаве одрона које су изазвале велике застоје саобраћаја, материјалне штете или чак имале фаталне исходе, па их је потребно непрестано пратити и изучавати. Моделовање одрона скопчано је са ниским нивоом поузданости, али савремене технологије омогућавају да се такви изгледи донекле побољшају. Једна од технологија која чини искорак у том правцу је *LiDAR*-ско скенирање, које обезбеђује детаљне топографске подлоге у виду облака тачака високе резолуције и тачности. Поступак анализе одрона може се свести на: карактеризацију стенске масе, одређивање зона одламања и симулацију могућих трајекторија одрона. При карактеризацији стенске масе се, у односу на конвенционалне поступке, помоћу *LiDAR*-ског скенирања тј. припадајућих облака тачака, релевантни параметри могу далеко поузданије одредити. Кинематске и анализе стабилности које се ослањају на тако добијене улазне параметре последично поузданије дефинишу нестабилне блокове. Осим наведеним анализама, зоне одламања се могу одредити и поступком систематског осматрања. И овде *LiDAR*-ско скенирање долази до изражаја јер омогућава упоређивање облака тачака скенираних у различитим периодима, чиме се могу открити чак и ситни одрони или блокови који су пред ломом. Суштина анализе одрона је дефинисање зоне утицаја и расподела енергије или брзине блока дуж његове трајекторије, чиме се добијају драгоцене информације за даље пројектовање заштитних и превентивних мера и планску изградњу инфраструктуре. У овом раду су описани савремени аспекти анализе одрона уз адекватне примере, са освртом на предности коришћења облака тачака.

**Кључне речи:** одрони, осматрање, *LiDAR*, облак тачака, моделовање

**Abstract:** Numerous examples of rockfalls causing traffic closure, material damage or even fatalities are known in Serbia and throughout the region, which is why there is a constant need

---

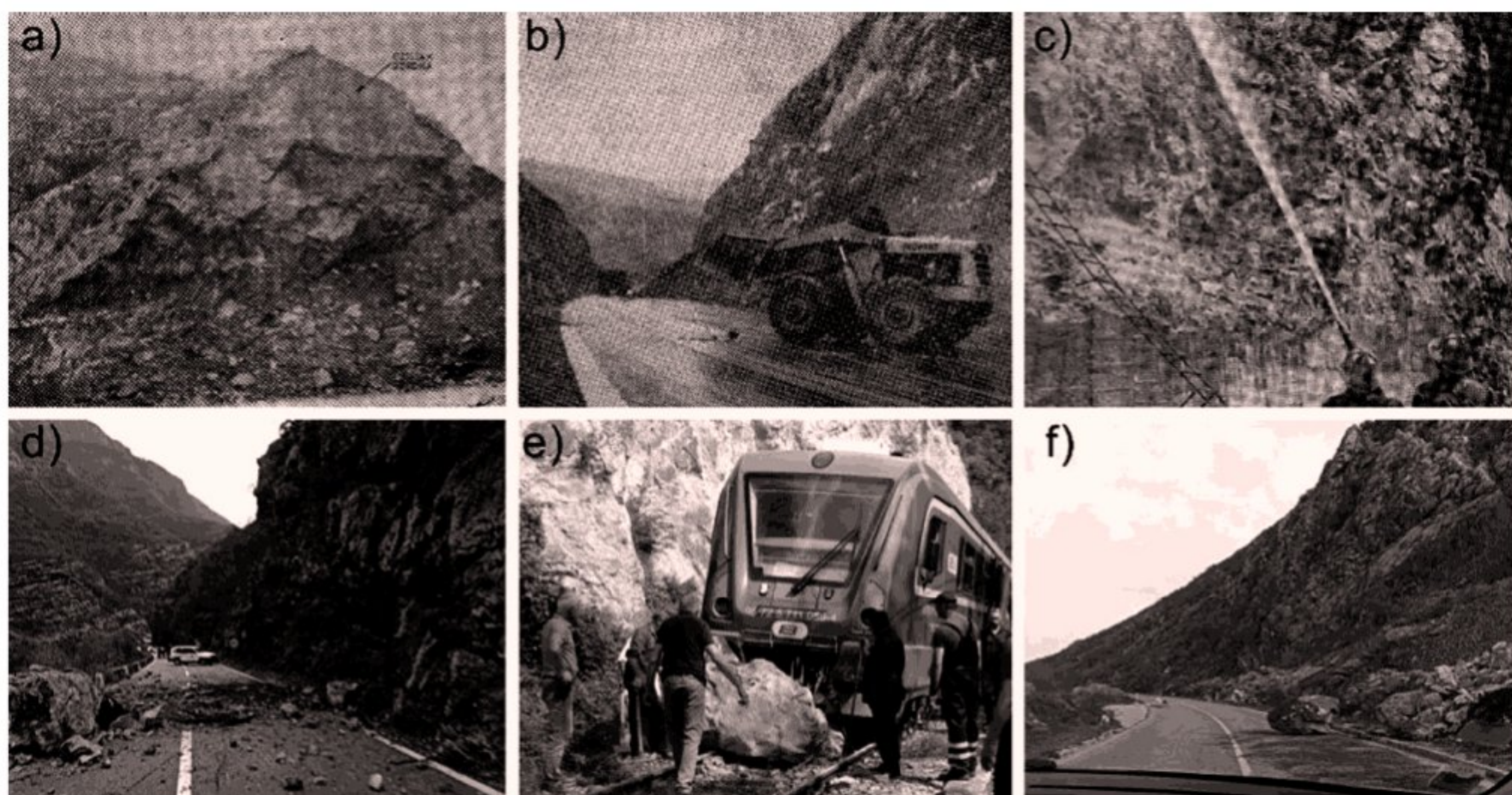
<sup>1</sup> Универзитет у Београду Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, Београд, Србија,  
milos.marjanovic@rgf.bg.ac.rs  
University of Belgrade Faculty of Mining and Geology, Đušina 7, Belgrade, Serbia,  
milos.marjanovic@rgf.bg.ac.rs

to observe and investigate them. Rockfall modeling copes with limited level of confidence, but the state-of-the-art technologies allow for some improvement in that sense. One such technology is LiDAR scanning, which provides detailed topographic surfaces in form of point clouds with high resolution and accuracy. The procedure of rockfall analysis can be separated into: rock mass characterization, delineation of detachment zones, and simulation of eligible rockfall trajectories. In comparison to conventional rock mass characterization, LiDAR scanning, i.e., the resulting point clouds, enables by far more confident parameter extraction. Consequently, kinematic and stability analyses which rely on such input parameters determine unstable blocks with much higher certainty. Apart from using these analyses, it is possible to delineate detachment zones by systematic monitoring. The use of LiDAR scanning stands out once again, as it allows for comparison of point clouds taken at different periods, making small rockfalls detectable or pointing out to pre-failed blocks. Defining the influence zone and distribution of block energy or velocity along rockfall trajectory is at the bottom of rockfall analysis, which forwards valuable information for protective and preventive measures design and infrastructural construction planning. These state-of-the-art aspects of rockfall analysis are described in this article, followed by practical examples, with special emphasis on advantages of utilization of point clouds.

**Key words:** rockfalls, monitoring, LiDAR, point clouds, modeling

## УВОД

Одрони представљају сталну претњу на путним правцима и пругама у стеновитим, брдско-планинским теренима диљем Србије и региона. Ове појаве су уобичајене дуж Ибарске и Ђердапске магистрале, долином З. Мораве, Кањона Мораче, Далматинске обале (Сл. 1), где су проузроковале велике штете па и фаталне исходе (ЈАНЈЉИЋ 1978, ЈЕВРЕМОВИЋ и сарадници 2011). Стиче се утисак да су последњих деценија јављају чешће, а један од разлога за то је ширење градова и саобраћајница, чиме се заузимају делови природне средине који до тада нису били у садејству са инфраструктурним или урбаним зонама, услед чега се индукују природни процеси. Други разлог је везан за климатске промене. Наиме, већина покретача одроњавања везана је за падавине, и температурне промене. Хидрометеоролошки подаци последњег климатског периода указују на пораст средње температуре ваздуха и укупне суме падавина у односу на референтне периоде у другој половини прошлог века, а такав се тренд очекује и у климатским пројекцијама за Србију (ЛУКОВИЋ и сарадници 2013, ВАЈАТ и сарадници 2014). Општи услови указују на интензивирање процеса одроњавања (GARIANO & GUZZETTI 2016) и оправдавају потребу њиховог детаљнијег изучавања, како оних историјских, тако и рецентних, па и будућих (уз одговарајуће методе предвиђања/симулације). У развијенијим алпским и скандинавским земљама анализирају се и преисторијски одрони, јер се њихов механизам сматра кључним за предвиђање будућих појава. Катастрофални одрони попут Пандемонијум крик-а (Канада 1959), Вајонт-а (Италија 1963), Хуаскаран-а (Перу 1970), Вал Пол-е (Италија 1987) оправдавају овакав приступ (ERISMAN & ABELE 2001). Код нас то за сада није случај, што се осим недостатком истраживања, може оправдати и другачијим палеогеографским условима, па су остаци таквих појава код нас данас закамуфлирани другим процесима.



**Слика 1.** Историјски и рецентни одрони: а) Јоц, Србија 1974; б) Бубањ поток, Србија 1977; с) Овчар бања, Србија 1972; д) Платије, Црна Гора 2019; е) Рашка, Србија 2020; ф) Столац, БиХ 2022.

**Figure 1.** Historic and recent rockfalls: a) Joc, Serbia 1974; b) Bujanj Potok, Serbia 1977; c) Ovčar banja, Serbia 1972; d) Platije, Montenegro 2019; e) Raška, Serbia 2020; f) Stolac, B&H 2022.

Код одрона разликујемо зону одламања, транспорта и депоновања, и сваку прати засебна проблематика. Реч је о појави која може бити покренута различитим чиниоцима или њиховим здруженим деловањем, попут падавина, површинског распадања, селективне ерозије, замрзавања и топљења леда, земљотреса, удара таласа, ветра, раста корења биљака, кретања планинских животиња, антропогених утицаја (засецање, минирање, пражњење вештачких акумулација). Ако на то додамо и комплексност стенске масе која је исходиште процеса, која је по правилу нехомогена, анизотропна, дисконтинуална и нелинеарно еластична средина, а потом додамо и читав низ неодређености и степена слободе покренутог блока и његове интеракције са подлогом, јасно је да је моделовање, а поготово предвиђање одрона скопчано са ниским нивоима поузданости. Ипак, савремене технологије омогућавају да се такви изгледи поправе.

Савремене технологије на које се овде мисли односе се махом на систематско осматрање процеса одроњавања, које није нимало једноставно пројектовати, упркос томе што је избор технологија широк, а можда баш из тог разлога. У пракси су се боље показале технологије које обухватају целу интересну површину (нпр. цело лице косине) него тачкасте и линеарне инсталације (попут геодетских репера, и разних врста екстензометара), јер је исте тешко поставити на оптималне позиције по косини. Једна од актуелних технологија је терестричко *LiDAR*-ско скенирање, којим се постиже задовољавајућа тачност, прецизност и резолуција а покрива се читава интересна површина, па се дају уочити и мање појаве, што није случај са конвенционалним методама осматрања. Овај чланак је управо посвећен прегледу примене *LiDAR*

технологије у сврху унапређивања анализе одрона кроз основне аналитичке кораке: карактеризацију стенске масе, одређивање зона одламања и симулацију одрона.

## КАРАКТЕРИЗАЦИЈА СТЕНСКЕ МАСЕ

Карактеризација стенске масе врши се на основу теренских опажања и лабораторијских опита како би се извршила њена класификација, одредила чврстоћа и деформабилност.

Један од устаљених система класификације стенске масе је *RMR* систем (CELADA и сарадници 2014), у којем се на основу теренских осматрања и процена врши бодовање стенске масе према неколико критеријума: чврстоћа монолита *UCS*, квалитет стене *RQD*, размак између пукотина  $RMR_{Jspacing}$ , стање пукотина  $RMR_{Jcond}$ , стање подземне воде  $RMR_{Jwater}$ , и корекциони фактори за оријентацију фамилија пукотина у односу на косину, а по најновијој ревизији додат је и фактор измењености стене, као и разлике у бодовању у односу на основни *RMR* систем. По извршеном бодовању у распону 8-100, стенска маса се може сврстати у једну од пет класа – од веома лоше до веома добре стене.

Стенска маса се одликује редукованом чврстоћом и еластичношћу у односу на монолитни комад стене, услед испуцалости, нехомогености и анизотропности стенске масе, у којој при том важи и ефекат размере (зависност својстава од величинског подручја посматрања). Чврстоћа се у геотехничкој пракси описује тзв. параметрима чврстоће – математичким аргументима различитих функција које описују стање напона у тренутку лома. Зависно од комплексности функције, тј. тзв. анvelope лома, њених параметара може бити мање или више, и могу бити мање или више апстрактни и захтевни за одређивање из лабораторијских и теренских опита. За стенске масе је најчешће у употреби нелинеарни Хук-Браунов критеријум лома (НОЕК & BROWN 2019), у којем фигуришу физички разумљиви параметри који се рутински одређују. У лабораторији је потребно одредити једнооксијалну притисну чврстоћу монолита *UCS*, а на терену *GSI* вредност, која представља однос издељености стене и стања свежине пукотина (директно се везује за квалитет стене *RQD* и стање пукотина према *RMR* бодовном систему  $RMR_{Jcond}$ ). Параметар  $RMR_{Jcond}$  укључује процену континуалности, зева, храпавости, испуне и степена распаднутости зида пукотине. Осим тога, потребно је проценити или лабораторијски установити параметар  $m_i$  који представља нагиб анvelope лома, а опционо се уноси и параметар растресања *D* (зависи од начина извођења косине). Хук-Браунову анvelopeу је могуће свести на линеарну Мор-Кулонову у којој фигуришу само кохезија  $c_{rm}$  и угао трења  $\varphi_{rm}$  стенске масе, који су такође физички разумљиви. За чврстоћу по дисконтинуитету је у употреби Бартон-Бандисов критеријум (BARTON & CHOUVEY 1977) формулације:  $\tau_j = \sigma_n \cdot \tan[JRC \cdot \log_{10}(JCS/\sigma_n) + \varphi_r]$ . Аргументи *JRC* (храпавост зидова пукотине), *JCS* (притисна чврстоћа зида пукотине) и  $\varphi_r$  (резидуални угао трења) су физички разумљиви и могу се добити једноставним теренским тестовима, тј. профилометријом, опитом Шмитовим

чекићем и опитом нагињања, респективно, што и овај критеријум чини врло практичним.

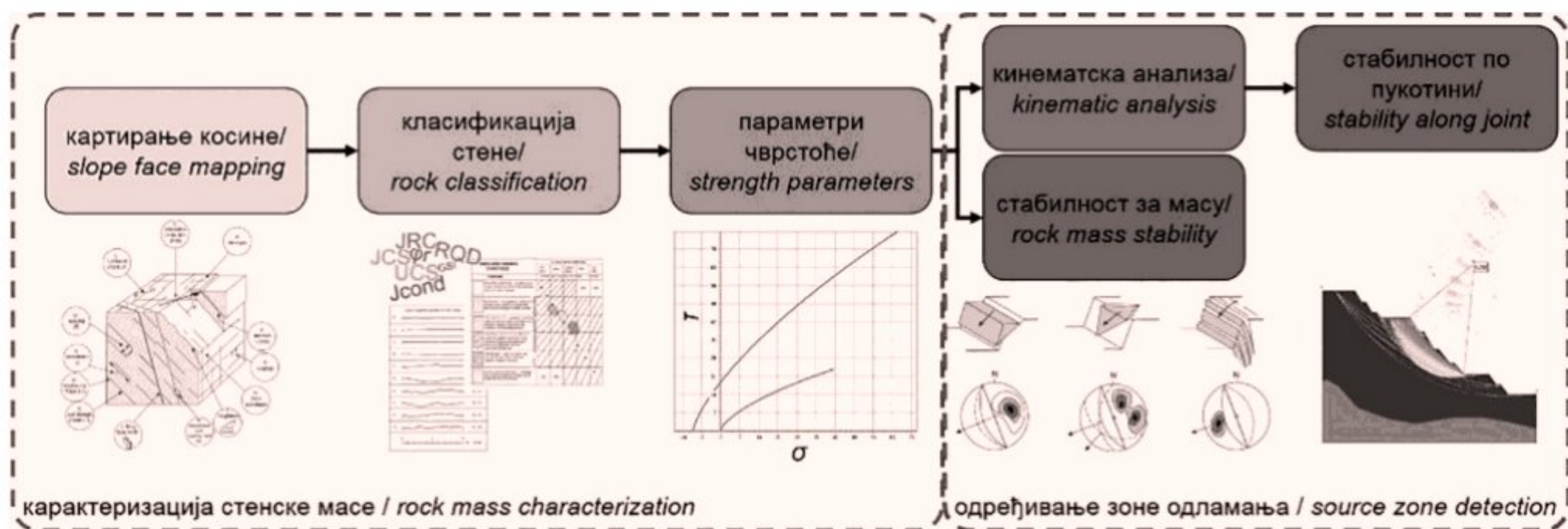
Деформабилност се одређује на основу корелација притисне чврстоће и процењене или лабораторијски/теренски одређеног модула еластичности. Она је од значаја за напонско-деформацијске анализе, а не и за анализе стабилности засноване на граничној равнотежи.

Наведени приступ је поједностављен и односи се на крупну размеру, тј. на ниво косине, и не узима у обзир разна ограничења, специјалне случајеве и ефекте, које би у пракси увек требало разматрати (BERISAVLJEVIĆ и сарадници 2021). Стенску масу можемо сматрати окарактерисаном када смо јој одредили параметре чврстоће и деформабилности по свим квазихомогеним зонама на које смо је изделили, по нпр. *RMR* систему, као и по њеним дисконтинуитетима (Сл. 2). У случају регионалног подручја посматрања (нпр. дуж читаве деонице пута) цео поступак је додатно поједностављен разним апроксимацијама и генерализацијама (MARJANOVIĆ и сарадници 2022), што овде неће бити разматрано.

Не улазећи у поузданости одређивања *UCS* или *JCS* параметара, ни модула еластичности, оправдано је очекивати да је најмања највећа субјективност у читавом поступку карактеризације везана за прикупљање параметара *JRC*, *GSI*, *RMR<sub>Jcond</sub>* и *RQD*.

## ОДРЕЂИВАЊЕ ЗОНА ОДЛАМАЊА

Иако се према дефиницији одрон у ужем смислу карактерише као појединачни блок чврсте стене, дисконтинуитетима одвојен од основне стене који слободно пада до коначног одредишта (HUNGR са сарадницима 2014), у реалности се углавном јавља комбиновани механизам, па често одрон започне откидањем и смицањем или претурањем блока, па настави слободним падом, разбијањем и поскакивањем блокова по стрмим одсечима брдских падина, или у обалама река, језера и мора, да би се потом котрљао, дроблио и осипао до коначног одредишта. Може се јавити појединачно и у групама или чак лавинама. На пример, при јаком земљотресу у Перуу 31. маја 1970 године, са планинског венца (5500-6650 m) обрушиле су се стенске масе и лед запремине 50-100 милиона m<sup>3</sup>. Тај одрон изазвао је образовање камене лавине која се кретала брзином од 80-90 m/s, а која се затим трансформисала у брзо клизиште, које је по „доласку“ до реке Рио Санта створило привремену брану, што је касније довело до формирања бујичног тока, дугог 130 km. Дакле, велики одрони на планинским падинама обично се трансформишу у друге падинске процесе, што је њихова карактеристична особина. Имајући то у виду, потребно је прилагодити приступ зонирања конкретном случају, али се генерално зоне одламања могу одређивати: више-критеријумском анализом, кинематском и анализом стабилности, као и систематским осматрањем. Више-критеријумска анализа се своди на просторне анализе различитих геолошких и других подлога у *GIS* окружењу уз поједностављене кинематске услове (MARJANOVIĆ и сарадници 2022) и односи се на регионалне размере, па овде неће бити приказана.



**Слика 2.** Аналитичка шема у стенским масама (карактеризација и детекција зона одламања).

**Figure 2.** Analysis workflow in rock masses (rock mass characterization and source zone delineation).

Када говоримо о локалним нивоима посматрања, најпре можемо сузити претраживање нестабилних блокова тако што ћемо разматрати само делове косине са нижим *RMR*-ом. Избор даље можемо сузити према њиховој позицији на косини, и издвојити само оне који су хипсометријски интересантни (блокови у вишим деловима). У овако локализованим деловима косине даље треба применити најпре кинематску анализу, која нам даје предуслове за појаву нестабилних блокова по механизму смицања или претурања могу покренути (MARKLAND 1972). На њу се наслања анализа стабилности по стању граничне равнотеже, где се за усвојене параметре чврстоће дисконтинуитета одређује фактор сигурности  $F_s$  као однос отпорних и покретачких сила/момената дуж контакта блока и основне стене (Бартон-Бандис-ов критеријум), кроз стенску масу (Хук-Браун-ов критеријум) или комбиновано, при чему се  $F_s < 1,3-1,5$  сматра незадовољавајућим. Овако дефинисани нестабилни блокови (Сл. 2) прослеђују се за симулацију одрона.

Битно је истаћи да осим наслеђене непоузданости из претходног корака (непоузданост улазних параметара), додатна непоузданост у случају кинематске анализе произлази из генерализације оријентације косине и заступљених фамилија пукотина. У пракси се, без обзира на величину косине кинематска анализа своди на анализу статистички осредњеног азимута и пада косине и сваке од заступљених фамилија, а јасно је да се локално могу јавити значајна одступања од идеално равних површина. Зависно од генезе, планарни дисконтинуитети у стенској маси могу имати променљиву оријентацију на истој косини (перасте пукотине затезања, млађе тензионе пукотине, кливаж аксијалне површи, пукотине консолидације магматских интрузива/екструзива итд.), која може битно да се разликује у приступачном делу косине (где се мери геолошким компасом мале контактне површине) и неприступачним вишим деловима.

## СИМУЛАЦИЈА ОДРОНА

Симулација трајекторије одрона има вишеструки значај. Што је веродостојније моделована то је кориснији податак о домету, месту контакта са



површином, висини одскока и дистрибуцији енергије дуж трајекторије. Она се може вршити проактивно, тј. на основу претходно издвојених нестабилних блокова, чиме се може предвидети потенцијални одрон, али и повратно, тј. *post festum* за одрон који се већ догодио (познате зоне одламања и домета блока). Проактивни приступ је свакако кориснији, док се у другом случају може вршити контрола или калибрација модела повратном анализом. Моделовање трајекторије своди се на једноставније или сложеније  $2D$  или  $3D$  детерминистичке моделе, који захтевају унос разних физичких параметара. Осим места одламања, код већине модела је потребно дефинисати запреминску тежину, облик и димензије блока, почетну брзину и положај, као и врсту и реакцију подлоге. У моделима се блок своди на круто тело које се креће без отпора кроз ваздух и остварује контакт са крто-пластичном подлогом, при чему трансформише потенцијалну енергију у кинетичку до њеног потпуног искоришћења тј. заустављања. У зависности од сложености модела кретања крутог тела може имати ограничен или комплетан скуп кинетичких степени слободе (транслација и ротација по свим осама), док подлога може имати једноставан еластични контакт базиран на Закону акције и реакције или пак сложено интеракцију која укључује одскок, амортизацију подлоге, вучење, клизање, а поједини модели чак и кретање кроз ваздух условљавају отпором средине услед присуства вегетације. Међу моделским решењима (идући од једноставнијих ка сложенијим) могу се истаћи: фрикциони троугао базиран на углу сенке, *H-L* моделска метода, *Rocscience RockFall2*, *ConeFall* (JABOYEDOFF & LABIOUSE 2009), *Rocscience RockFall3*, *Rockyfor3D* (DORREN и сарадници 2011), *ROCGIS* (MATAS и сарадници 2017), *RAMMS Rockfall* (CHRISTEN и сарадници 2012).

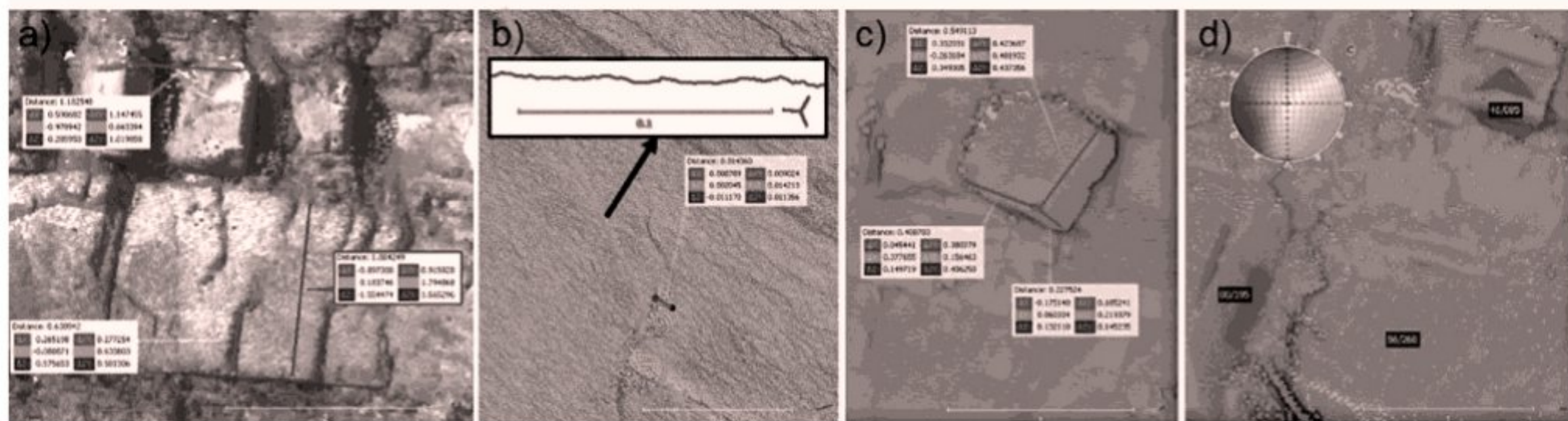
Значајна одступања моделованог од реалног одрона могу настати употребом  $2D$  модела, јер трајекторија по правилу није копланарна. Симплификација облика блока такође може довести до неподударности, као и непрецизно дефинисање својстава подлоге. Коначно, сами блокови подлежу мрвљењу и осипању при сваком контакту са подлогом, што већина софтвера не нуди у својим моделима, па се њиховом применом прецењује домет и енергија трајекторије (крупни блокови сежу даље од ситнијих).

## ДИСКУСИЈА

У пракси се при карактеризацији стенске масе често јављају разлике у процени храпавости јер се она своди на визуелну сличност профила пукотине и једног од десет профила *JRC* номограма, а понекад се због бржег рада профил пукотине замењује опипом, што је још субјективније. Исто важи и за процену храпавости у оквиру  $RMR_{Jcond}$ , где се субјективност у знатној мери јавља и при оцени континуалности, а од субјективности није изузета ни процена корекционих фактора за оријентацију дисконтинуитета у односу на предметни објекат. Даље, процена *RQD* је традиционално контроверзна јер зависи од правца посматрања, поготово у анизотропним срединама. Процена размака и зева такође подлеже субјективности у одређеној мери, зависно од подручја посматрања. Наиме, на изданку или мањој косини се управно растојање између пукотина у фамилији

може непосредно измерити, што није случај са високим косинама. Управо *LiDAR* технологија, тј. модели површине стене у форми облака тачака, могу наћи своју примену у овим случајевима.

Сви делови стенске масе који су недоступни у природним условима, што је најчешће све преко 2-3 m висине, на облаку тачака постају доступни. Директна мерења дужина и размака пукотина, храпавости, па и зева су једноставна решења (Сл. 3) али постоје и разне напредније методе обраде облака тачака. У првом реду то је аутоматска оријентација планара које су видљиве на површини. Рутинским, аутоматским прорачуном нормала полигона које оконтуреју најмање три тачке, могуће је дефинисати и приказати азимут и пад сваког полигоналног елемента на облаку (JAVOYEDOFF и сарадници 2007). Даље је могуће извршити полуаутоматско груписање планара кластерском анализом и дефинисати фамилије пукотина, као и њихов размак и континуалност (RIQUELME и сарадници 2014). Могуће је генерисати дискретне мреже пукотина *DFN* које сем линеарних (*RQD*) омогућавају површинске и запреминске показатеље испуцалости, чиме се повећава поузданост одређивања *RMR*-а и *GSI*-а (ELMO и сарадници 2014, CHEN & YIN 2019).



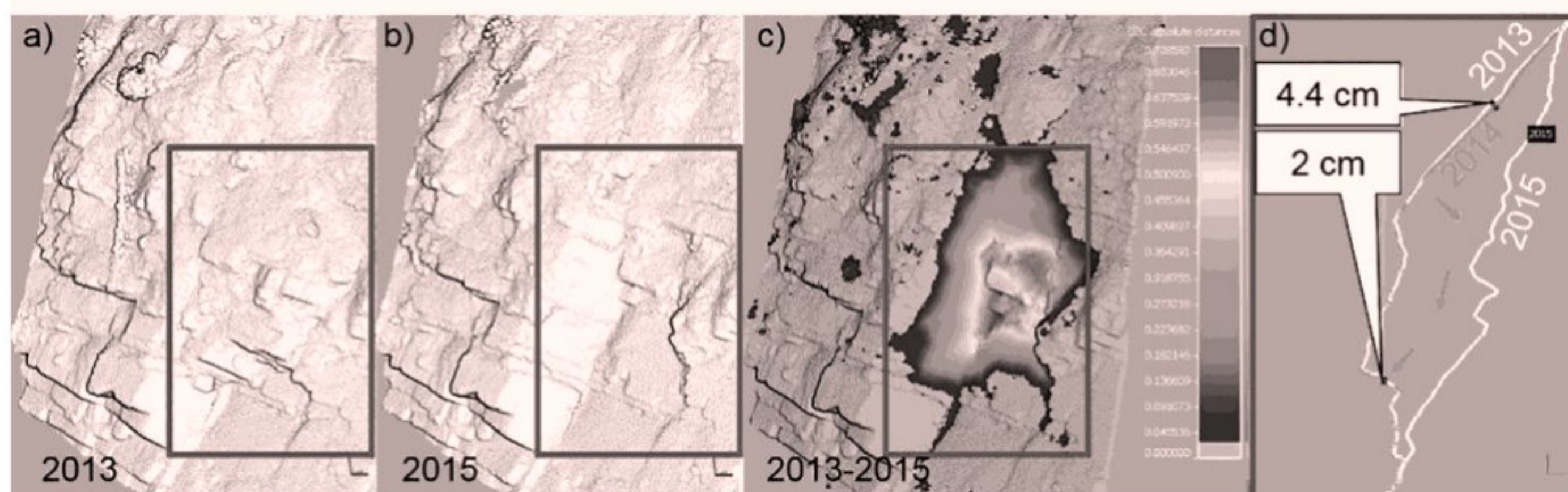
**Слика 3.** Приказ мерења разних параметара пукотина на облаку тачака у програму *CloudCompare*: а) размак и дужина; б) храпавост и зев; с) димензија блока; д) оријентације планара.

**Figure 3.** Measurement of various joint parameters on a point cloud in *CloudCompare* software: a) spacing and continuity; b) roughness and aperture; c) block dimensions; d) plane orientation.

Када је реч о зонама одламања, значајна су два аспекта: унапређење улазних параметара за кинематску анализу; и систематски мониторинг као начин детекције нестабилних блокова. Унапређење улазних параметара за кинематску анализу се своди на прецизно дефинисање оријентација планара и лица косине, о чему је већ било речи. Систематски мониторинг, уколико се усклади са динамиком процеса (нпр. ако се врши сезонски или годишње) може омогућити детекцију не само одроњених блокова (на основу недостатка масе на млађем облаку тачака у односу на старији), већ препознати критична померања која претходе одрону, јер је mm-cm домен померања који најављује прогресивни лом (најчешће затезањем) мерљив *LiDAR* технологијом, па се они блокови које испоље такве промене у односу на претходно стање могу сматрати кандидатима за зоне одламања (Сл. 4).

Што се тиче симулације, допринос *LiDAR* технологије се огледа најпре кроз веома детаљне *2D/3D* топографске подлоге, чиме је обезбеђена

реалистичност трајекторије. Осим тога, она омогућава детаљно мерење димензија, запремине и облика блока (Сл. 3), а познато је да облик може значајно да утиче на начин интеракције са подлогом, па се у појединим софтверским пакетима, уз стандардне облике (сферни, коцкасти, призматични, итд.) омогућава чак и потпуно неправилни облик, дефинисан скеном самог блока стене, чиме се достиже максимална реалистичност. Није неопходно нарочито наглашавати колико је реалистичност важна, јер се на основу исте могу дознати тачне или приближне вредности брзина, енергија, места контакта са подлогом, висина одскока и др. величине које су од суштинског значаја за пројектовање заштитних или превентивних мера, као и процену хазарда дуж предметних праваца за потребе израде планске документације.



**Слика 4.** Сукцесија одламања блока: а) облак тачака из 2013; б) облак тачака из 2015; в) померања на основу разлике облака 2013-2015; д) cm померања пред лом из 2014 (пресек).

*Figure 4. Block detachment succession: a) 2013 point cloud; b) 2015 point cloud; c) displacements based on 2013-2015 cloud difference; d) cm pre-failure displacements from 2014 (cross-section).*

## ЗАКЉУЧАК

Моделовање и симулирање одрона се суочава са разноврсним изворима непоузданости, која се у мањој или већој мери може превазићи применом *LiDAR*-ског терестричког скенирања, уз одговарајућу обраду резултујућег облака тачака. На истим се може неупоредиво тачније одредити оријентација дисконтинуитета, њихова континуалност, храпавост, облик и димензије лабилних блокова, топографска површ терена итд. Ова унапређења одређују правац будућег развоја оног дела геотехничког инжењерства који се бави чврстим стенским масама, како у површинским тако и у подземним условима. Све већа приступачност *LiDAR* технологије (која је од недавно присутна и у мобилним телефонима) и њена ефикасност, свакако мотивишу на интензивну примену, која представља једини начин да се сагледају све предности, али и ограничења, јер она треба само да потпомогне стандардне инжењерскогеолошке процедуре, а не да се доживљава као вид замене дела теренских и лабораторијских истраживања. Код нас је примена *LiDAR* технологије у инжењерској геологији и геотехници још увек у повоју, док се у развијеним земљама полако уводи у легислативу и стандардизацију (нпр. Норвешки стандарди извођења тунела у чврстим стенама

прописују обавезно скенирање сваког чела ископа), али је вероватно само питање времена када ће и код нас овакав приступ заживети.

## **ЗАХВАЛНИЦА**

Овај чланак је писан у форми предавања по позиву за 18. Конгрес геолога Србије у организацији Српског Геолошког друштва, Дивчибаре 1-4.6.2022. Аутор се овом приликом захваљује организационом одбору на указаној части и поверењу да ову актуелну тему изложи.

# **ROCKFALLS ANALYSIS IN ROCK SLOPES: STATE-OF-THE-ART APPROACHES**

## **INTRODUCTION**

Rockfalls impose constant threat along road corridors and rails in rocky mountainous regions throughout Serbia and the Region (Fig. 1). In the past they have caused considerable damage even casualties (JANJIĆ 1978, JEVREMOVIĆ et al. 2011). Their occurrences are becoming more frequent, due to urban sprawl and climate change, which is likely to continue in the future with current climate trends (LUKOVIĆ et al. 2013, BAJAT et al. 2014, GARIANO & GUZZETTI 2016). Studying historical and recent rockfalls, even the ones that can potentially happen in the future is crucial, wherein, disastrous rockfalls from the last century stand as horrid reminders to that end (ERISMAN & ABELE 2001). In our country, the scope of rockfall investigations seems insufficient.

Rockfall consists of detachment, transport and deposition zones, and each one of them raises specific issues. Process is triggered by many factors, such as rainfall, weathering, erosion, earthquakes, human activity, etc. making them difficult to monitor, model and predict. In addition, they are hosted in the rock mass, which is by itself very complex, while detached blocks propagate in a very complex manner and have complicated interaction with the ground. For all the above, rockfall modeling and prediction cope with low levels of certainty, but state-of-the-art technologies involved in systematic monitoring and simulation of rockfalls are introducing significant improvements in this context. Terrestrial LiDAR scanning is one such technology, with wide coverage, high precision, resolution and accuracy, which makes it superior to conventional, point or line-based monitoring methods. This article overviews the role of LiDAR technology in rockfall analysis advancement, including appropriate examples, starting from rock mass characterization, source area delineation and rockfall simulation.

## **ROCK MASS CHARACTERIZATION**

Characterization of rock mass includes its classification, determination of its strength and elastic properties, based on field and lab works. The RMR is one of the

most common rock classification systems, which involves scoring of rock compressive strength UCS, rock quality RQD, joint spacing, joint condition and water condition, as well as joint set orientation in respect to the slope face (CELADA et al. 2014). The total score ranges 8-100 and allocates given rock mass into one of five categories from very poor to very good.

Rock mass has reduced strength and elasticity in comparison to rock monolith due to jointing, anisotropy and inhomogeneity, as well as relation and scale effects. In practice, strength is described by strength parameters, which represent mathematic descriptors of stress curves at failure state. These curves are commonly called failure envelopes, and can be more or less complex, meaning that their descriptors can be more or less comprehensive, and more or less complicated to determine. The non-linear Hoek-Brown failure criterion is the most widespread in rock mass applications (HOEK & BROWN 2019). It involves parameters that can be routinely obtained by field or lab investigations, including: monolith compressive strength  $UCS$ , the  $GSI$  value, as a relation of rock jointing  $RQD$  and joint condition  $RMR_{Jcond}$  (which further includes scoring of joint persistence, its aperture, roughness, infill, and alteration), curve steepness parameter  $m_i$ , and disturbance parameter  $D$ . It is possible to translate these strength parameters to linear Mohr-Coulomb strength parameters, cohesion  $c_{rm}$  and internal friction angle  $\varphi_{rm}$ . On the other hand, strength along discontinuities is commonly described by Barton-Bandis criterion (BARTON & CHOUBEY 1977), which uses roughness parameter  $JRC$  (which is routinely obtained by joint wall profiling), joint compressive strength  $JCS$  (obtained by Schmidt hammer test) and residual friction angle (obtained by tilt test). Elastic properties, which are needed for stress-strain analyses, are estimated directly from appropriate lab results, or using the correlations with many of the abovementioned parameters. At the local, site-specific scale, a rock mass can be considered characterized once its rock class, strength and elastic parameters are defined, as described above, while having in mind that this is a very basic concept (Fig. 2) which does not involve various limitations and effects that should be commonly practiced (BERISAVLJEVIĆ et al. 2021). Regional scale characterization, on the other hand, implies even further approximation and generalization (MARJANOVIĆ et al. 2022). Expectedly, the highest level of input data uncertainty is introduced while estimating  $JRC$ ,  $GSI$ ,  $RMR_{Jcond}$  and  $RQD$ .

## **DELINEATION OF DETACHMENT ZONES**

Rockfalls are by definition (HUNGR et al. 2014) starting by detachment of individual solid blocks that runout by free fall. In reality, many other mechanisms (shearing, toppling, etc.) and transport effects (bouncing, rolling, fragmenting, etc.) are intermixed, while blocks often detach as clusters or even avalanches. Having that in mind, the approaches for delineating source zones of detachments comes down to multi-criteria assessment (only in regional scales), kinematic and slope stability analyses, as well as systematic monitoring. Once the rock mass is characterized, source zones search can be narrowed down to the poorest rock classes that are positioned at higher parts of the slope. Therein, kinematic criteria are to be applied to precondition possible failures (MARKLAND 1972). Limit equilibrium-based stability methods pick

up from there (Fig. 2) and provide the factor of safety  $F_s$  as an indicator of stability expressed by resisting and driving forces along discontinuities, through the mass, or combined. Blocks with  $F_s < 1.3-1.5$  are considered unsatisfactory for the rock slopes/cuts and are being forwarded to the rockfall simulation. Input data uncertainty for detachment zoning is partly inherited from the previous stage, while the additional sources of uncertainty comes from planar approximation of joint surfaces and rock faces, and statistical averaging of joint sets which might be far from realistic.

## ROCKFALL SIMULATION

The more realistic rockfall simulations are the more usable are the output data, which commonly include ground contact points, bounce height, and energy distribution along its trajectory. Simulation can be fed by inputs from the previous stage, i.e., locations of potentially unstable block and predict their trajectory, or alternatively, it can back-analyze an existing rockfall with known detachment and runout, to calibrate the simulation parameters. Simulations are performed by using 2D or 3D deterministic models, which can be more or less complex and require various input parameters, such as rock unit weight, block size and shape, ground properties, etc. They approximate the falling block as a rigid body that moves without resistance through air and interacts with the deformable ground, whereby its potential energy is spent on kinetic, until it comes to a standstill. Some of the widely used models and software are: friction triangle, *H-L* method, *Rocscience RockFall2*, *ConeFall* (JABOYEDOFF & LABIOUSE 2009), *Rocscience RockFall3*, *Rockyfor3D* (DORREN et al. 2011), *ROCGIS* (MATAS et al. 2017), *RAMMS Rockfall* (CHRISTEN et al. 2012). Trajectory modeling can become unrealistic primarily when using 2D cases, since the rockfalls are by rule non-planar events. Simplified block geometry and inadequately characterized ground surface can lead to further inaccuracies. Finally, falling blocks tend to fragmentize while interacting with the surface, which leads to overestimation of runout distance and energy.

## DISCUSSION

The estimation and scoring of jointing intensity ( $RQD$ ), joint spacing ( $RMR_{Jspacing}$ ), roughness ( $RMR_{Jcond}$  and  $JRC$ ), aperture and persistence ( $RMR_{Jcond}$ ), as well as the very orientation of joints and rock faces cope with subjectivity. This is pronounced in large slopes and cuts where rock and joint properties within the accessible part may vary significantly in the inaccessible parts. LiDAR technology offers solutions in many of the above problems. Inaccessible parts become accessible for some parameters, so that they can be directly measured on the cloud (Fig. 3) or extracted from advanced cloud processing. Such is the case with continuous orientation extraction for the entire cloud (JABOYEDOFF et al. 2007), joint set clustering and their spacing and persistence (RIQUELME et al. 2014), advanced joint intensity parametrization for  $RMR$  and  $GSI$  scoring (ELMO et al. 2014, CHEN & YIN 2019). Detachment zoning can also benefit from LiDAR scanning, primarily through systematic monitoring of a rock face (Fig. 4), wherein pre-failure displacements can be registered and used for delineating unstable blocks. Finally, rockfall simulation benefits

from the highly detailed topographic surfaces, making trajectory models more realistic, while detached block volume and shape can be very realistically determined.

## CONCLUSION

Rockfall modeling and simulation copes with uncertainty of input data, which can be largely overcome by applying terrestrial LiDAR scanning and point cloud processing. These improvements determine the course of rock engineering development, especially with increasingly available and affordable LiDAR technology (nowadays included even in mobile phones). It should never be regarded as replacement of conventional engineering geological field procedures, but as an aiding tool. The geotechnical application of LiDAR technology is gradually being included in legislation and standardization in developed countries, unlike here in Serbia, but it will start proliferating sooner or later.

## ACKNOWLEDGEMENT

This article is written in the form of invited lecture for the 18<sup>th</sup> Congress of Serbian Geologists, organized by the Serbian Geological Society, Divčibare June 1-4<sup>th</sup> 2022. The author is hereby expressing his acknowledgement to the organizing committee for entrusting him to present this state-of-the-art topic.

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Bajat, B., Blagojević, D., Kilibarda, M., Luković, J. & Tošić, I. (2015) Spatial analysis of the temperature trends in Serbia during the period 1961–2010. *Theor. Appl. Climatol.* 121, 289–301.
- Barton, N. & Choubey, V. (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock. Mech.* 10, 1-54.
- Berisavljević Z., Berisavljević D. & Marjanović M. (2021) Stabilnost kosina u stenskoj masi: Savremeni koncepti i metode proračuna. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki Fakultet, p. 417.
- Celada, B., Tardáguila, I., Varona, P., Rodríguez, A., & Bieniawski, Z. T. (2014). Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system. In: *Proceedings of the World Tunnel Congress, 9-14 May 2014, Foz do Iguaçu, Brazil*, pp. 1-9.
- Chen, Q. & Yin, T. (2019) Integration of homogeneous structural region identification and rock mass quality classification. *R. Soc. open. sci.* 5: 181353.
- Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Graf, C., McArdell, B.W., Gerber, W., Deubelbeiss, Y., Feistl, T. & Volkwein, A. (2012) Integral hazard management using a unified software environment: numerical simulation tool "RAMMS" for gravitational natural hazards. In: *Proceedings of 12<sup>th</sup> Congress INTERPRAEVENT, 23-26 April 2012, Grenoble, France*. pp. 77-86
- Dorren, L., Domaas, U., Kronholm, K. & Labiouse, V. (2011) Methods for Predicting Rockfall Trajectories and Run-out Zones. In: Lambert & Nicot (eds.) *Rockfall Engineering*. John Wiley & Sons, London, UK, pp.143-173.

- Elmo, D., Rogers, S., Stead, D. & Eberhardt, E. (2014) Discrete Fracture Network approach to characterise rock mass fragmentation and implications for geomechanical upscaling, *Mining Tech.* 123:3, 149-161.
- Erismann, T.H. & Abele, G. (2001) *Dynamics of rockslides and rockfalls*. Springer, Berlin, Germany, p. 316.
- Gariano, S.L. & Guzzetti, F. (2016) Landslides in a changing climate. *Earth Sci. Rev.* 162, 227-252.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (2019) The Hoek-Brown failure criterion and GSI–2018 edition. *J. Rock. Mech. Geotech.* 11:3, 445-463.
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167–194.
- Jaboyedoff, M. & Labiouse, V. (2011) Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 819–828.
- Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M.H., Locat, J. & Turmel, D. (2007) New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. In: Eberhardt, Stead & Morrison (Eds.), *Rock mechanics: Meeting Society's Challenges and demands (Vol. 1)*, Taylor & Francis, pp. 61-68.
- Janjić, M. (1987) Odronjavanje stenskih masa. *Zbornik radova Rudarsko-geološkog fakulteta.* 20, 79-97.
- Jevremović, D., Sunarić, D., & Kostić, S. (2011). Zagaćivanje reka u Srbiji kliženjem i odronjavanjem. *Tehnika*, 66:5, 731-736.
- Luković, J., Bajat, B., Blagojević, D. & Kilibarda, M. (2014) Spatial pattern of recent rainfall trends in Serbia (1961–2009). *Reg. Environ. Change* 14, 1789–1799.
- Marjanović, M., Abolmasov, B., Đurić, U., Krušić, J & Bogdanović, S. (2022) Regional rockfall exposure assessment, experience from Serbia. In: *Proceedings of 5<sup>th</sup> ReSyLAB Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, 23-26 March 2022*. Rijeka, Croatia, pp. 145-150.
- Markland, J.T. (1972) A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imperial College rock mechanics research report 19*, pp. 1-10.
- Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J.A., Ruiz-Carulla, R. & Prades, A. (2017). *RockGIS: A GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls*. *Landslides* 14:5, 1565-1578.
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R. & Jaboyedoff, M. (2014) A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, 68, 38-52.



# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les années 2022*

*REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022*

Beograd, 2023

**Ранка Станковић<sup>1</sup>**

**Ranka Stanković<sup>1</sup>**

## ХАРМОНИЗАЦИЈА ПОДАТАКА КОРИШЋЕЊЕМ ПОВЕЗАНИХ ОТВОРЕНИХ ПОДАТАКА

### DATA HARMONIZATION USING LINKED OPEN DATA

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД - PAPER

**Апстракт:** У раду се представља истраживање које се ослања на Оквир за описивање ресурса на вебу (Resource Description Framework, RDF) као модел за представљање геолошког знања. Коришћење глобалних геолошких стандарда и различитих извора података, захтева интелигентне сервисе гео-података засноване на отвореним базама знања различитих домена геонаука. Иницијативе отворених података и отворена наука промовишу онлајн објављивање и дељење различитих података, укључујући геолошке просторне, нумеричке и текстуалне податке. Циљ је да се корисницима и алатима, из области геологије и сродних домена, омогући не само машински читљив, већ и машински разумљив приступ повезаним подацима, укључујући семантичку и вишејезичну хармонизацију. Овим радом се даје допринос унапређењу система за проналажење и екстракцију информација из неструктурираног текста који је још увек актуелан изазов и за такозване велике језике (енглески, немачки,...). Људско знање се углавном чува, преноси и ствара у писаном неструктурираном текстуалном облику, тако да је јасна потреба за развојем техника вештачке интелигенције којим би се решио проблем. Ослањање на коришћење вишејезичних отворених повезаних података за специфичне домене, у овом случају геолошки, представља неопходан корак ка превазилажењу језичких баријера у интеракцији човек-машина. У раду се представљају приступ и неки од резултата хармонизације: речника Геолошког информационог система Србије (ГеолИСС), морфолошких речника српског језика, Википодатака и GeoSciML-а. Систем Лексимира за управљање електронским речницима је представљен кроз примере геолошких појмова и везом ка корпусу геолошких текстова. Коришћење Википодатака се даје на примеру минерала уз визуелизацију резултата SPARQL упита. Машинска разумљивост геолошких текстова на српском језику се илуструје трансформацијама текста, од изворног, неструктурираног до граматички и семантички обележеног.

**Кључне речи:** повезани отворени подаци, хармонизација података, геологија, геонауке, RDF

---

<sup>1</sup> Ранка Станковић, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет,  
ranka.stankovic@rgf.bg.ac.rs  
Ranka Stanković, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology,  
ranka.stankovic@rgf.bg.ac.rs

**Abstract:** The paper presents research that relies on the Resource Description Framework (RDF) as a model for presenting geological knowledge. Using global geological standards and different data sources, requires intelligent geo-data services based on open knowledge bases of different geoscience domains. Open Data Initiatives and Open Science promote the online publication and data sharing, including geological data. The goal is to provide users and tools in the field of geology and related domains, with not only machine-readable but also machine-understandable data access, including semantic and multilingual harmonization. This paper contributes to the improvement of the system for finding and extracting information from unstructured text, which is still a challenge for the so-called big languages. Human knowledge is stored, transmitted and created in unstructured textual form, so the need for development of artificial intelligence techniques for this task is required. Relying on multilingual open data for specific domains, in this case geology, is necessary step towards overcoming language barriers in human-machine interaction. The paper presents the approach and some results of harmonization of several systems: GeolISS dictionary, Serbian morphological dictionaries, Wikidata and GeoSciML. The Leximir system is presented through examples of geological terms and a link to a corpus of geological texts. The use of Wikidata is given on the example of minerals with the visualization of the results of SPARQL queries. The machine comprehensibility of geological texts in the Serbian language is illustrated by transformations of the text, from the original, unstructured to grammatically and semantically labelled form.

**Key words:** linked open data, data harmonization, geology, geoscience, RDF

## Увод

Публиковање и дељење геолошких података и карата на вебу је већ устаљена пракса, док су веб-апликације које подржавају екстракцију информација и представљање знања недовољно развијене. Ово истраживање се ослања на Оквир за описивање ресурса на вебу (Resource Description Framework, RDF) као модел за представљање геолошког знања. Анимирани графички приказ онтологија омогућава интеракцију између онтологије, геолошких карата објављених путем ГИС веб-сервиса и семантички анотираног текстуалног садржаја. Примери оваквих имплементација се могу наћи у различитим областима геологије. Ма и др. (2012) демонстрирали су аутоматску анотацију засновану на онтологијама за концепте геолошке временске скале са анимираним геолошким временским карактеристикама на веб-карти. Wang и др. (2018) су развили онтолошки вођен систем интеграције и визуелизације података геолошких истраживања, истичући да компатибилност између локалних и глобалних геолошких стандарда, као и између различитих извора података, захтева интелигентне сервисе гео-података засноване на онтологијама отворених података (ОП) различитих домена геонаука. Schiegl је са колегама (2019) објавио речнике GeoERA као SKOS повезане податке експертских знања и терминологије. Tessarollo и Rademaker (2020) проширили су Open WordNet за енглески језик терминима који се односе на стене и друге литолошке термине користећи Тезаурус Геолошког завода Аустрије који је делимично интегрисан у Европску инфраструктуру за гео-просторне информације INSPIRE<sup>1</sup> (Infrastructure for SPatial InfoRmation in the European community) и доступан на вебу за претрагу

---

<sup>1</sup> <https://inspire.ec.europa.eu/>

и у виду RDF датотека, а повезан са неколико других извора: Википодаци, подаци Британског геолошког завода, GeoSciML и DBpedia, у складу са препорукама IUGS-a (International Union of Geological Sciences). Vintar и Martinc (2022) креирали су базу знања везана за истраживање карста користећи приступ базиран на оквирима, обезбеђујући вишејезичан, ручно аотирани ресурс сачињен од дефиниција са структурираним информацијама, погодан за имплементацију методе ископавања из текста којима се препознају структуре знања везане за карст.

Отворени подаци су добили велики значај током последњих деценија и успостављене су званичне иницијативе за њихову имплементацију на нивоу влада широм света. Србија је следила међународна искуства и успоставила национални портал (<https://opendata.stat.gov.rs/>). Иницијативе отворених података промовишу онлајн објављивање и дељење различитих врста података, укључујући геолошке податке. Министарство рударства и енергетике Србије објавило је на порталу отворених података неколико скупова података који се односе на клизишта, геолошке речнике и карте, а припрема и прилагођавање ширег скупа података су у току, и то оних који би могли бити од ширег интереса, посебно оних који се односе на Регистар ризика Републике Србије и Интегрисани систем управљања ванредним ситуацијама и ризицима. Циљ је да се корисницима и алатима, како из области геологије тако и из других сродних домена нпр. грађевинарство, екологија или рударство, омогући, не само машинску читљив, већ и машински разумљив приступ повезаним подацима, укључујући семантичку и вишејезичну хармонизацију.

Проналажење и екстракција информација из неструктурираног текста уз откривање знања из великих скупова података је још увек актуелан изазов. Људско знање се углавном чува, преноси и ствара у писаном неструктурираном текстуалном облику. Разумевање природног језика је грана вештачке интелигенције која покушава да реши тај проблем ослањајући се на коришћење вишејезичних отворених повезаних података за специфичне домене као неопходног корака ка превазилажењу језичких баријера у интеракцији човек-машина. Пројекат TermFrame користио је приступ заснован на оквирима за изградњу базе знања за домен карстологије на три језика, енглеском, словеначком и хрватском. Приступ је био инспирација да се направи сличан експеримент за српски и да се резултат интегриса са повезаним ресурсима отворених података.

## Материјал и методе

### Википодаци<sup>1</sup>

Википодаци (енгл. Wikidata) су база знања чија је сврха да буде заједнички извор одређених врста података (нпр. догађаји, стене, минерали, места, особе). Ова база знања Задужбине Викимедија може да се користи за различите намене.

---

<sup>1</sup> [Аутоматизовање уноса Википодатака и интегрисање са другим веб ресурсима • Викимедија Србије \(wikimedia.rs\)](#)

Викимедија Србије и Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду су заједно покренули пројекат Коришћење википодатака за проналажење информација, обележавање ентитета и унапређење садржаја на вебу за српски језик. Осим ручног уноса, у ком су учествовали и студенти, процес припреме, уноса и повезивања је аутоматизован коришћењем алата: OpenRefine<sup>1</sup> и QuickStatements<sup>2</sup>.

Википодаци су усредсређени на ставке, које представљају теме, концепте или објекте. Свакој ставци додељен је јединствени, трајни идентификатор, позитиван цео број са префиксом великог слова Q, познатог као „QID“. Ово омогућава превођење основних информација потребних за препознавање теме коју ставка покрива, а да се не фаворизује било који језик, а да се обезбеди јединственост значења конкретног појма.

Википодаци се управо уклапају у трендове развоја информационих технологија, које померају границе од машинске читљивости ка машинској разумљивости података на вебу.

Наведимо неке примере ставки: место (Лозница, Q648489), особа (Милутин Миланковић, Q89054), догађај (Минојска ерупција, Q1144693), предмет (геолошки чекић, Q1294756), апстрактни појам (геолошка временска скала, Q43521), минерал (кварц, Q43010),... Концепти који стоје иза ставки треба да буду јединствени, али се дешава да постоје две ставке под истим називом, на пример: Јадар који може бити регион око реке Јадар у западној Србији (Q3112617) или сама река Јадар (Q3112617). Дакле, ставка је повезана са јединственим идентификатором (QID), идентификатор је повезан са паром: насловом и описом, како би се уклонила било каква двосмисленост. Можемо имати опште ставке, али такође и лексеме везане за апстрактне појмове.

Идентификатор ставке (QID), осим што је повезан са насловом и описом, може имати више псеудонима и одређени број изјава (тврђења, израза) којима се представљају њена својства и вредности. Изјава је уређена тројка: (ставка, својство, вредност), где је ставка (Q) – било која тема (особа, предмет, место, концепт), својство (P) – релација или карактеристика релевантна за ставку (нпр. пол за људе (P21), главни град за државе (P1376), дужина (P2043) за реке и вредност – или сам “литерал” (нпр. дужина Дунава је 2860 км) или референца на неку другу ставку (нпр. главни град Србије је Београд). Ставка може бити описана низом изјава од којих свака даје једну чињеницу или податак о ставки.

Да би реченицу: *Халкопирит је врста минерала, чија је хемијска формула  $CuFeS_2$ , назван по бакру и пириту.* превели у тврђења и складиштили у базу знања Википодаци потребно је да се одреде кључни концепти и предикати који их повезују. На пример:

Халкопирит (Q111044)<sup>3</sup> је (P31) врста минерала (Q12089225), чија је хемијска формула (P274)  $CuFeS_2$ , назван по (P138) бакру (Q753) и пириту (Q50769)

<sup>1</sup> <https://openrefine.org/>

<sup>2</sup> <https://quickstatements.toolforge.org/>

<sup>3</sup> <https://www.wikidata.org/wiki/Q111044>

У претходном примеру имамо субјекат заокружен правоугаоником и три дела реченице облика предикат-објекат.

У Википодацима би се то записало у виду RDF реченица, односно тројки: субјекат, предикат објекат које се завршавају тачком „“:

• Q111044 P31 Q12089225. Q111044 P274 „CuFeS2“. Q111044 P138 Q753 Q50769.

Уколико се у суседним реченицама субјекат понавља, може се користити скраћена нотација тако да претходна реченица може бити записана као:

• Q111044 P31 Q12089225; P274 „CuFeS2“; P138 Q753 Q50769.

Важна карактеристика Википодатака је да имају два лица: једно намењено људима и друго: намењено машинама, што омогућава бројне примене, на пример класификација текста, индексирање, анализа текста, генерисање текста, сумаризација, нормализација, повезивање, приказивање на карти и сл.

Друга важна карактеристика је вишејезичност, свака ставка се може повезати са лабелом на било ком језику који је регистрован на Викимедијиним ресурсима, што отвара пут бројним применама од аутоматског превођења, класификације вишејезичних докумената до анализе садржаја на вебу, пословним, научним и друштвеним мрежама.

## GeoSciML и EarthResourceML

Речници GeoSciML - Geoscience Vocabularies for Linked Data<sup>1</sup> су настали у оквиру развоја GeoSciML стандарда преноса података за размену дигиталних информација из области геонаука. Стандард прилагођава представљање и опис својстава која се обично налазе на геолошким картама, као и проширење на друге области геонаука. GeoSciML се користи као стандард преноса геолошких података од стране иницијатива за дељење података широм света, нпр. OneGeology пројекта (Благојевић и други 2014), европске директиве INSPIRE, Америчке информационе мреже за геонауке (USGIN), Канадске информационе мрежа о подземним водама, Аустралијске информационе мреже за геонауке и пројекта AuScore, Афричко-европског система за посматрање георесурса.

GeoSciML пројекат је покренут 2003. године под покровитељством CGI радне групе за сарадњу у моделима података, док је последња верзија објављена 2020. године, доступна као XML, RDF и преко SPARQL приступне тачке за претрагу. Доступно је 35 речника у оквиру GeoSciML<sup>2</sup> и 18 у оквиру EarthResourceML<sup>3</sup>.

## ГеолИСС

Геолошки информациони систем Србије (ГеолИСС)<sup>4</sup> је намењен чувању геолошких података у дигиталном облику, омогућава једноставније руковање

<sup>1</sup> <http://geosciml.org/resource/>; <http://geosciml.org/resource/def/voc/> ;

<sup>2</sup> <http://geosciml.org/resource/vocabulary/cgi/2016/>

<sup>3</sup> <http://geosciml.org/resource/vocabulary/earthresourceml/2016/>

<sup>4</sup> <https://geoliss.mre.gov.rs/>

подацима, као и лакши преглед постојећих података. ГеолИСС је имплементиран у оквиру ESRI, ArcGIS технологије као .Net екстензија ArcGIS-a. Систем као централни репозиторијум користи „Enterprise ArcSDE geodatabase“ у оквиру MS SQL Server-a. ГеолИСС корисницима омогућава интерактивно креирање упита, анализу просторних и осталих података, ажурирање података, карата и приказ резултата. Моделирање података је инспирисано различитим геолошким моделима, међу којима се издвајају GeoSciML схема за размену геолошких података коју користи CGI IUGS-a ([www.seegrid.csiro.au](http://www.seegrid.csiro.au)), NGMDB имплементација USGS-a и CGS-a ([www.nadm-geo.org](http://www.nadm-geo.org)), као и модели предложени од интернационалне организације за стандардизацију географских информација. Картографски веб-сервиси су развијени такође у ArcGIS технологији, при чему су неки сервиси отвореног типа, а већина је доступна само кроз функције самог система.

ГеолИССТерм<sup>1</sup> представља језгро ГеолИСС-а преко кога се врши валидација, класификација и спецификација вредности атрибута својстава опсервираног и интерпретираног, и на основу ког се формирају домени у ГеолИСС-у. ГеолИССТерм је настао као резултат рада на пројекту "Развој геолошке терминологије и номенклатуре за геолошку базу података Србије", који је реализовао Рударско-геолошки факултет, а финансирало Министарство животне средине и просторног планирања Републике Србије. Сваки термин, односно концепт има јединствени, нумерички идентификатор у бази: за карбонате је на пример тај број 2769, тако да се лична карта тог концепта може наћи на путањи

<https://geoliss.mre.gov.rs/recnik/term.aspx?InstancaID=2769&tabIzvor=Koncept>.

## Морфолошки речници српског језика

Морфолошки речници српског језика (Krstev 2008) су намењени превасходно употреби у рачунарским апликацијама које се баве обрадом природних језика. Допуна речника новим речима је заснована на корпусу текстова Тумача за листове основних геолошких карата (ОГК) објављених у интервалу од 1962. до 1994. године као издања Савезног геолошког завода, а осим постојећих семантичких и доменских уведене су и нове ознаке од значаја за геолошку терминологију (Пујевић 2022). Категоријама података су придружени семантички маркери који означавају минерале „+Mineral“, стене „+Stena“, палеонтологију „+Paleo“, геолошки облик „+Oblik“, као и ознака за домен палеонтологије „+DOM=Paleo“, уз раније уведене ознаке за домene: „+Mining“, „+Safety“, „+RockMech“, „+Surveying“, „+EnvProt“, „+MinStatus“, „+Ore“, „+Activity“, „+Exploration“ (Томашевић и други 2018), а користе се и неки општи, као на пример „Mat“ за материјал. У наставку представљамо неколико примера речничких записа:

- hidroliskun,N1+DOM=Geol+Mineral+Mat
- planara,N600+DOM=Geol

---

<sup>1</sup> <https://geoliss.mre.gov.rs/recnik/OProjektu.aspx> ,  
<https://geoliss.mre.gov.rs/recnik/recpj.aspx>

- plagiognajs,N81+DOM=Geol+Stena+Mat
- moluska,N661+Zool+DOM=Paleo
- centriklinalni,A2+DOM=Geol+Oblik

Ознаке N1, N600, N81, N661, A2 упућују на алгоритме који се користе за генерисање свих облика речи, са DOM= Geol и DOM=Paleo се одређује домен речи, при чему ти домени се могу дефинисати и прецизније, а семантички маркери дају додатне информације да је у питању неки материјал, минерал или стена.

## Резултати

### ГеолИСС-а и Лексимирке

Хармонизација података је подразумевала проналажење заједничких концепата и откривање недостајућих или погрешно придружених информација. На основу корпуса текстова Тумача ОГК је направљена фреквенцијска листа облика речи и самих термина који се појављују како би се проверило шта недостаје у поменутих речницима.

Први корак је био провера између ГеолИСС-а и Лексимирке где је регистровано да се као основни облик речи у морфолошким речницима узима номинатив једине (фелдспат, метаморфит) док се у ГеолИСС-у користи често множина (фелдспати, метаморфити,...), тако да је линковање ових записа неопходно урадити преко изведених облика речи. Анализом фреквенција у корпусу текстова и срањивањем са базом ГеолИСС је установљено да одређени број термина постоји у морфолошким речницима али немају обележје да је у питању геолошки термин. Коришћењем додатних информација у ГеолИСС-у о речницима минерала и стена, направљено је поређење везано за семантичке маркере, где су такође захтеване допуне. Прва фаза допуна маркера је урађена, а активности на уносу нових записа су у току.

Слика 1 приказује панел система Лексимирка која се користи за управљање речницима и пружа опцију повезивања одредница, односно лексичких записа, успостављање релација међу записима (1: кречњак-кречњачки), генерисање свих граматички исправних облика речи (2: кречњак, кречњака, кречњацима,...), повезивање са примерима употребе у корпусу текстова (3), са едитором сложених речи (4), са изведеним фразама похрањеним у речнику (5) и фреквенцијом појављивања израза у којима реч учествује за неки од изабраних образаца (6, образац придев+именица). Повезивање морфолошког речника је остварено са речником ГеолИССТерм и Рудонто тако да се на панелу могу видети и дефиниције, синоними и преводни еквиваленти селектованог термина. Напоменимо да су приказани примери и фреквенције генерисани на основу корпуса Тумача ОГК.

**krečnjak** 📖 👤

**NOUN** 1

Relations:

- To krečnjački using **relacioni pridev** (K\_cyki)

Check in dictionaries:

- show DRJ
- show WordNet
- show RSinonima
- show Terminološki

**krečnjak** м мин. *седиментна стена састављена од калцијум-карбоната (CaCO<sub>3</sub>) збојља и мангана, силицијума, песка и др*; *камен који служи за печење, прављење*

Krečnjak sin: .Hemijska i/ili biohemijska sedimenta stena izgrađena od kalcijum-karbonata.  
eng: Krecnjak; syn: Hemijska i/ili biohemijska sedimenta stena izgrađena od kalcijum-karbonata. . Domen: Geologija. Izvor: GeolISSTerm.

**krečnjak** Sedimentne stene bogate kalcijum karbonatom koje ponekad sadrže i mangana, silicijuma, peska i dr.  
eng: limestone; A sedimentary rock rich in calcium carbonate that may contain manganese, silicon, sand and other.  
Rudarstvo. Izvor: RudOnto.

Is a component of:

- rudistni krečnjak
- detritični krečnjak
- dolomitični krečnjak
- dolomitski krečnjak
- jurski krečnjak
- krečnjak debljine
- krečnjak donje krede
- krečnjak donjeg trijasa
- krečnjak gornjeg trijasa
- krečnjak sa faunom
- krečnjak sa ostacima
- krečnjak sa sočivima
- krečnjak srednjeg trijasa
- krečnjak urgonske facije
- lajtovački krečnjak
- masivan krečnjak
- oolitični krečnjak
- oolitski krečnjak
- organogeni krečnjak

laporovit krečnjak	359
peskovit krečnjak	233
dolomitičan krečnjak	211
sprudni krečnjak	130
masivan krečnjak	114
trijaski krečnjak	112
slojevit krečnjak	98
kristalast krečnjak	91
bankovit krečnjak	87
mermerisan krečnjak	82
rudistni krečnjak	74
mezozojski krečnjak	61
urgonski krečnjak	51
titonski krečnjak	46
pločast krečnjak	38
organogeni krečnjak	38
srednjotrijaski krečnjak	35
detritičan krečnjak	34

**jurski krečnjak** 📖 👤 4

Check in external dictionaries: Wiktionary [🔗](#) Babelnet [🔗](#) Termi [🔗](#) Glosbi [🔗](#)

Senses (1):

1. +SIN=AXN(sin)+DOM=Geol

Domains: geologija  
Properties: SIN+AXN(sin)  
Is composed of:

Form	Lemma	FST Code	Gram Cat	Separator
jurski	jurski	A2	adms1g	
krečnjak	krečnjak	N9	ms1q	

Слика 1. Панел Лексимирке за управљање речницима са везом ка корпусу текстова.  
Figure 1. Leximirka's panel for dictionary management with a link to the corpus of texts.

## ГеолИСС и Википодаци

Када су Википодаци у питању, у овом раду ћемо се фокусирати на пројекте: Геологија<sup>1</sup> и Минералологија<sup>2</sup> у чије активности се укључио тим са Рударско-геолошког факултета. На списак својстава која су предвиђена додали смо везе ка системима GeoSciML и ГеолИСС.

Хармонизација система је ишла у више праваца. Прво је проверено шта постоји у Википодацима и ГеолИСС-у, урађена су мапирања и након тога су селектоване групе података за додавање. Мали број термина је постојао на српском, тако да је унет термин на српском на основу енглеског еквивалента. Унет је један број недостајућих термина у Википодатке, а у наредном периоду ће се наставити са уносом.

Имајући у виду да су неретко записи у отвореним подацима резултат аутоматске обраде и превођења без додатне контроле стручњака за конкретан домен, провера и корекције садржаја су активности коју треба укључити у сваки процес рада са отвореним подацима. Тако је на пример писало „*изворно класни елементи минерали*“ уместо „*самородни елементи*“ за енглески термин „*native element*“. Провера је урађена за све преводне еквиваленте који су се нашли и у ГеолИСС-у и у Википодацима, тако да се разлике углавном разрешене. Слика 2

<sup>1</sup> [https://www.wikidata.org/w/index.php?title=Wikidata:WikiProject\\_Geology](https://www.wikidata.org/w/index.php?title=Wikidata:WikiProject_Geology)

<sup>2</sup> [https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:WikiProject\\_Mineralogy](https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:WikiProject_Mineralogy)



приказује пример једног минерала приказаног на интерфејсу Википодатака (1), SPARQL упита (2), резултата приказаног у виду графа (3) и таблице (4).

The image shows a Wikidata interface for the mineral 'турмалин' (Tourmaline). It includes a descriptive entry (1), a SPARQL query (2) that filters for items in the 'ортосиликати и цикло силикати' group, a semantic network graph (3) showing relationships between 'турмалин' and other minerals like 'аксинит', 'данбурит', and 'титанит', and a table (4) listing these related items with their Wikidata IDs and labels.

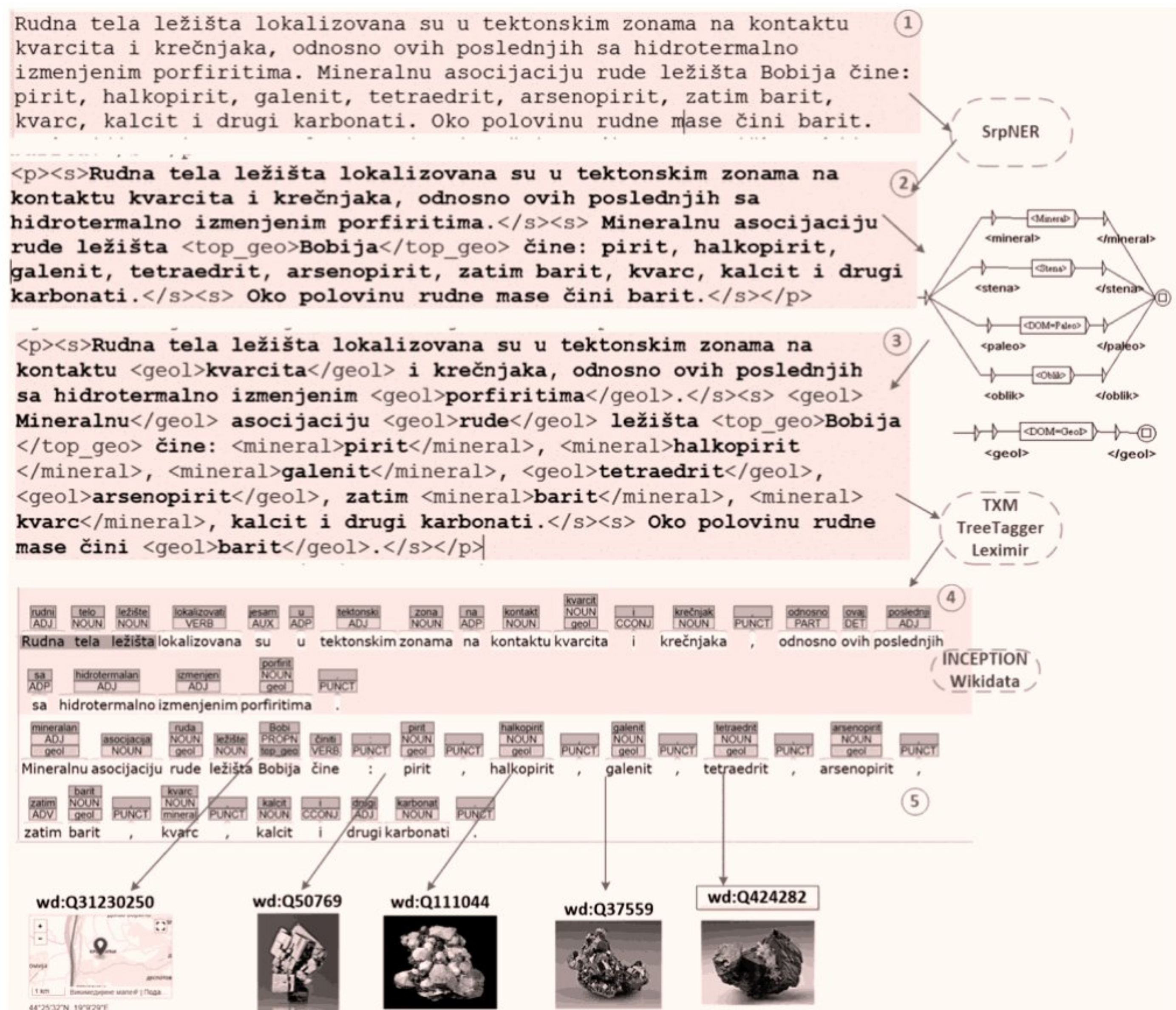
group	groupLabel	item	itemLabel
Q11515780	ортосиликати и цикло силикати	Q3777565	аксинит
Q11515780	ортосиликати и цикло силикати	Q424270	данбурит
Q11515780	ортосиликати и цикло силикати	Q1923318	монтицелит
Q11515780	ортосиликати и цикло силикати	Q178928	циркон
Q11515780	ортосиликати и цикло силикати	Q179911	турмалин
Q11515780	ортосиликати и цикло силикати	Q377280	титанит
Q11515780	ортосиликати и цикло силикати	Q2075342	лампрофилит
Q11515780	ортосиликати и цикло силикати	Q11515780	турмалин

Слика 2 Википодаци: пример једног минерала и семантичке мреже повезаних ставки  
Figure 2 Wikidata: example of a single mineral and semantic network of related items

### Машинска разумљивост геолошких текстова на српском језику

Да би се обезбедила машинска разумљивост геолошких текстова на српском језику, неопходна је спрезање терминолошких речника и лексичке базе података. Разумевање природног језика или тумачење природног језика (Allen 1988) је подтема обраде природног језика у вештачкој интелигенцији која се бави аутоматским разумевањем текста. Аутоматско (машинско) разумевање природног језика сматра се проблемом који је тежак за вештачку интелигенцију и захтева развој комплексних система, ресурса, модела и алата за подршку.

Наиме, како се у тексту термини појављују у различитим граматичким облицима а у терминолошким и дескриптивним речницима само у основном облику (обично номинатив јединине, евентуално множине), неопходно је систем снабдети експлицитно записаним информацијама и граматичким облицима термина. Изнад граматичког слоја, потребан је слој семантичких информација, где ће кључни концепти бити обележени уносима из базе знања и/или онтологије. Слика 3 приказује трансформације текста, почевши од изворног текста (1) у ком су потом обележени пасуси, реченице и именовани ентитети (2) коришћењем алата и ресурса за обраду српског језика (Крстев 2008). У следећем кораку се примењује једноставан граф приказан на слици да би се дошло до текста у ком су препознати и обележени геолошки појмови (3) коришћењем маркера из електронског речника (Рујевић 2022). У четвртом кораку се трансформише у облик погодан за повезивање са базом знања, тако да се добија текст (4) снабдевен граматичким информацијама (врста речи и основни облик речи), семантичком етикетом и придружује јој се веза ка бази знања у овом случају Википодацима (5).



Слика 3 Трансформације текста, од изворног до граматички и семантички обележеног  
Figure 3 Transformations of the text, from original to grammatically and semantically marked

## Дискусија

Запажања о бенефитима објављивања семантички анотираних и отворених података, као што је предложио Tim Berners-Lee<sup>1</sup> (2010, 2011), проистекла из овог истраживања су сагласна са налазима Heath и Bizer (2011) и Skjæveland и Lian (2013).

За корисника скупа података, доступност података на Вебу у било ком формату, али са отвореном лиценцом је веома важна јер гарантује било какву употребу скупа података. Доступност машински читљивих структурираних података (нпр. Excel, CSV, XML) значи да корисник није ограничен на одређени скуп алата када обрађује и рукује скупом података. Извоз из ГеолИСС-а у структурирани формат и његово издавање под отвореном лиценцом могуће је у низу излазних формата.

Коришћење URI-ија (Uniform Resource Identifier) и отворених W3C стандарда за идентификацију ставки података, тако да се на њих може референцирати на Вебу, омогућавају лако проналажење и шему за додељивање идентификатора који ће вероватно бити глобално јединствени (за разлику од примарних кључева у релационим базама података који су јединствени у оквиру своје табеле базе података). Једноставна дистрибуција кроз системе без потребе за контекстуализацијом порекла података је кључна за успешну интеграцију података. SPARQL је моћан језик упита за RDF податке који се користе на Интернету преко SPARQL приступних тачака користећи постојећу веб инфраструктуру, тако да је много лакши за приступ од традиционалних система база података. Различити типови излаза и могућност интеграције резултата упита као табеле, графикона, мапе или HTML странице дају нове могућности за развој система.

Циљ истраживања је био да се започне трансформација геолошких отворених података у RDF и њихово повезивање како би били јавно доступни за претрагу људима и машинама, укључујући и путем базе знања Википодаци, као највеће глобалне базе знања. Поред креирања SPARQL приступних тачака за претрагу, креирају се примери основних образаца упита. Коришћење отворених повезаних геолошких података доприноси њиховој већој видљивости и разумљивости, не само корисницима са српског говорног подручја, већ и осталима. Скуп података са двојезичним ознакама у бази знања Википодаци на енглеском и српском треба континуално унапређивати. Повезивање појмова са дефиницијама свакако ће допринети томе да и они који нису стручњаци у области геологије боље разумеју објављене и већ доступне податке.

## Закључак

Ово истраживање представља прве кораке и наводи неке могуће ресурсе и технологије ка остварењу амбициозног циља - машинске разумљивости геолошких текстова на српском језику. У раду је дат кратак преглед литературе

---

<sup>1</sup> <https://www.w3.org/People/Berners-Lee/>

која је инспирисала истраживање, након чега су представљени ресурси који би били нарочито важни у остварењу овог циља. Један од предуслова је свакако отвореност, доступност и усаглашеност термилошких система, обезбеђење језичких еквивалената и граматичка подршка. Хармонизација података је илустрована кроз примере, након чега је приказан и конкретан пример аутоматске анотације текста структурним, граматичким и семантичким обележјима.

Пут до постизања циља је дугачак, и листа активности захтева интердисциплинарни рад геолога различитих дисциплина, терминолога, стручњака из области рачунарске лингвистике, информатичара.

## **Захвалност**

Аутор се захваљује Биљани Рујевић на помоћи у изради морфолошког геолошког речника у оквиру Лексимираке, Милице Иконић Нешић на помоћи са Википодацима и Оливери Китановић на одржавању ГеолИСС-а.

# **DATA HARMONIZATION USING LINKED OPEN DATA**

## **Introduction**

The various geological maps are published and shared online, whereas web applications supporting information extraction and knowledge representation are underdeveloped. This research is dedicated to the using of a Resource Description Framework (RDF) model to represent the geological knowledge. The animated graphical view of the ontologies enables interactions between the ontology, geological maps published as services and semantically annotated textual content. Several examples are already available in different areas of geology. Ma et al. (2019) have demonstrated the ontology-aided automatic annotations for geological time-scale concepts with animated geological time features in an online map. Wang et al. (2018) developed an ontology-driven data integration and visualization system for exploring geology, pointing out that the compatibility between local and global geologic standards, between different data sources, requires smart geoscience data services based on geoscience open data ontologies. Schiegl et al. (2019) published GeoERA vocabularies as the expert knowledge and terminology SKOS linked data. Tessarollo and Rademaker (2020) extended the Open WordNet for English with rock-related and other lithological terms using the Geological Survey of Austria Thesaurus that is partially used in the INSPIRE and available online and as set of RDF files, linked to several other resources: WikiData (<https://www.wikidata.org>), British Geological Survey data, GeoSciML and DBpedia, compliant with IUGS recommendations. Vintar and Martinc (2022) created knowledge base in the field of karstology using the frame-based approach, providing a multilingual, annotated resource of definition with

structured information, for text mining towards recognition of knowledge structures from the field of karstology.

Open data has gotten enormous propulsion over the last decades and established by government initiatives all over the World. The Serbia followed and the national open-data portal is established (<https://opendata.stat.gov.rs/>). The open data initiatives promote the online publication and sharing of various types of data, including geological data. Serbian Ministry of Mining and Energy of has published on open data portal several datasets related to landslides, geological dictionaries, and feature maps, but there is a plan to publish more data that might be on wider interest, especially those that are related to Disaster Risk Register of the Republic of Serbia and Integrated emergency and risk management system. To enable use of various users and tools, both from geology and other related domains e.g. civil engineering, ecology, mining, not only machine readable but machine understandable linked data, including semantic and multilingual harmonization.

The information retrieval and extraction from unstructured text and knowledge discovering from the big data is an ongoing challenge. Human knowledge has been mostly stored, transferred, and built in written unstructured textual form. Natural Language Understanding is part of Artificial Intelligence that try to solve that problem relaying on use of multilingual open linked domain specific data as a necessary step towards overcoming language barriers in man - machine interaction. TermFrame project employed the frame-based approach to build a visual knowledge base for the domain of karstology in three languages, English, Slovene and Croatian. The approach was the inspiration to make a similar experiment for Serbian and to integrate the result with existing linked open-data resources.

## **Material and methods**

### **Wikidata**

Wikidata is a knowledge base build to be a common source of certain types of data (eg event dates, book editions, minerals). This Wikimedia Foundation knowledge base can be used for a variety of purposes. Wikimedia Serbia and the University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology have jointly launched the project Using Wikidata for information retrieval, entity annotation and improvement of web content for Serbian language. In addition to manual input, in which students also participated, the process of preparation, input and connection is automated using the OpenRefine and QuickStatements tools.

Wikidata focuses on items that represent topics, concepts, or objects. Each item is assigned a unique, permanent identifier, a positive integer with the capital letter Q prefix, known as "QID". This allows the translation of the basic information needed to identify the topic covered by the item, without favouring any language, while ensuring the uniqueness of the meaning of a particular term.

Wikidata is just fitting into the trends of information technology development, which are pushing the boundaries from machine readability to machine comprehensibility of data on the web.

Here are some examples of items: place (Loznica, Q648489), person (Milutin Milanković, Q89054), event (Minoan eruption, Q1144693), object (geological hammer, Q1294756), term (geological time scale, Q43521), mineral (quartz, Q43010),... The concepts behind the items should be unique, it is possible that there are two items under the same name, for example: Jadar which can be Q3112617 - the region around the river Jadar in western Serbia or Q3112617 that represents the river. So, the item is associated with a unique identifier (QID), the identifier is associated with a pair: title and description, to remove any ambiguity. Apart from general items, also lexemes related to abstract concepts can be maintained.

An item identifier (QID), in addition to being associated with a title and description, can have multiple aliases and several statements (claims, expressions) that represent its properties and values. The statement is a triple: (item, property, value), where item (Q) - any topic (person, object, place, concept), property (P) - relation or characteristic relevant to the item (eg gender for people) (P21), capital for states (P1376), length (P2043) for rivers and value - either the literal itself (eg the length of the Danube is 2860 km) or a reference to another item (eg the capital of Serbia is Belgrade). An item can be described by a series of statements, each of which provides one fact or information about the item.

The translation of the sentence: “*Chalcopyrite is a type of mineral, whose chemical formula is CuFeS<sub>2</sub>, named after copper and pyrite.*” into statements and storage to the knowledge base Wikidata require as a first step to determine the key concepts and predicates that connect them. For example:

Chalcopyrite (Q111044) *is a (P31) type of mineral (Q12089225), whose chemical formula (P274) is CuFeS<sub>2</sub>, named after (P138) copper (Q753) and pyrite (Q50769)*

In the previous example, we have a subject rounded with a rectangle and three parts of a predicate-object sentence.

In Wikidata, this would be written in the form of RDF triplets, where each sentence has a subject predicate and object and it finish with a “.”:

- Q111044 P31 Q12089225. Q111044 P274 "CuFeS<sub>2</sub>". Q111044 P138 Q753 Q50769.

Same can be achieved with abbreviated notation, where the subject can be omitted and “;” is then used instead of “.”:

- Q111044 P31 Q12089225; P274 "CuFeS<sub>2</sub>"; P138 Q753 Q50769.

An important feature of Wikidata is that it has two faces: one for humans and the other for machines, which allows for several applications, such as text classification, indexing, text analysis, text generation, summarization, normalization, linking, mapping, and more.

Another important feature is multilingualism, each item can be linked to a label in any language registered on Wikimedia resources, which paves the way for many applications from automatic translation, classification of multilingual documents to content analysis on the web, business, scientific and social networks.

## **GeoSciML and EarthResourceML**

GeoSciML is data transfer standard for the exchange of digital geoscientific information, while EarthResourceML for mineral occurrences, mines and mining activity. It accommodates the representation and description of features typically found on geological maps, as well as being extensible to other geoscience data such as drilling, sampling, and analytical data. GeoSciML is used as the geoscientific data transfer standard by data sharing initiatives across the world, e.g., OneGeology project (Blagojević et al.), European INSPIRE Directive, US Geoscience Information Network, Canadian Groundwater Information Network, Australian Geoscience Information Network and AuScope projects, African-European Georesources Observation System.

The GeoSciML project was initiated in 2003 under the auspices of the CGI Working Group on Data Model Collaboration, while last version was published in 2020, available as XML, RDF and via SPARQL endpoint for search. GeoSciML comprises 35 dictionaries, while EarthResourceML comprises 18 dictionaries.

## **GeolISS**

The Geological Information System of Serbia (GeolISS) is intended for storing geological data in digital form, enabling simpler data handling, as well as easier review of existing data. GeolISS is implemented in ESRI, ArcGIS technology as an .Net extension of ArcGIS. The system uses the enterprise ArcSDE geodatabase as the central repository within MS SQL Server. GeolISS allows users to interactively create queries, analyse spatial and other data, update data, maps and view results. Data modelling is inspired by various geological models, among which the GeoSciML scheme for the exchange of geological data used by CGI IUGS-a ([www.seegrid.csiro.au](http://www.seegrid.csiro.au)), NGMDB implementation of USGS and CGS ([www.nadm-geo.org](http://www.nadm-geo.org)), as well as models proposed by the International Organization for the Standardization of Geoinformation. Cartographic web services have also been developed in ArcGIS technology, with some services being open, and most are only available through the functions of the system itself.

GeolISSTerm is the core of GeolISS through which the validation, classification and specification of the values of the attributes of the observed and interpreted properties are performed, and on the basis of which the domains in GeolISS are formed. GeolISSTerm was created as a result of work on the project "Development of geological terminology and nomenclature for the geological database of Serbia", which was implemented by the Faculty of Mining and Geology and funded by the Ministry of Environment and Spatial Planning of the Republic of Serbia. Each term, ie concept, has a unique, numerical identifier in the database: for carbonates, for example, the number is 2769, so that the ID card of that concept can be found at <https://geoliss.mre.gov.rs/recnik/term.aspx?InstanceID=2769&tabSource=Concept>.

## **Serbian morphological dictionaries**

Morphological dictionaries of the Serbian language (Krstev 2008) are intended primarily for use in computer applications dealing with the processing of natural

languages. The addition of the dictionary with new words is based on the text corpus compiled from The booklet of base geological maps (OGK) published in the interval from 1962 to 1994 as published by the Federal Geological Survey, and in addition to existing semantic and domain (Rujević 2022). The data categories are accompanied by semantic markers denoting minerals "+ Mineral", rocks "+ Rock", geological form "+ Shape", as well as a designation for the domain of paleontology "+ DOM = Paleo", with previously introduced designations for domains: "+ Mining", "+ Safety", "+ RockMech", "+ Surveying", "+ EnvProt", "+ MinStatus", "+ Ore", "+ Activity", "+ Exploration" (Tomašević et al. 2018), and some general ones are used, such as "Mat" for material. Here are some examples of dictionary entries:

- hidroliskun,N1+DOM=Geol+Mineral+Mat
- planara,N600+DOM=Geol
- plagiognajs,N81+DOM=Geol+Stena+Mat
- moluska,N661+Zool+DOM=Paleo
- centriklinalni,A2+DOM=Geol+Oblik

Labels N1, N600, N81, N661, A2 refer to the algorithms used to generate all word forms, with DOM = Geol and DOM = Paleo defining the domain of the word, whereby these domains can be defined more precisely, and semantic markers provide additional information that it is a material, mineral, or rock.

## Results

### GeolISS and Leximirka

Data harmonization implied common concepts finding and missing or incorrectly associated information discovering. Based on the text corpus compiled from The booklet of basic geological map, a frequency list of word forms and the terms that appear has been made to check what is missing in the mentioned dictionaries.

The first step was a check between GeolISS and Leximirka, where it was registered that the nominative singular is used as the basic word form in morphological dictionaries (e.g. feldspar, metamorphite), while the plural (feldspars, metamorphites,...) is often used in GeolISS as the headword, so that linking of these entries needs to be done through inflected word forms. By analysing the frequencies in the corpus of texts and comparing them with the GeolISS database, it was established that a certain number of terms exist in morphological dictionary, but they do not have the explicit label that it is a geological term. Using additional information in GeolISS on dictionaries of minerals and rocks, a comparison was made regarding semantic labels, where additions were also required. The first phase of label amendment has been done, and activities on entering new records are in progress.

Figure 1 shows the panel of the Leximirka system used to manage dictionaries and provides the option of connecting determinants, ie lexical records, establishing relationships between entries (1: кречњак-кречњачки (limestone noun and adjective), generating all grammatically correct word forms (2: кречњак, кречњака, кречњацима,...limestone inflected forms), connecting with examples of use in the



corpus of texts (3), with the editor of compound words (4), with derived phrases stored in the dictionary (5) and the frequency of occurrence of expressions in which the word participates for some of the selected forms (6, adjective + noun expression). The linking of entries from the morphological dictionary was achieved with the dictionaries GeolISSTerm and Rudonto, so that the definitions, synonyms and translation equivalents of the selected term can be seen on the panel. Note that the examples and frequencies generated based on the corpus of The booklets of basic geological map are presented.

## **GeolISS and Wikidata**

When it comes to Wikidata, in this paper we will focus on the projects: Geology and Mineralogy, in whose activities we are also involved. We have added links to the GeoSciML and GeolISS terminology systems to the list of properties provided.

The harmonization of the system went in several directions. First, what exists in Wikipedia and GeolISS was checked, mappings were made, and then data groups were selected for addition. A small number of terms existed in Serbian, so a term in Serbian based on the English equivalent was entered. Several missing terms have been entered in Wikidata, and the entry will continue in the following period.

Having in mind that records in open data are often the result of automatic processing and translation without additional control of experts for a specific domain, checking and correcting content is an activity that should be included in every process of working with open data. For example, it was written „*изворно класни елементи минерали*“ instead of "*самородни елементи*" for the English term "native element". The check-up was done for all translation equivalents that were found in both GeolISS and Wikidata, so that the differences are mostly resolved. Figure 2 presents an example of a mineral shown on the Wikidata interface (1), SPARQL query (2), and its results shown as a graph (3) and the table (4).

## **Machine comprehensibility of geological texts in the Serbian language**

To ensure the machine comprehensibility of geological texts in the Serbian language, it is necessary to combine terminological dictionaries and lexical base. Natural-language understanding (NLU) or natural-language interpretation (NLI) (Allen 1988) is a subtopic of natural-language processing in artificial intelligence that deals with machine reading comprehension. Natural-language understanding is considered an AI-hard problem that requires the development of complex systems, resources, models, and supporting tools. Namely, as terms appear in the text in different grammatical forms and in terminological and descriptive dictionaries only in the basic form (usually the singular nominative, possibly the plural), it is necessary to provide the system with explicitly written information and grammatical forms of terms. Above grammatical layer, semantic information layer is required, where the key concepts will be annotated with entries from a knowledge base and/or with an ontology. Figure 3 shows the transformations of the text, starting with the original text (1) in which paragraphs, sentences and named entities (2) are then marked using tools and resources for the processing of Serbian language (Krstev 2008). In the next step, a simple graph

shown in the figure is applied to produce a text in which geological terms (3) are recognized and annotated using markers from the electronic dictionary (Rujević 2022). In the fourth step, it is transformed into a form suitable for connection with the knowledge base, so that the text (4) is provided with grammatical information (part of speech and canonical form), semantic label and is joined by a link to the knowledge base - in this case Wikidata (5).

## **Discussion**

The findings are in accordance with Heath and Bizer (2011), as well as with Skjæveland and Lian (2013) observation related to the benefits from publishing of data as semantically annotated and query enabled linked open data, as proposed by Tim Berners-Lee (2010, 2011), the inventor of the World Wide Web.

For the consumer of the dataset, the data availability on the Web in whatever format, but with an open licence is very important as it warrants any use of the dataset at all. Making it available as machine-readable structured data (e.g., Excel, CSV, XML) means the user is not confined to a specific tool-set when processing and manipulating the dataset. The export from the GeolISS to a structured format and releasing it under an open licence is possible in a range of output formats.

Use URIs (Uniform Resource Identifier) and open standards from W3C to identify data items, so that they can be referenced on the Web provide easy retrieval and a schema for assigning identifiers which are likely to be globally unique (unlike primary keys in relational databases that are unique within their database table). Easy distribution across systems without the need for contextualising the origins of the data is crucial for successful data integration. The SPARQL is a powerful query language for RDF data used on the Internet through SPARQL endpoints using existing web infrastructure, so it is much easier for accessing than traditional database systems. Different output types and possibility of integration of query results as table, graph, map or HTML page gives new opportunities for system development.

The aim of this research was to start the transformation of geological open data into RDF and linked open data to be publicly available for search (without logging in) by man and machines and via the knowledge base Wikidata. In addition to creating SPARQL access points for searching open related data, examples of basic queries and forms for further implementation will be created. The use of open geological dictionaries would provide semi-automatic translation into English of labels from the open set, which expands the already published open set and contributes to greater visibility and comprehensibility of data, not only to Serbian speakers, but also to foreign stakeholders. Data with bilingual labels in the Wikidata knowledge base in English and in Serbian should be continually expanded. Linking terms with definitions will certainly contribute to the fact that even those who are not experts in the field of geology can better understand published and already available data.

## Conclusion

This research represents the first steps and lists some possible resources and technologies towards achieving an ambitious goal - machine comprehensibility of geological texts in the Serbian language. The paper gives a brief overview of the literature that inspired the research, after which the resources that would be particularly important in achieving this goal are presented. One of the preconditions is certainly the openness, accessibility and harmonization of terminological systems, the availability of language equivalents and grammatical support. The harmonization of data is illustrated through examples, after followed by a concrete example of automatic annotation of text with structural, grammatical, and semantic features is presented.

The path for achieving this goal is long, and the list of activities requires interdisciplinary work of geologists of various disciplines, terminologists, experts in the field of computational linguistics, computer scientists.

## Acknowledgement

The author thanks Biljana Rujević for assistance with morphological geological dictionary development within Leximirka, Milica Ikonić Nešić for assistance with Wikidata and Olivera Kitanović for GeolISS maintenance.

## Литература – References

- Allen, James. Natural language understanding. Benjamin-Cummings Publishing Co., Inc., 1988.
- Berners-Lee, Tim. Linked Data. 2010. URL: <http://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>.
- Berners-Lee, Tim. Putting Government Data Online. July 2011. URL: <http://www.w3.org/DesignIssues/GovData.html>.
- Blagojević, Danka, Stanković Ranka, Stejić Petar, Nikolić Velizar, "Srbija u OneGeology Europe", Zapisnici Srpskog geološkog društva za 2013. Godinu (2014): 79-95.
- Heath, Tom and Christian Bizer. Linked Data: Evolving the Web into a Global Data Space. 1st ed. Morgan & Claypool, 2011.
- Krstev, Cvetana. 2008. Processing of Serbian. Automata, Texts and Electronic Dictionaries. Faculty of Philology of the University of Belgrade.
- Skjæveland, Martin G., and Espen H. Lian. "Benefits of publishing the Norwegian Petroleum Directorate's FactPages as Linked Open Data." Proc. of Norsk informatikkonferanse (NIK 2013). Tapir (2013).
- Ma, Xiaogang, Emmanuel John M. Carranza, Chonglong Wu, and Freek D. van der Meer. "Ontology-aided annotation, visualization, and generalization of geological time-scale information from online geological map services." Computers & geosciences 40 (2012): 107-119.
- Рујевић, Биљана, Речници у дигиталном добу – информатичка подршка за српски језик, 2022, докторска дисертација, Универзитет у Београду, Филолошки факултет.
- Schiegl, M., L. Sörös, M. Pantaloni, O. Johansson, and R. van Ede. (2019) "GeoERA Project Vocabularies." <https://geoera.eu/wp-content/uploads/2019/11/D4.3-GeoERA-Project-Vocabularies.pdf>

- Tessarollo, Alexandre, and Alexandre Rademaker. "Inclusion of Lithological terms (rocks and minerals) in The Open Wordnet for English." In Proceedings of the LREC 2020 Workshop on Multimodal Wordnets (MMW2020), pp. 33-38. 2020.
- Tomašević Aleksandra, Ranka Stanković, Miloš Utvić, Ivan Obradović, Božo Kolonja , "Managing mining project documentation using human language technology" y The Electronic Library (2018)
- Vintar, Špela, and Matej Martinc. "Framing karstology: From definitions to knowledge structures and automatic frame population." Terminology, vol 28-1, (2022).
- Wang, Chengbin, Xiaogang Ma, and Jianguo Chen. "Ontology-driven data integration and visualization for exploring regional geologic time and paleontological information." Computers & geosciences 115 (2018): 12-19.

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les années 2022*

*REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022*

Beograd, 2023

**Бранко Костић<sup>1</sup>, Ксенија Ераковић<sup>1</sup>, Дејан Прелевић<sup>1</sup>, Сабина Ковач<sup>1</sup>,  
Драгана Животић<sup>1</sup>**

**Branko Kostić<sup>1</sup>, Dejan Prelević<sup>1</sup>, Sabina Kovač<sup>1</sup>, Ksenija Eraković<sup>1</sup>, Dragana  
Životić<sup>1</sup>**

## КОМПАРАЦИЈА МЕТОДА XRF И ICP-MS НА УЗОРЦИМА УГЉА И ПРОДУКТИМА САГОРЕВАЊА

## COMPARISON OF XRF AND ICP-MS METHODS ON COAL SAMPLES AND COMBUSTION PRODUCTS

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД - PAPER

**Апстракт:** Узорци угља, пепела и електрофилтерског пепела који су прикупљени из термоелектране „Никола Тесла А” у Обреновцу, коришћени су да се прикажу разлике у концентрацијама елемената коришћењем две различите аналитичке методе. У оквиру истраживања извршена је компарација резултата добијених испитивањем угља и продуката сагоревања применом рендген флуоресцентне анализе (XRF) и масене спектрометрије индуковане спрегнуте плазме (ICP-MS). Анализом резултата утврђена је евидентна диспропорција у концентрацији Rb, Zr, Sr, Ba и As. Више концентрације наведених елемената детектоване су применом XRF методе и то у узорцима електрофилтерског пепела, при чему је концентрација Sr и до два пута већа у односу на вредност измерену ICP-MS методом. У циљу допуне истраживања извршена је анализа скенирајућом електронском микроскопијом којом је утврђено присуство кварца и гвожђевитих фелдспата трансформисаних услед сагоревања.

Констатовано одступање у концентрацијама наведених елемената проузроковано је претежно услед разлике током процеса припреме узорака, као и термодинамичких услова у систему инструменталних метода. Разлика у концентрацији Sr може се објаснити непотпуним разлагањем алумосиликата током процеса припреме узорака. Непотпуно четворокомпонентно разлагање последица је и разлике у концентрацији Rb и Zr, док се разлике у концентрацији Ba и As објашњавају волатилизацијом ових елемената у процесу жарења код ICP-MS методе.

**Кључне речи:** геохемија, угаљ, продукти сагоревања, XRF, ICP-MS

**Abstract:** Samples of coal, slag and fly ash collected from the Thermal Power Plant "Nikola Tesla" in Obrenovac were analyzed using two different analytical methods aimed to show

---

<sup>1</sup> Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, 1100 Београд  
University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Belgrade, Serbia  
Authors' E-mail: g66-20@rgf.bg.ac.rs

differences in content of elements. As part of the research, a comparison was made of the results obtained by examining coal and combustion products using X-ray fluorescence analysis (XRF) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results demonstrate an obvious discrepancy in the content of Rb, Zr, Cr, Ba and As. Higher contents of several elements were detected by the XRF method in fly ash samples, where the concentration of Cr is up to 2x higher than the value measured by the ICP-MS method. Scanning electron microscopy (SEM-EDS) analysis was performed to constrain mineral composition. The presence of quartz and iron feldspar indicates transformation of primary minerals due to combustion.

The observed mutual deviation in the concentration of elements is caused mainly due to the difference during the process of sample preparation, as well as the thermodynamic conditions in the system of instrumental methods. The difference in Cr concentration can be explained by the incomplete decomposition of silicates during the digestion process. Incomplete four-component digestion is a consequence of differences in the concentration of Rb and Zr, while differences in the concentration of Ba and As are explained by the volatilization of these elements in the annealing process in the ICP-MS method.

**Key words:** geochemistry, coal, combustion products, XRF, ICP-MS

## 1. Увод

Угљеви ниског ранга – лигнити у Републици Србији представљају главну енергетску сировину која се користи за производњу електричне енергије. Продукти сагоревања лигнита често представљају један од извора загађења животне средине због садржаја потенцијално токсичних елемената. Сагоревањем ових угљева у термоелектранама (годишње око 35 - 40 милиона тона) годишње се генерише око 5,5 милиона тона отпада - секундарног материјала (<https://www.eps.rs>, Животић и др., 2012). Овај материјал укључује шљаку, односно високотемпературни пепео који остаје наталожен на дну котла, као и пепео (углавном испод 100  $\mu\text{m}$ ) који се делимично издваја на електрофилтерима из струје димних гасова електростатичком сепарацијом, односно електрофилтерски пепео. Хемијски и минерални састав пепела и електрофилтерског пепела је сложен и зависи од услова (pH, Eh) депоновања органске супстанце, врсте органске супстанце и даљих процеса карбонификације. Оваква сложеност последица је чињенице да током сагоревања угаљ пролази кроз процесе декомпозиције, волатилизације, фузије, агломерације или кондезације (Ahmaruzzaman, 2010; Izquierdo & Querol, 2012). Сви ови процеси у различитој мери могу да утичу на састав пепела.

Даља употреба продуката сагоревања лигнита зависи од њиховог састава и садржаја токсичних микроелемената. Због еколошких проблема које представља електрофилтерски пепео, широм света урађена су бројна истраживања његове даље примене. Доказана је његова примена у грађевинарству, као јефтиног адсорбента за уклањање органских једињења, димних гасова и метала, лаког агрегата, засипања рудника, подлоге пута и синтезе зеолита (Ahmaruzzaman, 2010). Такође су спроведена додатна истраживања о могућностима коришћења летећег пепела за адсорпцију  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , органских једињења и живе из ваздуха, боја и других органских једињења у води. Утврђено је да се летећи пепео може користити као адсорбент за уклањање различитих загађивача, при чему капацитет адсорпције летећег пепела може бити повећан након хемијске и физичке активације (Ahmaruzzaman, 2010). Истраживања спроведена у свету показала су да електрофилтерски пепео има добар потенцијал за употребу у

грађевинској индустрији. Тако да претварање летећег пепела у зеолите не само да решава проблем одлагања, већ и претвара отпадни материјал у производ који се може продати. Истраживања су такође открила да несагорели угаљ у летећем пепелу игра важну улогу у његовом капацитету адсорпције (Ahmaruzzaman, 2010; Izquierdo & Querol, 2012).

Ранија истраживања минералног и хемијског састава атмосферских честица (Цветковић, 2013; Svetković et al., 2013) у делу Колубарског басена одакле се транспортује угаљ за сагоревање у ТЕ „Никола Тесла А”, указала су на повишен садржај халкофилних елемената нарочито As и Cd, као и концентрација укупних аероседимената у распону од 124,0 mg/m<sup>2</sup> по дану до 402,9 mg/m<sup>2</sup> по дану. Доминантни минерали заступљени у испитиваним аероседиментима били су: кварц, фелдспати, минерали глина, хематит и гипс. Могућност употребе електрофилтерског пепела и пепела са депоније термоелектране „Никола Тесла А” као отпада са употребном вредношћу доказана је у виду адитива цементу код производње бетона (Животић и др., 2012). Будући да су у електрофилтерском пепелу утврђене повећане концентрације As, Ni, Be и Cu претходно је неопходно њихову концентрацију пре примене смањити технолошким поступцима и довести у одговарајући опсег.

Савремене аналитичке методе које се користе за утврђивање макро- и микроелемената у угљу, пепелу и електрофилтерском пепелу имају своје предности и мане. Одређени утицај на одабир аналитичке методе има расподела ових елемената у угљу и њихови геохемијски афинитети, односно да ли се налазе у виду органских и/или неорганских једињења. У овој студији, испитиване су карактеристике угља и нуспродуката сагоревања и извршена је анализа промене састава угља током процеса његове доминантне примене - сагоревања у термоелектрани „Никола Тесла А”, као и честица које директно утичу на састав атмосфере. Узорковање је извршено у оквиру постројења (Слика 1) при чему су узорковани угљеви припремљени за сагоревање, узорци пепела који су настали услед сагоревања угља, као и електрофилтерски пепео који је задржан на филтеру термоелектране. Истраживање је изведено у циљу компарације садржаја макро- и микроелемената применом XRF и ICP-MS методе и одређивања геохемијских карактеристика угља и продуката сагоревања узоркованих у Термоелектрани „Никола Тесла А”.

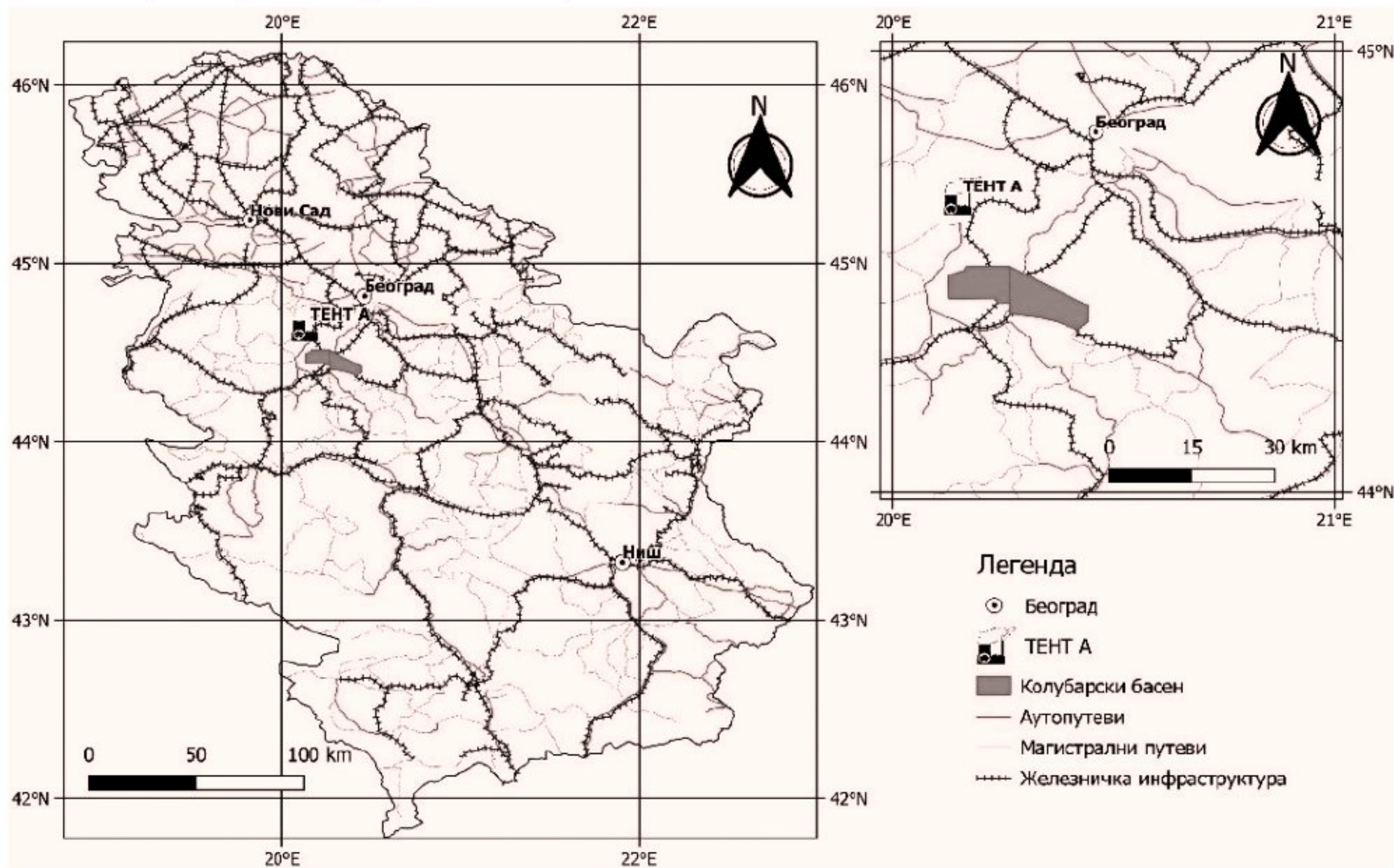
## **2. Узорци и методе**

### **2.1. Узорци**

Узорци пепела (шљаке), електрофилтерског пепела (летећег пепела) и угља, анализирани у овом раду добијени су од колега са Универзитета у Београду Машинског факултета током 2006. године, а узети су из Термоелектране „Никола Тесла А” у Обреновцу. Узорковање угља вршено је ручно према стандарду СРПС ИСО 18283:2016, док је узорковање пепела и електрофилтерског пепела рађено по принципу најбоље индустријске праксе, односно ручно из крацера (пепео) и испод електрофилтера (електрофилтерски пепео) према интерним упутствима.

Пре узимања свих узорака извршено је детаљно чишћење котлова и електрофилтера. Издвојена су 4 узорка угља, при чему сваком од узорака угља

одговарају одређени узорци пепела и електрофилтерског пепела. Узорци су класификовани према пореклу те су узети узорци пепела, електрофилтерског пепела и угља. Укупно је узето 14 узорка, од чега 4 узорка пепела, 6 узорка електрофилтерског пепела и 4 узорка угља, чија је нумерација приказана у Табели 1. Изглед испитиваних узорка пепела, електрофилтерског пепела и угља-лигнита у микроскопу приказан је на Слици 2.

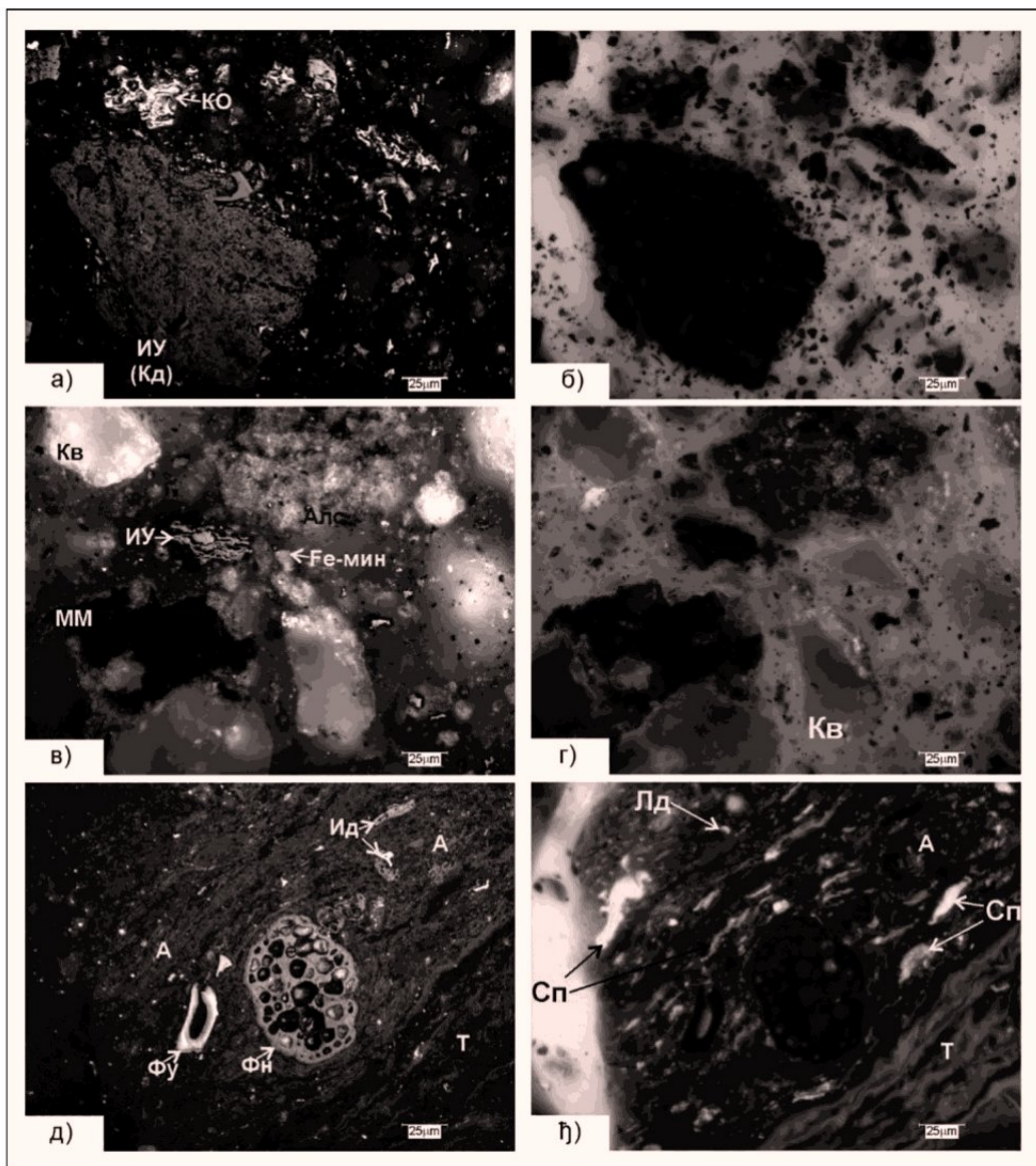


Слика 1. Положај узетих узорка за испитивања (према <https://www.diva-gis.org/gdata>)

Табела 1. Списак испитиваних узорка

Ознака узорка	Лаб. бр.	Врста узорка
ТЕ-А1/1	2252	Пепео
ТЕ-А1/2	2253	Пепео
ТЕ-А1/3	2254	Пепео
ТЕ-А1/4	2256	Пепео
ТЕ-А1/5	2257	Електрофилтерски пепео
ТЕ-А1/6	2258	Електрофилтерски пепео
ТЕ-А1/7	2259	Електрофилтерски пепео
ТЕ-А1/8	2260	Електрофилтерски пепео
ТЕ-А1/9	2261	Електрофилтерски пепео
ТЕ-А1/10	2262	Електрофилтерски пепео
ТЕ-А1/11	2263	Угаљ-лигнит
ТЕ-А1/12	2264	Угаљ-лигнит
ТЕ-А1/13	2265	Угаљ-лигнит
ТЕ-А1/14	2266	Угаљ-лигнит





Слика 2. Фотомикрографије испитиваних узорка у одбијеној нормалној (а, в, д) и ултраљубичастој светлости (б, г, њ); а,б) Узорак пепела ТЕ-А1/2, ИУ (Кд) – Измењени угаљ (колдетринит), КО – коксни остатак; в, г) Узорак електрофилтерског пепела ТЕ-А1/6, ИУ – Измењени угаљ, ММ – минералне материје од сагорелог угља, Кв – кварц, Алс – алумосиликати, Fe – гвожђевити минерали; д, њ) Узорак угља ТЕ-А1/11, Т – текстинит, А – атринит, Сп – споринит, Лд – липтодетринит, Фу – фузинит, Фн – фунгинит, Ид – инертодетринит

## 2.2. Методе

### 2.2.1. XRD

За одређивање минералних фаза у узорцима пепела (ТЕ-А1/1, ТЕ-А1/3), електрофилтерског пепела (ТЕ-А1/7, ТЕ-А1/10) и угља (ТЕ-А1/12, ТЕ-А1/14),

коришћена је метода рендгенске дифракције на поликристалном материјалу. Испитивања методом рендгенске дифракције праха (XRPD) извршена су у Лабораторији за кристалографију Универзитета у Београду - Рударско-геолошког факултета на равним узорцима, као и анализа глиновите фракције припремом оријентисаних препарата. Узорци су испитани на дифрактометру за прах Rigaku SmartLab (Rigaku PDXL 2, 2007) под следећим условима: радни напон 40 kV, јачина струје 30 mA, рендгенско зрачење са антикатоде бакра ( $\text{CuK}\alpha=1,54178 \text{ \AA}$ ), графитни монохроматор. Опсег испитивања равних узорака био је  $5 - 50^\circ 2\theta$  са кораком  $0,01^\circ 2\theta$ , и временском константом  $5^\circ / \text{min}$ . Опсег испитивања оријентисаних препарата био је  $2 - 30^\circ 2\theta$ , са кораком  $0,01^\circ 2\theta$  и временском константом  $10^\circ / \text{min}$ . Добијени подаци положаја дифракционих максимума  $2\theta$  ( $^\circ$ ), вредности међупљосних растојања  $d_{hkl}(\text{Å})$  за све рефлексije, као и одговарајући релативни интензитети  $I/I_{\text{max}}$  дати су графички. На основу добијених вредности интензитета  $I/I_{\text{max}}$ , међупљосних растојања  $d$  и упоређивањем са литературним подацима и ICDD стандардима, идентификоване су присутне кристалне фазе.

За ближе одређивање минерала из групе слојевитих силиката, а посебно глина, узорци су припремљени посебним поступком, тако што су из водене суспензије на стакленим плочицама припремљени „оријентисани препарати“ који су затим сушени на ваздуху, посебно засићавани у средини са етиленгликолом и термички третиран на  $550^\circ\text{C}$ . Поступком припреме оријентисаних препарата добијени су појачани базни дифракциони максимуми ( $00l$ ), чији се положаји при различитом третману могу померати и њихови интензитети мењати у зависности од врсте присутног минерала. Промене положаја и интензитета дифракционих максимума приликом ових третмана приказане су графички.

### 2.2.2. SEM

Скенирајућа електронска микроскопија (SEM) извршена је JEOL JSM-6610LV електронским микроскопом повезаним са INCA јединицом за анализу енергије диспергованих рендгенских зрака, као и EDX аналитичког система. Напон убрзања који је коришћен износио је 50 kV. Током припреме, узорци су најпре уроњени у епоксидну смолу и исполирани, а затим је извршено напаравање узорака златом. Ова испитивања урађена су на узорцима пепела (TE-A1/3), електрофилтерског пепела (TE-A1/7) и угља (TE-A1/12).

### 2.2.3. ICP-MS

Анализа применом масене спектрометрије са индукованом куплованом (спрегнутом) плазмом (ICP-MS) извршена је у ACME Analytical Laboratories, Vancouver, Ltd, Канада. На почетку припреме извршено је сортирање и евидентирање узорака, након чега је извршено сушење свих узорака на  $60^\circ\text{C}$ , а затим просејавање на сити од 80 mesh-a ( $180 \mu\text{m}$ ).

Унутар тefлонских епрувета одмерено је 0,25 g уситњеног материјала чему је додат аликвот од 10 ml раствора киселина  $\text{H}_2\text{O}-\text{HF}-\text{HClO}_4-\text{HNO}_3$  у односима 2:2:1:1, након чега је раствор загреван до кључања и остављен на сушење. Остатку раствора додат је аликвот од 4 ml 50% HCl који је загреван у

микроталасној пећи. Након хлађења раствори су пренети у полипропиленске епрувете у које је додато 10 ml са 5% HCl. Контрола резултата извршена је интерним стандардима STD DST6, Oreas 24P и Oreas 45P, а коначну верификацију резултата извршио је British Columbia Certified Assayer.

#### 2.2.4. XRF

Рендгенска флуоресцентна анализа (XRF) извршена је у лабораторији Савезног института за геонауке и природне ресурсе (BGR) у ХанOVERу, Немачка, а коришћена је за квантитативно одређивање укупног садржаја елемената у узорцима, будући да ова метода функционише независно од степена растворљивости различитих елемената. Узорци су анализирани у облику брикета како би се обезбедила хомогена расподела елемената. Припрема узорка започета је издвајањем 1 g фино млевеног узорка (величине честица < 40  $\mu\text{m}$ ) након чега је исти жарен у порцеланском лончићу у пећи на 1030°C у трајању од 10 минута. Губитак при жарењу (LOI) накнадно је израчунат из губитка тежине узорака.

Ородисперзибилне таблете су формиране тако што су жарени узорци помешани са 5 g литијум метабората (за губитке при жарењу > 25% са 2,5 g литијум метабората и 2,415 g литијум тетрабората) и 25 mg литијум бромида након чега су растопљени у платинским лончићима у пећи за аутоматско топљење на 1200°C у трајању од 20 минута. Током процеса топљења, лончићи се ротирају у циљу хомогенизације узорка. Садржај макроелемената је представљен у виду оксида у тежинским процентима ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и сулфатни сумпор као  $\text{SO}_3$ ), након чега је прерачунат из оксида у елементе.

Програми за мерне секвенце и параметре су развијени и оптимизовани за два секвенцера. Мерење је вршено помоћу родијумске и хромиране цеви. Уређаји су калибрисани уз помоћ међународних референтних узорака, процене и матричне корекције са алфа корекцијом према de Jongh-у или према Philips моделу.

### 3. Резултати

#### 3.1. Минерални састав

У свим испитиваним узорцима, најдоминантији минерал је кварц (Табела 2; Слика 3), док су минерали из групе фелдспата и минерали глина мање заступљени. Анализом дифрактограма уочава се више аморфне материје у узорцима угља, као и узорку пепела TE-A1/1, у поређењу са узорком пепела TE-A1/3 који имају много мање аморфне материје. Појава мулита у електрофилтерском пепелу може се објаснити разградњом каолинита, илита и других минерала глина током сагоревања (Hower, 2012). Већи садржај мулита у електрофилтерском пепелу одговара повећаном садржају алумосиликата у угљу (Wu et al., 2019). У узорцима пепела поред кварца чији дифракциони максимуми доминирају и често маскирају ситније пикове мање присутних фаза, констатовано је присуство калцита, магнетита и минерала из групе лискуна.

Поређењем два дифрактограма узорака пепела може се видети разлика у присуству плагиокласа који изостаје у узорку ТЕ-А1/1, док је у узорку ТЕ-А1/3 могуће присуство кристобалита.

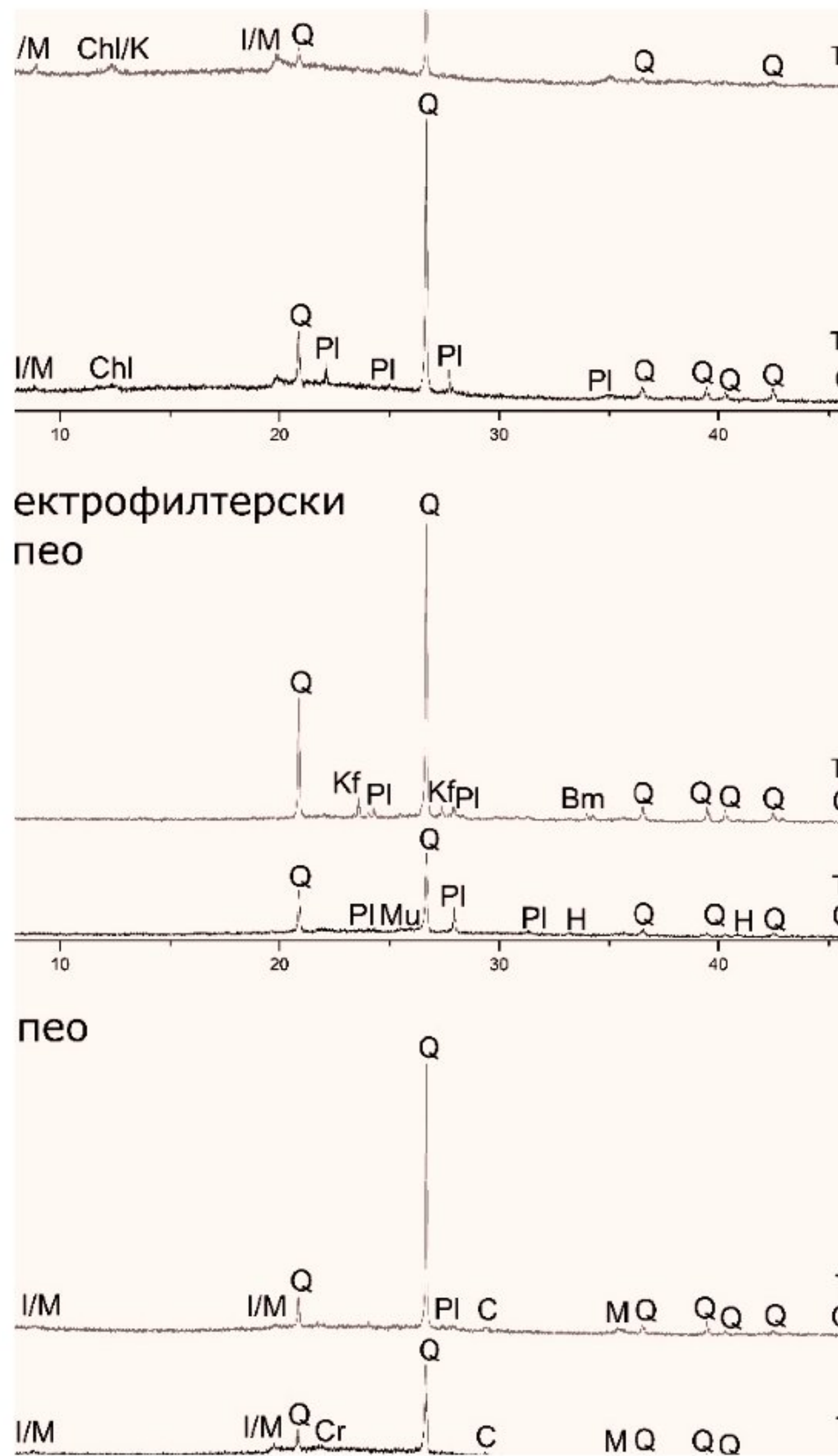
У узорцима електрофилтерског пепела доминира кварц, а присутан је и плагиоклас. У узорку ТЕ-А1/10 присутан је и К-фелдспат, док је у узорку ТЕ-А1/7 уочено присуство кристобалита, пироксена и лискуна. Узорак ТЕ-А1/10 садржи минерал браунмилерит који представља једну од аутигених фаза које се типично стварају током процеса производње цемента. У узорку ТЕ-А1/7 присутни су мулит и хематит, док се присуство анкерита и магнетита може претпоставити. Пик на  $23,5^\circ 2\theta$  у узорку ТЕ-А1/10 делимично припада плагиокласима и К-фелдспату, међутим интензитет овог пика је веома јак што индицира могуће присуство минерала дмистајнбергита (dmisteinbergite), који представља један од продуката сагоревања угљева.

Узорци угља представљени су претежно аморфном материјом и у оба узорка доминира кварц. У узорку ТЕ-А1/12 уочено је присуство плагиокласа, минерала из групе лискуна, могуће присуство хлорита и смектита. Може се претпоставити и присуство гипса и кристобалита. У узорку ТЕ-А1/14 констатовано је присуство минерала из групе слојевитих силиката као што су илит, смектит и каолинит (Слика 4).

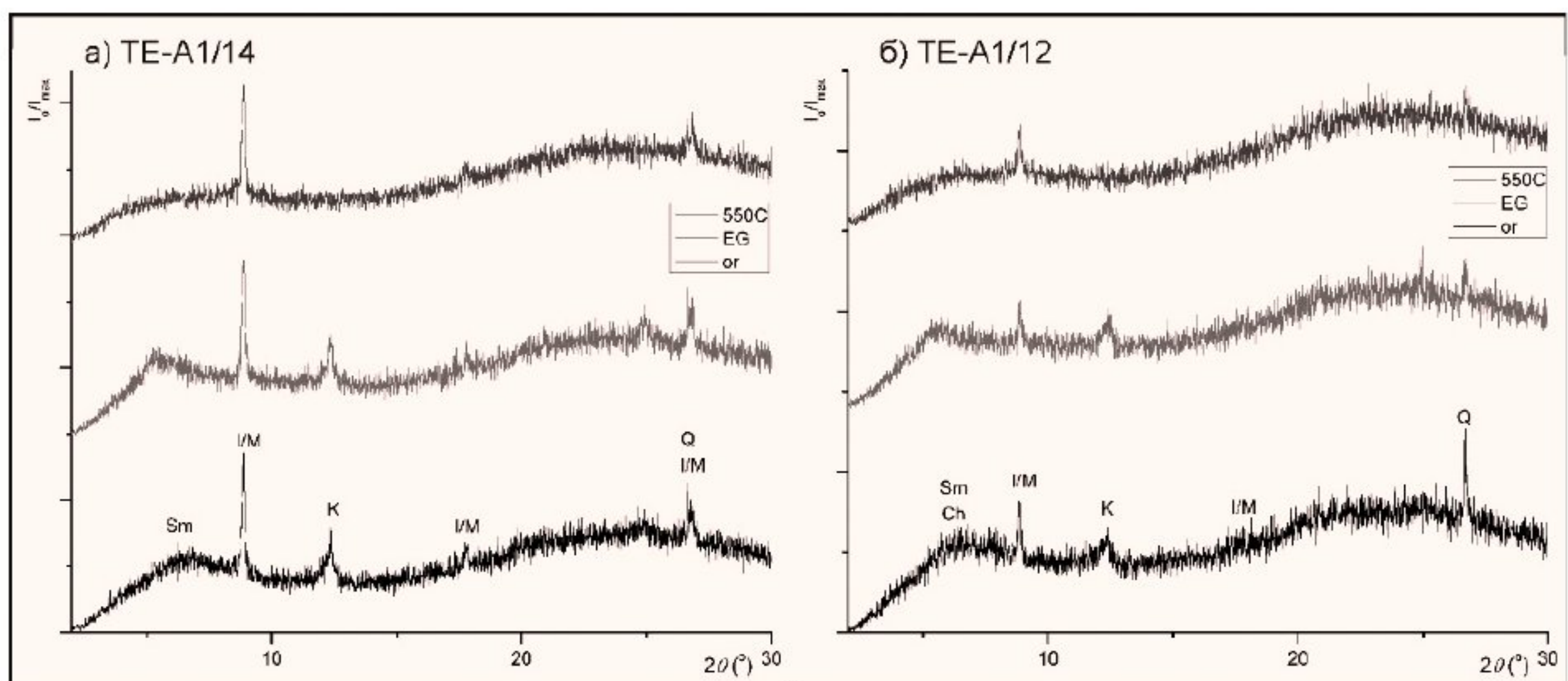
Табела 1. Минерални састав одређен методом рендгенске дифракције праха

Ознака узорка	Тип узорка	Минерални састав
ТЕ-А1/1	Пепео	кварц, калцит, лискун, кристобалит, магнетит
ТЕ-А1/3	Пепео	кварц, калцит, плагиоклас, магнетит, и могуће присуство лискуна
ТЕ-А1/7	Електрофилтерски пепео	кварц, плагиоклас, мулит, хематит, могуће присуство: К-фелдспата, кристобалита, пироксена (и лискуна)
ТЕ-А1/10	Електрофилтерски пепео	кварц, плагиоклас, К-фелдспат, браунмилерит, могуће присуство анкерита и магнетита - споран пик на $23,5^\circ 2\theta$ могуће да одговара дмистајнбергиту
ТЕ-А1/12	Угаљ	кварц, плагиоклас, илит/лискун, смектит, каолинит, као и мале количине хлорита (могуће присуство гипса и кристобалита)
ТЕ-А1/14	Угаљ	кварц и минерали из групе слојевитих силиката: илит/лискун, смектит, каолинит

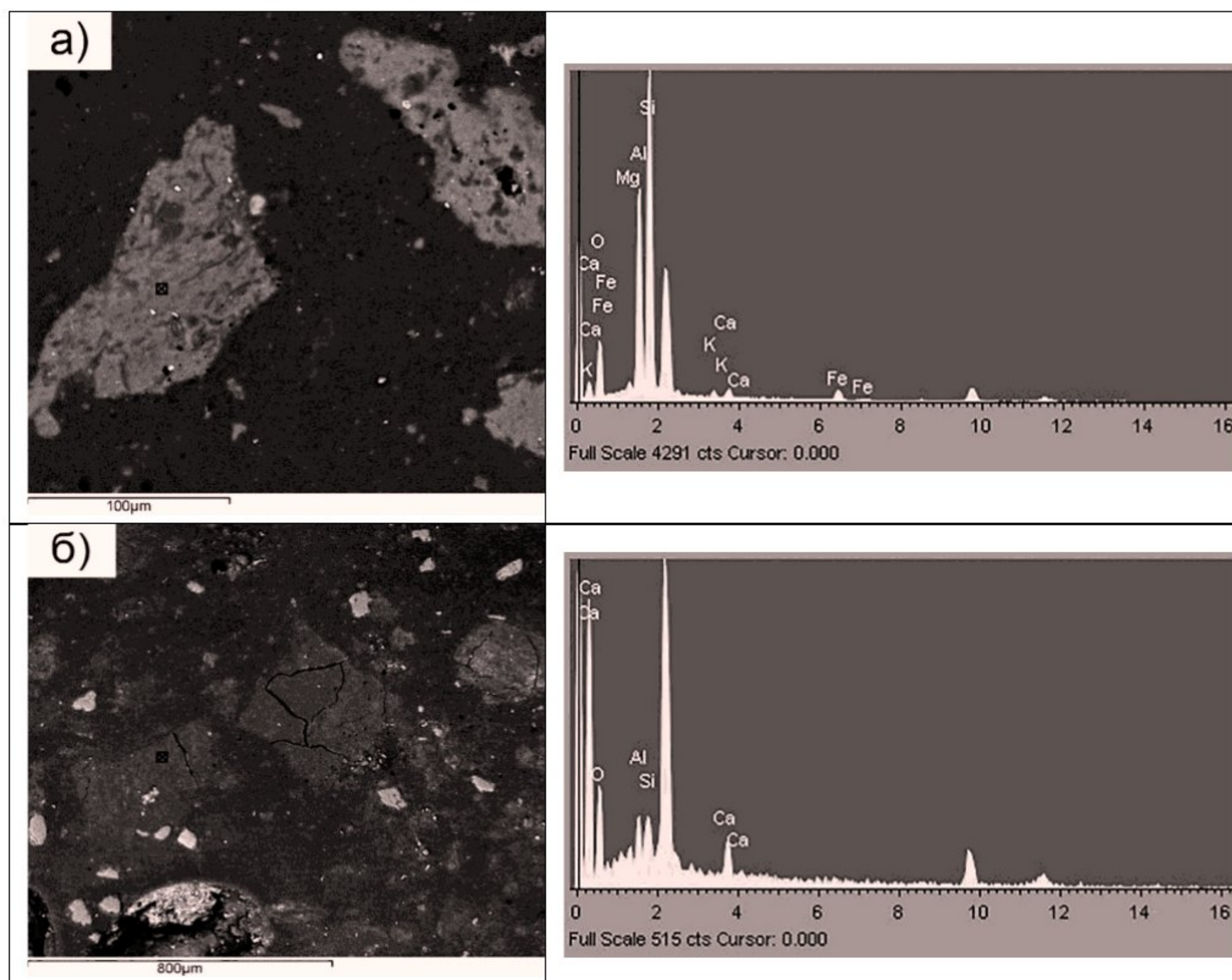
Најзаступљенији минерал одређен методом скенирајуће електронске микроскопије је кварц. Такође, јасно је уочено присуство минерала из групе фелдспата, при чему минерале из групе плагиокласа одликује знатан ниво трансформације услед сагоревања који се манифестује кроз повећан садржај гвожђа код узорака пепела (Слика 5). Битно је напоменути да су током анализе детектовани реликти очврсних гвожђевитих растопа у узорцима пепела.



Слика 3. Дифрактограми праха узорка пепела, електрофилтерског пепела и угља;  
 Легенда: Q - кварц, Pl - плагиоклас, I/M - илит/лискуни, Chl- хлорит, K-каолинит, Kf - К-  
 фелдспати, Bm - браунмилерит, Mu - мулит, H- хематит, C - калцит, Cr - кристобалит, M  
 – магнетит



Слика 4. Дифрактограми праха оријентисаних узорка угља (or – сушен на ваздуху, EG –  
 zasiћен етиленгликолом, 550°C - жарен на 550°C); Легенда: Q - кварц, I/M -  
 илит/лискуни, K-каолинит, Sm – смектит

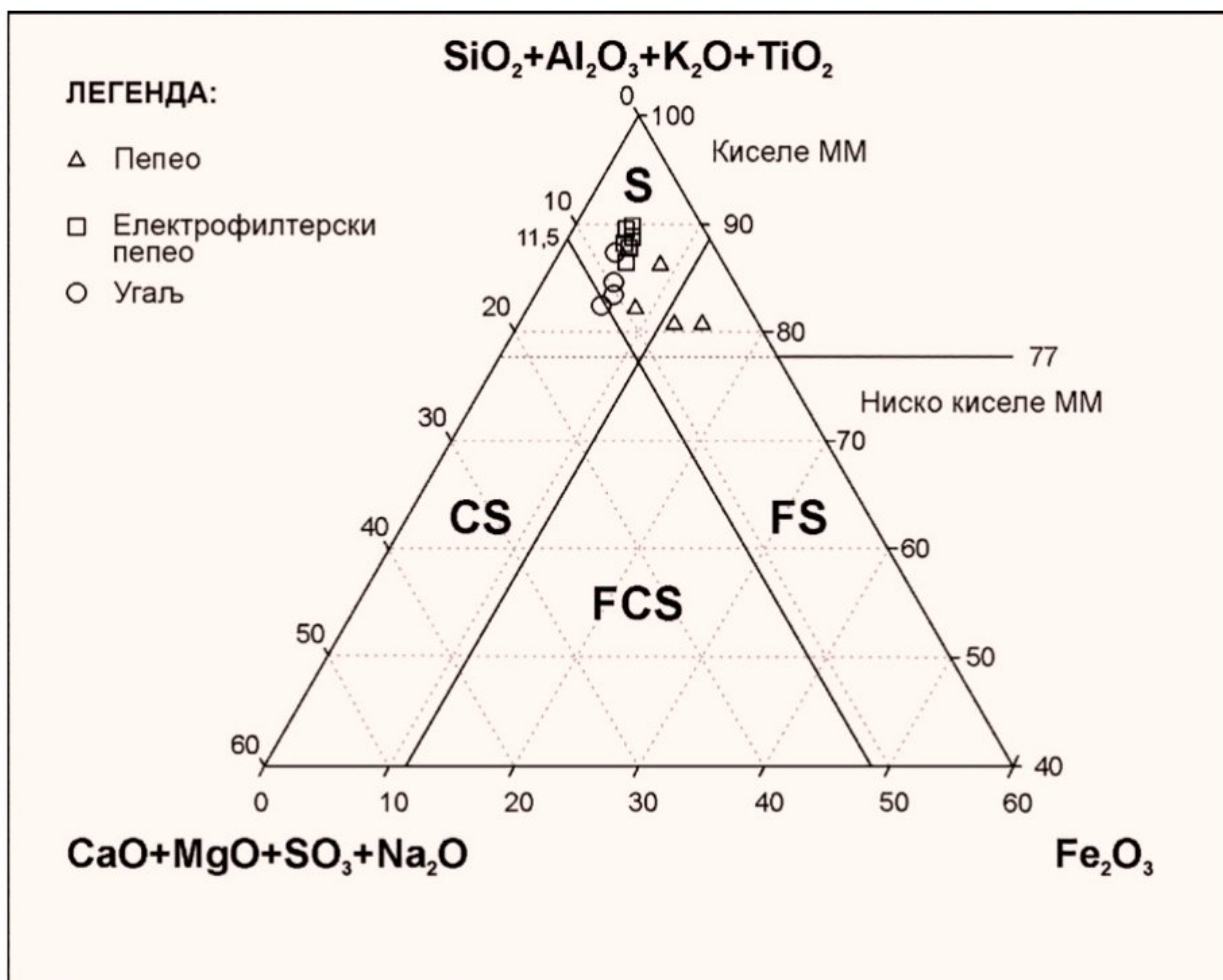


Слика 5. Фотографије узорака снимљене скенирајућим електронским микроскопом; а) електрофилтерског пепела (ТЕ-А1/7); б) угља (ТЕ-А1/12)

### 3.2. Хемијски састав

Сви узорци анализирани су рендгенском флуоресцентном анализом и индукованом куплованом плазмом са масеним спектрометром, при чему је извршена анализа макроелемената и елемената у траговима. Применом ICP-MS методе утврђено је присуство укупно 57 елемената, док је XRF анализом одређена концентрација 37 елемената (Табела 3).

У свим испитиваним узорцима, утврђене су највеће концентрације силицијума, алуминијума, баријума, мангана, и стронцијума са преко 130 mg/kg, док најмање концентрације у узорцима (испод 5 mg/kg) имају молибден, калај и антимон. Садржај макроелемената анализираних узорака показао је да припадју групи киселих силикатних пепела где главну компоненту чине Si и Al (Vassilev and Vassileva, 2009; Vasilev et al., 2009; Слика б), што је потврђено минералošким испитивањима са кварцом као главним минералом. Садржај осталих елемената је низак, а сумпора је изразито низак нарочито у електрофилтерском пепелу. Поједини микроелементи (As, Cr, Cs, Rb) имају виши садржај у односу на кларк за мрке угљеве (Ketris and Yudovich, 2009). Више концентрације у пепелу угља у односу на кларк за мрке угљеве уочене су код As, Cr, Cu, Cs, Ga, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Th, V.



Слика 6. Трокомпонентни дијаграм класификације хемијског састава продуката сагоревања (према Vassilev and Vassileva, 2009); Легенда: S-силицијска, CS-карбонатно силицијска, FS-гвожђевиито силицијска, FCS-гвожђевиито карбонатно силицијска MM

Највише концентрације Zr (246 mg/kg) уочавају се у узорку електрофилтерског пепела TE-A1/9 мерене применом XRF методе. Код истог узорка уочена је и највећа разлика у концентрацији (209,2 mg/kg; (Слика 7) између две методе, при чему је већа концентрација детектована применом XRF методе. У зависности од методолошког приступа и типа проучаваног материјала, концентрација Cr варира у опсегу од 42 mg/kg до 309 mg/kg. Најнижа детектована вредност 42 mg/kg уочава се код узорка угља TE-A/11, измерена применом ICP-MS методе, односно 46mg/kg код примене XRF-а. Највеће концентрације, као и разлика уочава се код електрофилтерског пепела где је највећа концентрација узорка TE-A1/7 чак 309 mg/kg, док је разлика у мереној концентрацији 135 mg/kg. У узорцима електрофилтерског пепела уочавају се разлике у концентрацији Rb које достижу вредности више од 100% у односу на ICP-MS методу. Занимљиве су разлике у концентрацији Zn у пепелу анализирание XRF методом, где је минимална измерена вредност 7 mg/kg, док је највиша измерена вредност 51 mg/kg. Саме вредности се разликују и од резултата који су добијени ICP-MS методом. Концентрације Zn се могу коментарисати и у узорцима угљева. Минимална концентрација има вредност 4 mg/kg, док максимална измерена вредност износи 54 mg/kg. Резултати се односе на вредности измерене ICP-MS методом, а разликују се од резултата добијених XRF методом и до 3 пута. Концентрације олова у пепелу и угљевима које су измерене XRF методом су ниже од граница детекције. Оне се разликују од концентрација измерених ICP-MS методом које износе преко једне десетине mg/kg.

Табела 3. Статистичке вредности садржаја макро- и микроелемената испитиваних узорака

Елемент	Пепео						Електрофилтерски пепео						Угљь										
	ICP-MS			XRF			Кларк <sup>1</sup>	ICP-MS			XRF			Кларк <sup>2</sup>	ICP-MS			XRF					
	Минимум	Максимум	Просек	Минимум	Максимум	Просек		Минимум	Максимум	Просек	Минимум	Максимум	Просек		Минимум	Максимум	Просек	Минимум	Максимум	Просек			
<b>Макроелементи, %</b>																							
Si	-	-	-	12,50	22,5	17,58	0,40	-	0,32	0,39	0,36	12,50	22,50	17,50	-	-	0,09	0,12	0,11	5,39	8,61	6,78	0,07
Ti	0,19	0,24	0,21	0,22	0,29	0,26	0,40	7,17	10,38	8,86	5,68	6,48	6,04	1,82	2,37	2,00	1,82	2,37	2,00	2,12	2,59	2,30	
Al	5,21	5,88	5,47	5,68	6,48	6,04		2,71	3,51	3,05	2,83	7,66	4,82	0,81	1,00	0,90	0,01	0,02	0,01	0,80	0,97	0,88	
Fe	2,48	7,00	4,31	2,83	7,66	4,82		0,05	0,07	0,05	0,06	0,22	0,13	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
Mn	0,06	0,21	0,12	0,06	0,22	0,13	0,5	0,61	0,75	0,68	0,53	0,56	0,55	0,21	0,27	0,24	0,21	0,27	0,24	0,24	0,28	0,26	
Mg	0,46	0,51	0,49	0,53	0,56	0,55		2,35	3,28	2,79	1,61	1,99	1,72	0,92	1,05	1,00	0,92	1,05	1,00	0,95	1,07	1,00	
Ca	1,47	1,86	1,61	1,61	1,99	1,72		0,20	0,41	0,30	0,08	0,09	0,08	0,06	0,14	0,09	0,06	0,14	0,09	0,05	0,12	0,08	
Na	0,07	0,10	0,08	0,08	0,09	0,08		0,92	1,18	1,05	0,51	0,69	0,61	0,25	0,30	0,27	0,25	0,30	0,27	0,23	0,27	0,24	
K	0,44	0,62	0,56	0,51	0,69	0,61		0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02
P	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,12	0,11	0,16	0,13	0,06	0,21	0,13	0,38	0,60	0,45	0,38	0,60	0,45	0,11	0,14	0,12	
S	0,21	0,25	0,24	0,06	0,21	0,13																	
<b>Микроелементи, mg/kg</b>																							
As	12,4	14,4	13,03	23	30	27,5	48	12,4	30,1	24,4	33	48	39,8	7,4	11,5	8,75	7,4	11,5	8,75	12	18	16,0	7,6
Ba	226	239	235,5	253	269	259,5	900	226	454	407	408	545	469,6	129	146	137	129	146	137	117	131	125	150
Co	7,1	9,5	8,00	5	7	6,5	26	7,1	13,6	13,2	9	15	11,67	4,1	6,1	4,88	4,1	6,1	4,88	4	6	4,67	4,2
Cr	87	106	95,75	98	129	109,2	82	87	174	166	231	309	270,3	42	50	46,2	42	50	46,2	46	74	59,0	15
Cs	8,3	9,7	8,98	8	12	10,00	5,2	8,3	14,9	12,0	11	23	17,5	2,8	3,8	3,18	2,8	3,8	3,18	0	0	0	0,98
Cu	26,89	34,44	31,12	30	71	42,25	74	26,89	57,9	52,9	46	60	53,17	16,0	23,5	19,6	16,0	23,5	19,6	16	31	22,0	15
Ga	19,59	15,89	14,88	15	19	16,50	29	13,59	27,9	23,4	19	32	25,83	5,69	7,41	6,31	5,69	7,41	6,31	6	7	6,50	5,5
Hf	0,6	0,66	0,64	8	8	8,00	7,5	0,6	1,23	1,05	6	7	6,75	0,43	0,5	0,48	0,43	0,5	0,48	0	0	0	1,2
Mo	2,26	2,3	2,27	3	4	3,50	14	2,26	4,77	3,99	3	7	5,00	1,24	2,17	1,64	1,24	2,17	1,64	0	0	0	2,2
Nb	8,15	9,7	9,04	8	11	9,50	18	8,15	16,1	14,5	14	18	15,67	3,69	4,81	4,13	3,69	4,81	4,13	3	6	4,25	3,3
Ni	55,4	86,1	71,85	66	87	77,25	52	55,4	106	96,2	95	109	101,5	26,9	33,2	30,3	26,9	33,2	30,3	22	28	24,7	9,0
Pb	12,43	16,13	14,30	0	0	0	38	12,43	34,5	28,0	22	36	29,50	9,71	13,0	11,0	9,71	13,0	11,0	13	13	13,0	6,6
Rb	42	55,9	50,80	47	61	55,00	48	39,5	58,3	49,8	73	119	95,83	18,5	24,8	20,7	18,5	24,8	20,7	19	24	20,2	10
Sb	1,39	1,97	1,66	6	6	6,00	5,0	2,04	2,95	2,37	7	8	7,50	0,87	1,37	1,11	0,87	1,37	1,11	0	0	0	0,84
Sc	7,7	9,2	8,45	8	10	9,25	23	10,7	15,4	12,9	13	19	16,00	3	3,9	3,43	3	3,9	3,43	4	5	4,5	4,1
Sn	2,6	3	2,80	0	0	0	4,7	3,1	5,4	4,42	2	6	4,17	1,3	1,6	1,38	1,3	1,6	1,38	0	0	0	0,79
Sr	120	150	130,7	122	151	132,5	740	202	272	235	205	288	245,5	73	89	78,0	73	89	78,0	68	86	74,2	120
Th	7,5	8,4	7,90	9	14	11,25	19	10,7	12,6	11,6	16	22	18,17	4,4	5,5	4,90	4,4	5,5	4,90	6	8	6,75	3,3
U	2,8	3,2	3,00	3	6	4,33	16	4,6	5,4	4,98	4	8	6,33	1,8	2,3	2,05	1,8	2,3	2,05	0	0	0	2,9
V	58	64	61,00	67	75	70,25	140	85	120	100	97	142	114,1	26	34	29,7	26	34	29,7	29	34	31,2	22



Елемент	Пепео						Електрофилтерски пепео						Угаљ							
	ICP-MS			XRF			Кларк <sup>1</sup>	ICP-MS			XRF			Кларк <sup>2</sup>	ICP-MS			XRF		
	Минимум	Максимум	Процент	Минимум	Максимум	Процент		Минимум	Максимум	Процент	Минимум	Максимум	Процент		Минимум	Максимум	Процент	Минимум	Максимум	Процент
W	2,10	2,3	2,18	/	/	/	6,0	2,40	3,9	3,17	/	/	/	1,00	1,2	1,08	/	/	/	1,2
Zn	23,8	44,8	30,33	7	51	21,00	110	43	49,5	46,5	46	76	56,67	14,9	19,7	16,5	4	56	15,5	18
Zr	22	25,9	23,93	64	100	78,75	190	36,7	44,1	39,9	145	246	196,3	14,5	18	16,6	33	64	45,5	35
Y	8,80	11,90	9,85	9	16	12,5	44	13,50	17,60	14,8	23	28	24,83	4,80	6,20	5,48	5	6	5,5	8,6
La	17,40	20,30	19,18	<20	32	27,67	61	21,70	27,70	23,4	21	47	35,5	8,80	10,8	8,65	<20	<20	<20	10
Ce	31,14	36,20	34,62	25	36	32,25	120	43,91	51,99	46,8	59	78	68,68	16,0	19,3	17,5	<20	28	28	22
Pr	4,00	4,50	4,35	/	/	/	13	5,70	6,90	6,18	/	/	/	2,00	2,40	2,18	/	/	/	3,5
Nd	14,40	16,80	15,58	/	/	/	58	22,30	25,70	23,5	/	/	/	7,50	8,80	8,20	/	/	/	11
Sm	2,30	2,90	2,58	/	/	/	11	3,80	4,40	4,02	/	/	/	1,20	1,70	1,45	/	/	/	1,9
Eu	0,60	0,70	0,63	/	/	/	2,3	0,80	1,20	0,98	/	/	/	0,30	0,30	0,30	/	/	/	0,50
Gd	2,00	2,60	2,30	/	/	/	16	3,30	3,80	3,55	/	/	/	1,10	1,50	1,33	/	/	/	2,6
Tb	0,30	0,40	0,35	/	/	/	2,0	0,50	0,60	0,57	/	/	/	0,20	0,20	0,20	/	/	/	0,32
Dy	1,70	2,30	1,95	/	/	/	12	2,70	3,10	2,97	/	/	/	1,00	1,30	1,15	/	/	/	2,0
Ho	0,30	0,50	0,35	/	/	/	3,1	0,50	0,60	0,57	/	/	/	0,20	0,20	0,20	/	/	/	0,50
Er	0,80	1,20	0,95	/	/	/	4,6	1,40	1,70	1,55	/	/	/	0,60	0,70	0,65	/	/	/	0,85
Tm	0,10	0,20	0,13	/	/	/	1,8	0,20	0,20	0,20	/	/	/	<0,1	<0,1	<0,1	/	/	/	0,31
Yb	0,80	1,10	0,85	/	/	/	5,5	1,20	1,50	1,32	/	/	/	0,50	0,70	0,58	/	/	/	1,0
Lu	0,10	0,10	0,10	/	/	/	1,1	0,20	0,20	0,20	/	/	/	<0,1	<0,1	<0,1	/	/	/	0,19

<sup>1</sup> Ketris and Yudovich, 2009; <sup>2</sup> Није верификован због великих варијација у угљевима и условима сагоревања.

## 4. Дискусија

У саставу пепела који је добијен сагоревањем лигнита доминирају макроелементи Si, Al, Fe, Ca, као и Mg, Na, K Ti, P, S , док се као микроелементи

појављује око 25-30 елемената од којих су поједини екотоксични. Хемијски састав, величина и облик честице пепела директно утичу на процес сагоревања и његово понашање. У хемијском саставу електрофилтерског пепела доминирају Si, Al, Fe и у нижим концентрацијама P, K, Ca, Mg, као и микроелементи Zn, Cu, Mn, B, Mo и др. (Ahmaruzzaman, 2010), а зависи од литотипног састава и ранга угља, минералног и хемијског састава угља и услова сагоревања.

Финкелман са сарадницима (Finkelman et al., 2019) указали су на значај минералошке детерминације продуката сагоревања угља и дистрибуције елемената у њима. Минерали са највећом заступљеношћу у свакој од фаза сагоревања су кварц, минерали глина и пирит. Јасна корелација између елемената у траговима и присуства минерала глина је доказана (Finkelman, 1981). Поред анатаса, рутила и илменита, у неким угљевима минерали глина (првенствено каолинит и илит) могу да садрже више концентрације Ti (Minkin et al., 1979; Ward et al., 1999; Dai et al., 2015). Осим титана, минерали глина посебно из групе илита могу да садрже повишене концентрације Cr, Rb, Ba. Поређењем резултата XRF и ICP-MS методе у испитиваним узорцима, највеће разлике у концентрацијама констатоване су код садржаја As, Cr, Mn, Ba, Rb и Zr. Највећа разлика у концентрацијама уочава се код електрофилтерског пепела, док су најмање разлике у концентрацијама измерене код угља. Највећа разлика у измереној концентрацији је код Zr и Cr (Слика 7).

**Арсен (As)** припада групи халкофилних елемената са вредностима кларка за мрке угљеве од  $7,6 \pm 1,3$  mg/kg и пепео мрких угљева од  $48 \pm 7$  mg/kg (Ketris and Yudovich, 2009). Истраживања арсена у угљу показала су да генерално постоји одређена зависност између садржаја As и његовог начина појављивања. Висок садржај As доминантно је неорганског порекла и везан за сулфидне минерале (пирит и др.; Yudovich and Ketris, 2005), док низак садржај As обично указује на органски афинитет. Садржај As који је везан са силикатима је низак, а садржај арсена који се налази у биљкама, од којих је настао угаљ, је слабо проучен. Зависност садржаја As, литотипног и мацералног састава, као и садржаја пепела је врло компликована и зависи од више фактора. Арсен се делом акумулира у инертинитима и витринитима. Обзиром да је арсен волатилан елемент, током сагоревања угља у термоелектранама, већи део органског и пиритног арсена у угљу испари у гасној фази. Само мањи део As, који је везан за минерале глина остаје у пепелу. Највеће концентрације As јављају се у електрофилтерском пепелу који се одлаже на депоније или се користи у другим гранама индустрије (цементној, путоградња...) Нека разматрања показују да дозвољена концентрација As у угљу за индустријску употребу варира од 100 до 300 mg/kg (Yudovich and Ketris, 2005). Разлике у садржајима узмеђу XRF и ICP-MS методе у испитиваним узорцима електрофилтерског пепела износиле су од 9,4 до 19,6 mg/kg (Слика 7а), док су код пепела износиле од 10,4 до 17,6 mg/kg у корист XRF методе. Разлике у концентрацијама највероватније су везане са процесом волатилизације код масене спектрометрије са индукованом куплованом плазмом у процесу жарења, у којој As као волатилан елемент испарава, због чега се јављају ниже концентрације у односу на садржаје измерене XRF методом.

**Хром (Cr)** припада групи сидерофилних елемената и има умерени афинитет према угљу (Юудович и Кетрис, 2006). Просечна вредност (кларк) Cr

за мрке угљеве износи  $15 \pm 1$  mg/kg, а за пепео мрких угљева  $82 \pm 5$  mg/kg (Yudovich and Ketris, 2005). Истраживања су показала да Cr може да има органски и неоргански афинитет у угљевима. У многим угљевима констатован је органски везан  $Cr^{3+}$ , док се неоргански најчешће акумулира у илиту, нешто ређе у хлориту, хромиту/спинелима, крокоиту (Huggins et al., 2000; Huggins et al., 2004; Finkelman et al., 2019) и јако ретко у сулфидима (Юудович и Кетрис, 2006). Изразито високе концентрације хрома везане су за угљеве настале на палеорељефу који је изграђен од ултрабазичних стена. Проучавање геохемије Cr, нарочито  $Cr^{6+}$  у угљу и продуктима сагоревања је од примарног значаја јер је овај његов валетни облик токсичан. Иако је атмосферска емисија хрома мала и не представља посебну опасност по животну средину, неопходно је проучавање могућности испирања хрома са депонија пепела и електрофилтерског пепела, зато што најопаснији облик хрома ( $Cr^{6+}$ ) веома растворљив у води. Током сагоревања Cr се концентрише у пепелу и електрофилтерском пепелу. Разлике у садржају Cr и Ni у електрофилтерском пепелу и пепелу, код сличних угљева, објашњене су процесом сагоревања у термоелектранама (Wu et al., 2019). Испитивања су вршена ICP-MS и ICP-AES методом током којих је уочено да се хром и никл претежно депонују у електрофилтерском пепелу. У зависности од методолошког приступа и типа проучаваног узорка, концентрација хрома варира у опсегу од 42 до 309 mg/kg. Највеће разлике од 61 до 135 mg/kg (Слика 76) уочавају се код електрофилтерског пепела, док су код пепела и угља ове разлике знатно мање. Хагинс са сарадницима (Huggins et al., 2000) констатовао је да XAFS (рендгенска дифракција финих структура) и SEM метода указују на два главна облика Cr код камених угљева: главна појава хрома везана је са мацералима као оксихидроксидом  $CrO(OH)$ , док је друга везана са илитом, који је накнадно потврђен анализом јонске микросонде. Обзиром на потврђено присуство илита у испитиваним узорцима угља из ТЕНТ А (Табела 2), постоји велика вероватноћа да су високе концентрације хрома у електрофилтерском пепелу везане са њиховим присуством у илитима. Не треба искључити ни присуство хрома у органским комплексима. Вероватно да примењени систем дигестије од 4 корака није био ефикасан у разлагању новостворених алумосиликата електрофилтерског пепела у којима је Cr остао заробљен. У прилог овој констатацији иду и истраживања спроведена на електрофилтерском пепелу и примени петостепене дигестије (Sočo and Kalembkiewicz, 2009) за ефикасно издвајање хрома.

**Манган (Mn)**, као и хром припадају групи сидерофилних елемената и нема афинитет према угљу (Юудович и Кетрис, 2006). Кларк за мрке угљеве износи  $100 \pm 6$  mg/kg, а за пепео мрких угљева  $550 \pm 30$  mg/kg (Ketris and Yudovich, 2009). Истраживањима су утврђене две врсте сингенетске акумулације Mn у угљу, и то органски и неоргански везани: а) са релативним обогаћењем само угља, б) са обогаћењем пепела за које је неопходно присуство Mn у водама тресетне мочваре током депоновања органске супстанце. Извор Mn у тресетним мочварама могу бити Fe-Mn латеритске коре распадања. У овом случају, акумулација Mn у угљу праћена је акумулацијом Fe, V, Cr и др. Генерално угљеви са високим садржајем силиката, тј. са киселим пепелом имају низак садржај Mn, док угљеви са високим садржајем карбоната имају висок садржај Mn. Испитивани узорци имају низак

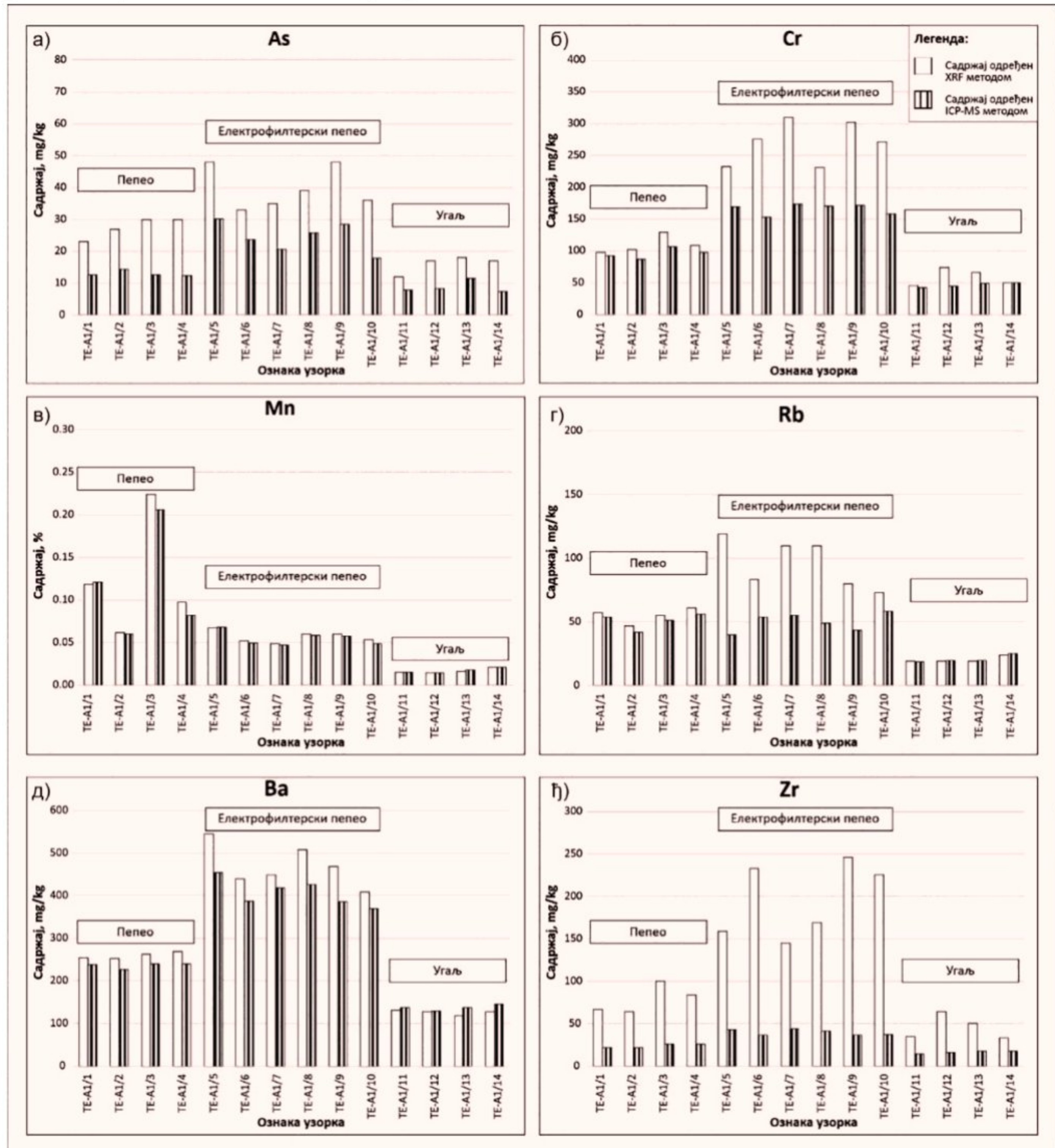
садржај мангана, а само мале разлике у садржајима применом две аналитичке методе констатоване су у угљу (Слика 7в).

Кларк **рубидијума** (Rb) у мрким угљевима износи  $10\pm 0,9$  mg/kg, а у пепелу мрких угљева  $48\pm 5$  mg/kg (Ketris and Yudovich, 2009). Овај литофилни елемент у угљевима је најчешће везан са минералима глина (Finkelman et al., 2019), али су познати и угљеви обогаћени овим елементом са органским афинитетом (Юудович и Кетрис, 2006). Подаци о понашању рубидијума при сагоревању угља су контрадикторни. Према неким извештајима, веће концентрације Rb су присутне у електрофилтерском пепелу у поређењу са пепелом (што указује на његову кондензацију из гасне фазе), а према другима, не долази до значајнијег фракционисања истог у пепелу угља (Юудович и Кетрис, 2006). Ова неслагања могу бити последица различитих система и услова сагоревања, као и начина појављивања Rb у угљу (органски/неогрански везани). Због своје токсичности и могућих атмосферских емисија током сагоревања угља, Rb у угљу може представљати одређену опасност по животну средину, нарочито код угљева са високим садржајем пепела који је обогаћен калијумом (Юудович и Кетрис, 2006). Испитивани узорци имају нешто више садржаје у односу на кларк за мрке угљеве, при чему су највише концентрације констатоване у електрофилтерском пепелу. Највеће разлике садржаја Rb крећу се од 14,7 до 79,5 mg/kg, у корист XRF методе (Слика 7г) и уочавају се код електрофилтерског пепела, док су код пепела и угља ове разлике јако мале. Разлике у концентрацијама највероватније су везане са неадекватним системом дигестије код масене спектрометрије са индукованом куплованом плазмом због чега се јављају ниже концентрације у односу на садржаје измерене XRF методом.

**Баријум** (Ba) у угљу може бити присутан у силикатима (минерали глина и/или фелдспати), карбонатима, сулфатима (барит и витерит), фосфатима, као и органски везан (Юудович и Кетрис, 2006; Finkelman et al., 2019). Просечан садржај у мрким угљевима износи  $150\pm 20$  mg/kg, док је у пепелу мрких угљева знатно виши и износи  $900\pm 70$  mg/kg (Ketris and Yudovich, 2009). Обогаћење угљева Ba може бити и син- и епигенетско. Сингенетско обогаћење настаје у присуству стена са повишеним садржајем Ba (гранитоиди, сијенити) и субсинхроним киселим (или андезитским) вулканизмом у тресетној мочвари. Теоретски је могућ и утицај рудних акумулација Ba ерозијом лежишта барита. Обогаћења баријумом из евапорита, који достижу величину рудних лежишта, су присутна у угљевима Енглеске и другим басенима (Юудович и Кетрис, 2006). Баријум у угљу не представља опасност током сагоревања угља. Испитивани узорци из ТЕНТ А имају низак садржај Ba у односу на Кларк за мрке угљеве. Највише концентрације Ba констатоване у електрофилтерском пепелу, као и разлике у измереним садржајима применом две аналитичке методе, које су се кретале од 31 до 91 mg/kg (Слика 7д). Констатоване разлике највероватније су везане процесом волатилизације на јако високим температурама код масене спектрометрије са индукованом куплованом плазмом, због чега се јављају нижи садржаји у односу на исте измерене XRF методом.

Кларк **цирконијума** (Zr) у мрким угљевима износи  $35\pm 2$  mg/kg, а у пепелу мрких угљева  $190\pm 10$  mg/kg (Ketris and Yudovich, 2009). Цирконијум има умерени афинитет према угљу, мада су откривени угљеви обогаћени Zr (Юудович и Кетрис,

2006) са органским афинитетом. Од минерала највише је заступљен силикат Zr - циркон, који може бити сингенетски и епигенетски. Осим Zr у цирконима појединих угљева констатовано је присуство Hf, REE, Nb, Ta, Th и U (Finkelman et al., 2019). На Слици 7ђ јасно се издваја разлика вредности садржаја Zr на узорку електрофилтерског пепела TE-A1/9 мереног применом XRF методе са 246 mg/kg. Највећа разлика у концентрацији запажа се на узорку TE-A1/9 код ког је разлика између концентрација чак 209,2 mg/kg, при чему је већа концентрација детектована применом XRF методе. Овако висока разлика у садржају Zr највероватније је последица примењеног система дигестије од 4 корака, који није био ефикасан у разлагању овог елемента из узорака летећег пепела.



Слика 7. Дијаграм садржаја арсена (а), хрома (б), мангана (в), рубидијума (г), баријума (д) и црционијума (ђ) у анализираним узорцима одређене применом XRF и ICP-MS методом

Веће разлике у концентрацијама хрома, цирконијума, рубидијума, баријума и других елемената може се образложити процесом припреме узорака односном дигестијом потребном за ICP-MS методу код које није дошло до потпуне разградње елемената из узорака. Хром као релативно инертан елемент, током дигестија, а касније и сагоревања угља бива „заробљен“ у кристалној решетки силиката, те би процес дигестије, нарочито електрофилтерског пепела било потребно знатно изменити како би се добила реална слика о концентрацији хрома. Насупрот хрому, количина арсена која је мерена такође показује знатна одступања. Велике разлике концентрација могу се објаснити процесом волатилизације код масене спектрометрије са индукованом куплованом плазмом у процесу жарења где арсен као волатилан елемент испарава, што као крајњи резултат даје смањену концентрацију у односу на реалну.

## 5. Закључак

Истраживање је изведено у циљу компарације резултата рендгенске флуоресцентне спектроскопије и масене спектрометрије индуковане спрегнуте плазме на узорцима угља и продуката сагоревања угља узоркованих у Термоелектрани „Никола Тесла А“ у Обреновцу. Након извршених лабораторијских испитивања, статистичке обраде резултата и анализе прикупљених података највеће разлике у концентрацијама уочене су код Rb, Zr, Cr, Ba и As, а када је реч о природи узорка највеће разлике у концентрацијама примећене су код електрофилтерског пепела, док је код узорака угља разлика у концентрацијама најнижа. Више концентрације код наведених елемената детектоване су применом XRF методе. Разлика у измереним концентрацијама код Zr варира од 3 до 6 пута у зависности од врсте узорка. Концентрације Cr измерене методом рендгенске флуоресцентне анализе и до 2 пута су веће у односу на вредности измерене ICP-MS методом.

Утврђене разлике у концентрацијама проузроковане су припремом узорака, при чему бисмо издвојили четворокомпонентну дигестију код методе индуковане спрегнуте плазме са масеном спектрометријом и термодинамичке услове припреме код рендгенске флуоресцентне анализе. Разлика у концентрацији Cr се може објаснити непотпуним разлагањем алумосиликата током процеса припреме узорака. Непотпуно четворокомпонентно разлагање последица је и разлике у концентрацији Rb и Zr, док се разлике у концентрацији Ba и As објашњавају волатилизацијом ових елемената.

Као допунске методе истраживања извршене су анализа скенирајућом електронском микроскопијом и рендгенска дифракција праха. Током анализе SEM методом утврђено је доминантно присуство кварца и гвожђевитих фелдспата трансформисаних услед сагоревања. Рендгенска дифракција праха потврдила је присуство главних минерала, али и указала на присуство минерала глина који су даље детерминисани прављењем оријентисаних препарата. Применом XRD методе утврђено је присуство кристобалита, браунмилерита, смектита, каолинита и других минерала. Уочен је споран пик на  $23,5^\circ 2\theta$  у узорку електрофилтерског пепела TE-A1/10 који одговара минералу дмистајнбергиту

који настаје током процеса сагоревања. Због недостатка карактеристичних пикова не може се недвосмислено тврдити његово присуство.

Будућа истраживања би требало усмерити на развој и проналажење ефикаснијег система дигестије посебно електрофилтерског пепела и пепела угља, како би се добили реалнији резултати. Такође се препоручује обавезна примена XRF методе при одређивању садржаја макро- и микроелемената, са могућностима померања детекционих лимита код појединих микроелемената.

## Литература

- Ahmaruzzaman M., 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science* 36, 327-363.
- Vassilev S., Vassileva C., 2009. A new approach for the combined chemical and mineral classification of the inorganic matter in coal. 1. Chemical and mineral classification systems. *Fuel* 88, 235-245.
- Vassilev S., Vassileva C., Baxter D., Andersen L.K., 2009. A new approach for the combined chemical and mineral classification of the inorganic matter in coal. 2. Potential applications of the classification. *Fuel* 88, 246-254.
- Ward C., Spears D., Booth C., Staton I., Gurba L., 1999. Mineral matter and trace elements in coals of the Gunnedah Basin, New South Wales, Australia. *International Journal of Coal Geology* 40, 281–308
- Wu P., Li J., Zhuang X., Querol X., Moreno N., Li B., Ge D., Zhao S., Ma X., Cordoba P., Shangguan Y., 2019. Mineralogical and Environmental Geochemistry of Coal Combustion Products from Shenhua and Yihua Power Plants in Xinjiang Autonomous Region, Northwest China. *Minerals* 9, 2-19.
- Dai S., Li T., Jiang Y., Ward C.R., Hower J.C., Sun J., Liu J., Song H., Wei J., Li Q., Xie P., Huang Q., 2015. Mineralogical and geochemical compositions of the Pennsylvanian coal in the Hailiushu Mine, Daqingshan Coalfield, Inner Mongolia, China: implications of sediment-source region and acid hydrothermal solutions. *International Journal of Coal Geology* 137, 92-110.
- Електропривреда Србије (ЕПС): <https://www.eps.rs/cir/Pages/proces-proizvodnje-uglja.aspx>
- Животић М., Стојиљковић Д., Јововић А., Чудић В., 2012. Могућност коришћења пепела и шљаке са депоније термоелектране „Никола Тесла“ као отпада са употребном вредношћу. *Хемијска индустрија* 66 (3), 403–412.
- Izquierdo M., Querol X., 2012. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology* 94, 54–66.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П., 2006. Ценные элементы-примеси в углях. Российская Академия Наук, Уральское Отделение, Екатеринбург, 538 ст. ISBN 5-7691-1698-6.
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P., 2005. Arsenic in coal: a review. *International Journal of Coal Geology* 61, 141–196.
- Ketris M.P., Yudovich Ya.E., 2009. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology* 78, 135–148.
- Minkin J.A., Chao T., Thompson L., 1979. Distribution of elements in coal macerals and minerals: Determination by Electron Microprobe. American Chemical Society, Fuel Division Preprints, pp. 242–249.
- Rigaku PDXL 2, 2007. Integrated powder X-ray diffraction software. Version 2.8.3.0, Rigaku Corporation, Tokyo. <https://www.rigaku.com/en/service/software/pdxl>

- Sočo E., Kalemkiewicz J., 2009. Investigations on Cr mobility from coal fly ash. *Fuel* 88, 1513-1519.
- СРПС ИСО 18283:2016, 2016. Камени угаљ и кокс- Ручно узимање узорака. Институт за стандардизацију Србије, Београд, Србија, 75 стр.
- Finkelman, R.B., 1981. Modes of Occurrence of Trace Elements in Coal: USGS Open-File Report 81-99. 322 p.
- Finkelman R.B., Daia S., French D., 2019. The importance of minerals in coal as the hosts of chemical elements: A review. *International Journal of Coal Geology* 212, 2-18.
- Hower J.C., 2012. Petrographic examination of coal-combustion fly ash, *International Journal of Coal Geology* 92, 90-97
- Huggins F.E., Shah N., Huffman G.P., Kolker A., Crowley S.S., Palmer C.A., Finkelman R.B., 2000. Mode of occurrence of chromium in four U.S. coals: in review "toxic Substances from Coal Combustion. *Fuel Processing Technology* 63, 79-92.
- Huggins F.E., Shah N., Huffman G.P., 2004. How do lithophile elements occur in organic association in bituminous coals? *International Journal of Coal Geology* 58, 193-204.
- Cvetković Ž., Logar M., Rosić A., 2013. Mineralogy and characterization of deposited particles of the aero sediments collected in the vicinity of power plants and the open pit coal mine: Kolubara (Serbia). *Environ Science and Pollution Research* 20, 3034-3049.
- Цветковић Ж., 2013. Минерални и хемијски састав честица у атмосфери зоне Колубарског басена и утицај на животину средину. Докторска дисертација. Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет, 326 стр.



# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les année 2022*

*REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022*

Beograd, 2023

Емилија Ницовић<sup>1</sup>, Владица Цветковић<sup>1</sup>, Кристина Шарић<sup>1</sup>  
Emilija Nidžović<sup>1</sup>, Vladica Cvetković<sup>1</sup>, Kristina Šarić<sup>1</sup>

## ДА ЛИ ИМА ТРАГОВА ЕКСПЛОЗИВНИХ ЕРУПЦИЈА У ИСТОЧНОМ ДЕЛУ ЛЕЦКОГ ВУЛКАНСКОГ КОМПЛЕКСА?

## ARE THERE TRACES OF EXPLOSIVE ERUPTIONS IN THE EASTERN PART OF THE LECE VOLCANIC COMPLEX?

ПРЕТХОДНА САОПШТЕЊА, СТРУЧНИ РАДОВИ, ЕСЕЈИ – REPORTS

**Апстракт.** Лецки вулкански комплекс (ЛВК) представља једну од највећих области кенозојског вулканизма у Србији. У овом раду, испитивано је да ли на простору источног дела ЛВК постоје трагови експлозивне вулканске активности. Теренским и микроскопским испитивањима утврђено је да у источном делу ЛВК постоје три вулканолошке фације: 1) кохерентни хорнбленда-пироксен-биотитски андезити, 2) вулканокластичне стене, и 3) пирокластичне стене. Кохерентни андезити су изграђени од еухедралних фенокристала плагиокласа, хорнбленде и биотита, који су каткада флуидално распоређени и који су окружени холо- до хипокристаластом основном масом трахитског карактера. Наведене карактеристике указују на то да су ове стене настале течењем лаве, а не експлозивним дејством. Запажен је и низ показатеља неравнотежне кристализације, односно индикатора процеса мешања магми различитог састава. Вулканокластичне стене представљене су вулканокластичним бречама и вулканокластичним пешчарима (вулканским псамитолитима) и садрже одломке кохерентних вулканита који се налазе изнад. Пирокластичне стене представљене су наслагама падавинских лапилита који су доминантно изграђени од добро сортираних фрагмената високовезикуларног пловућца. Њихово присуство карактеристично је за снажне експлозивне ерупције киселе до интермедијарне магме, које стварају високе еруптивне стубове и велике количине везикуларног вулканског стакла. На основу постојања ових пирокластита, закључено је да је у некој од вулканских епизода на испитиваном подручју нужно било и експлозивне вулканске активности, што представља главни налаз овог рада. Може се претпоставити да је експлозивна активност била плиниског типа, као и да је иницирана мешањем магми различитог карактера. Ови налази су у складу са доступним подацима истраживања аналогних подручја кенозојског вулканизма у Србији.

<sup>1</sup> Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, Београд, Србија; e-mail: emilija.nidzovic@rgf.bg.ac.rs

University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Đušina 7, Belgrade, Serbia

**Кључне речи:** експлозивна вулканска активност, Лецки вулкански комплекс, падавински лапилити, пирокластити

**Abstract.** The Lece Volcanic Complex (LVC) represents one of the largest areas of Cenozoic volcanism in Serbia. This study investigated whether there are traces of explosive volcanic activity in the eastern part of the LVC. The results of field and microscopic investigations indicate that there are three volcanological facies in the eastern part of the LVC: 1) coherent hornblende-pyroxene-biotite andesites, 2) volcanoclastic rocks, and 3) pyroclastic rocks. The coherent andesites are characterized by phenocrysts of plagioclase, hornblende and biotite, all set in a holo- to hypocrySTALLINE groundmass; the rocks commonly show fluidal fabric. The aforementioned characteristics indicate that these rocks originated from effusive, and not from explosive volcanic activity. The samples also exhibit a number of indicators of non-equilibrium crystallization, most likely due to magma-mixing. The volcanoclastic rocks are represented by volcanoclastic breccias and volcanoclastic sandstones (volcanic psammitolites) and contain fragments of coherent volcanic rocks located in the area above. The pyroclastic rocks are represented by lapilli fall deposits mainly composed of highly vesicular pumice lapilli. Their presence is characteristic of strong explosive eruptions of acidic-to-intermediate magma, which create high eruptive columns and produce large amounts of vesicular and glass material. Based on the existence of these pyroclastic rocks, it has been concluded that one of the volcanic episodes which occurred within the studied area necessarily included explosive volcanic activity, which represents the main finding of this paper. It can be assumed that the explosive activity was Plinian in character, as well as that it was probably triggered by a magma mixing event. These results are in line with the existing data on analogous areas of Cenozoic volcanism in Serbia.

**Key words:** explosive volcanic activity, Lece Volcanic Complex, fall deposits, pyroclastic rocks

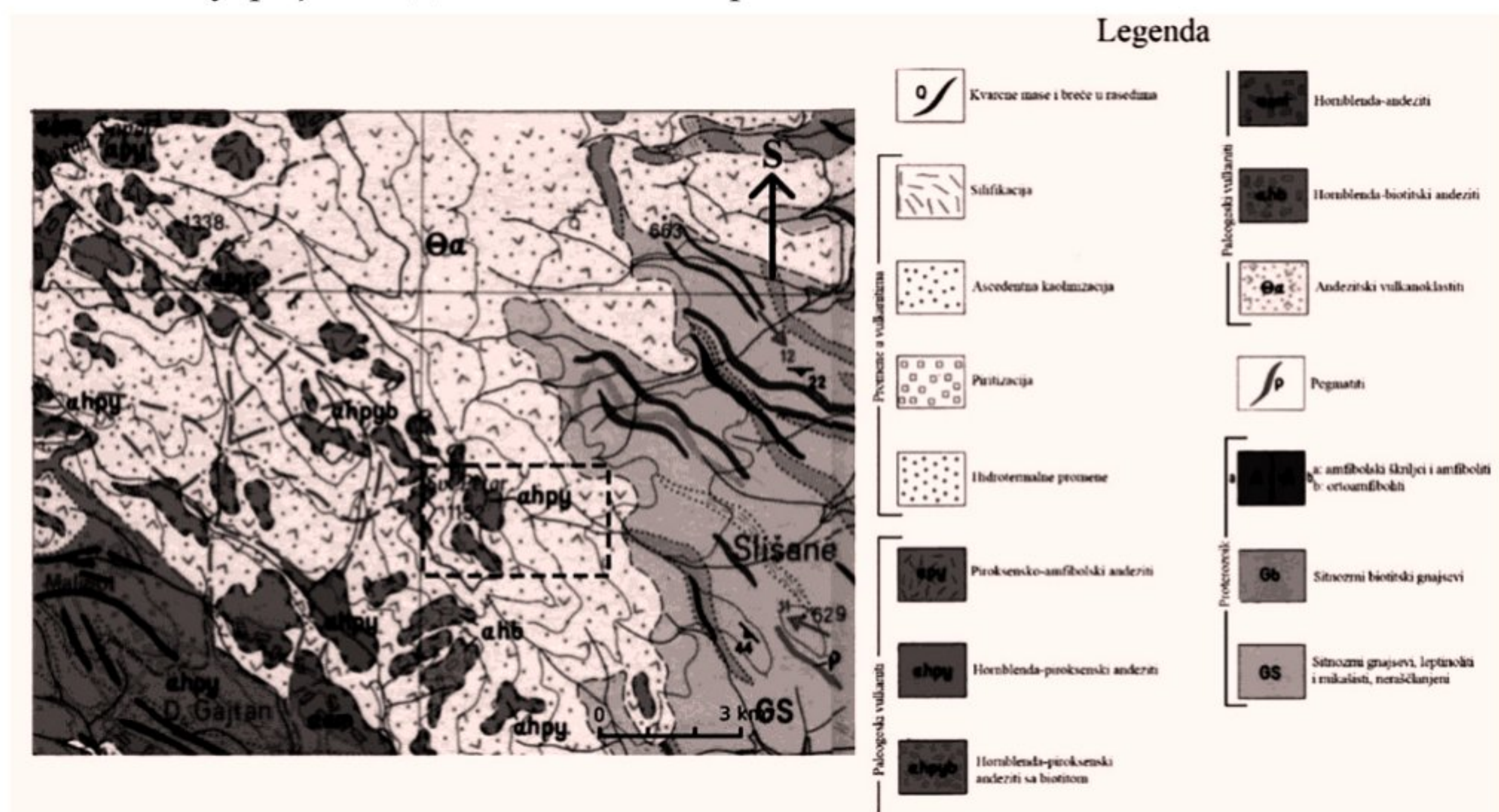
## УВОД

Лецки вулкански комплекс (ЛВК) једна је од области која сведочи о кенозојском вулканизму у Србији. Заузима површину од преко 700 km<sup>2</sup>, што га чини другим највећим вулканским комплексом у нашој земљи (након Тимочког магматског комплекса). Налази се на контакту Српско-македонске масе на истоку и Вардарске зоне на западу. Комплекс је настао пост-колизионом магматском активношћу која је трајала од олигоцена до миоцена (Cvetković et al. 2016a). Значајан напредак у разумевању порекла и развоја ЛВК остварен је приликом израде Основне геолошке карте (Димитријевић и др. 1965; Ракић и др. 1965; Малешевић и др. 1974; Вукановић и др. 1975). Временом су, међутим, учени и пропусти у тумачењима до којих је током овог картирања дошло, углавном услед нераздевања генезе вулканокластичних, односно пирокластичних стена. Недавно, Костић (2016) је обавио петрографско-вулканолошка испитивања западног дела ЛВК и указао на значај вулканолошког приступа у геолошким истраживањима ове области. Резултати његовог истраживања нису указали на постојање трагова експлозивних ерупција у западном делу ЛВК. Источни део комплекса такође је у скорије време био предмет истраживања (Цветковић и др. 2020). Приликом ове студије, фокус је био на утврђивању порекла стена од којих је изграђен рановизантијски археолошки локалитет Царичин Град (*Justiniana Prima*), при чему су стене са овог локалитета упоређиване са стенама источног дела ЛВК. Иако су стене источног дела ЛВК истраживане и у овом и у раду Цветковић и др. (2020), важно је нагласити да су циљеви ових истраживања били различити.

Премда је у оба рада вршена петрографска анализа, њени резултати су у раду Цветковић и др. (2020) интерпретирани у контексту геoarхеологије, док су у овом раду интерпретирани како би се одговорило на вулканолошко питање постављено у наслову рада, а то је утврђивање постојања трагова некадашње експлозивне вулканске активности у источном делу Лецког вулканског комплекса.

## МЕТОДЕ

У циљу испитивања петрографских и вулканолошких карактеристика стена источног дела ЛВК примењене су теренске и лабораторијске методе. Теренски рад укључивао је опсервирање на терену и прикупљање узорака. Испитивани терен обухватао је источне падине планине Радан, од Петровог врха до обода Лецког вулканског комплекса (Слика 1). Прикупљено је шест узорака стена од којих су касније израђени петрографски препарати. Фотомикрографије су израђене на поларизационом микроскопу за пропуштenu светлост типа *Leica DMLSP* са уграђеном дигиталном камером *Leica DC 300*.



Сл. 1 – Геолошка грађа испитиваног терена (означеног испрекиданим линијама) и ширег подручја источног дела Лецког вулканског комплекса. Прилагођено према ОГК 1:100 000, лист Лесковац К34-44 (Димитријевић и др. 1965).

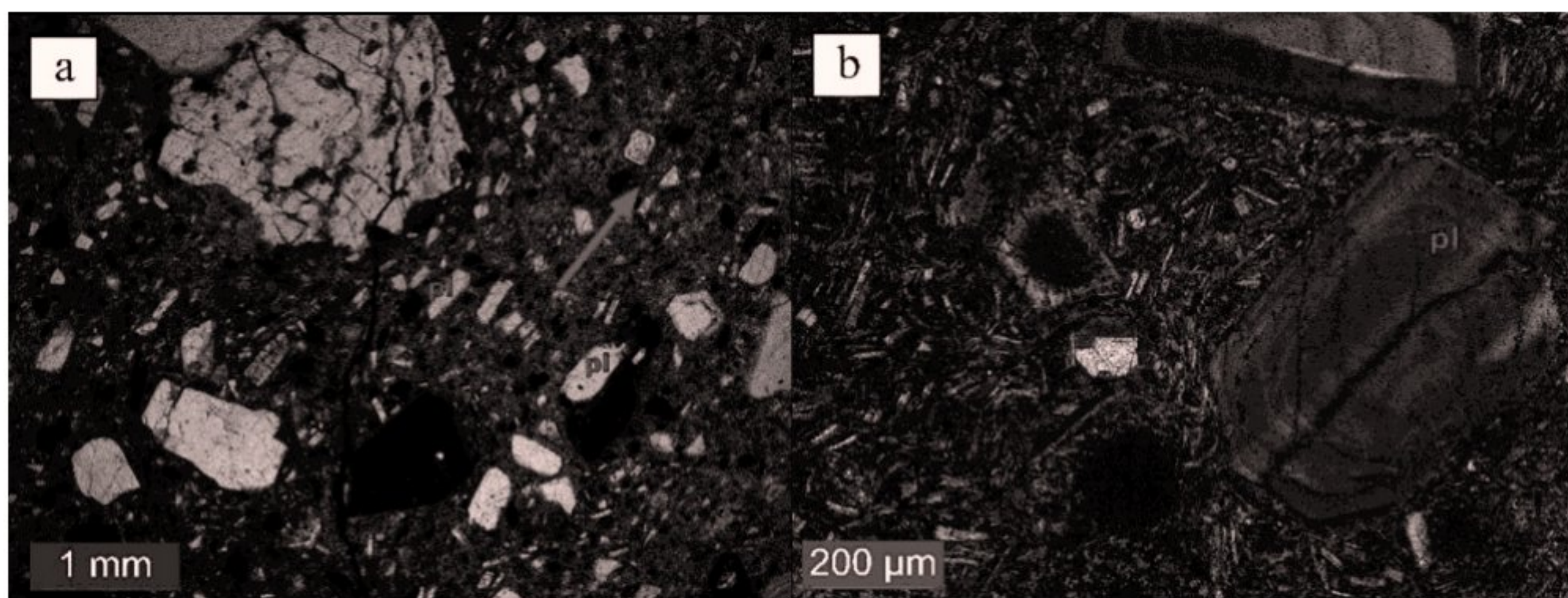
Fig. 1 – Geological map of the investigated area (marked by dashed lines) and the surrounding area of the eastern part of the Lece Volcanic Complex. Adapted from the Basic Geological Map of Yugoslavia 1:100 000, sheet Leskovac K34-55 (Dimitrijević et al. 1965).

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Теренским и лабораторијским испитивањима стена источног дела Лецког вулканског комплекса утврђено је да се у грађи овог подручја могу издвојити три вулканолошки различите фазије: 1) кохерентни хорнбленда-пироксен-биотитски андезити, 2) вулканокластичне стене и 3) пирокластичне стене.

## Кохерентни хорнбленда-пироксен-биотитски андезити

На простору Петрове горе налази се неколико изданака изграђених од кохерентних андезита. На самом врху запажа се плочасто до стубасто лучење. Структура ових стена је порфирска, а текстура масивна. Основна маса је тамносиве до црне боје, због чега је тешко уочити бојене састојке стене. Могу се уочити једино млечнобели фенокристали плагиокласа, који су понегде флуидално распоређени. Даље низ главни пут, након изласка из шуме, налазе се издаци порозног варијетета исте стене. Њихова структура је порфирска, а текстура флуидална и шупљикава. Основна маса је беле боје. Уочљиви су фенокристали хорнбленде чија дужина понегде прелази 1 cm. Кохерентни хорнбленда-пироксен-биотитски андезити изграђени су од плагиокласа, хорнбленде, пироксена, биотита (флогопита?), кварца, оливина, санидина и металних минерала. Према степену кристалинитета основне масе, ове стене су хипокристаласто-порфирске до хијалопилитске структуре, док су према количини фенокристала олигофирске структуре (релативна заступљеност фенокристала ~ 40%). Текстура је масивна до флуидална. Међу фенокристалима су најзаступљенији еухедрални плагиокласи код којих се уочавају ламеларно ближњење и зонарност. Они су често флуидално распоређени (Слика 2а). Запажа се и трахитска структура у виду микролита плагиокласа који местимично оптачу крупније фенокристале у основној маси (Слика 2б). Ове карактеристике (флуидална текстура, трахитска структура, еухедралност фенокристала плагиокласа, одсуство поломљених зрна) јесу доказ да су ове стене настале течењем лаве, а не експлозивним дејством (Bard 1986; Vernon 2018).



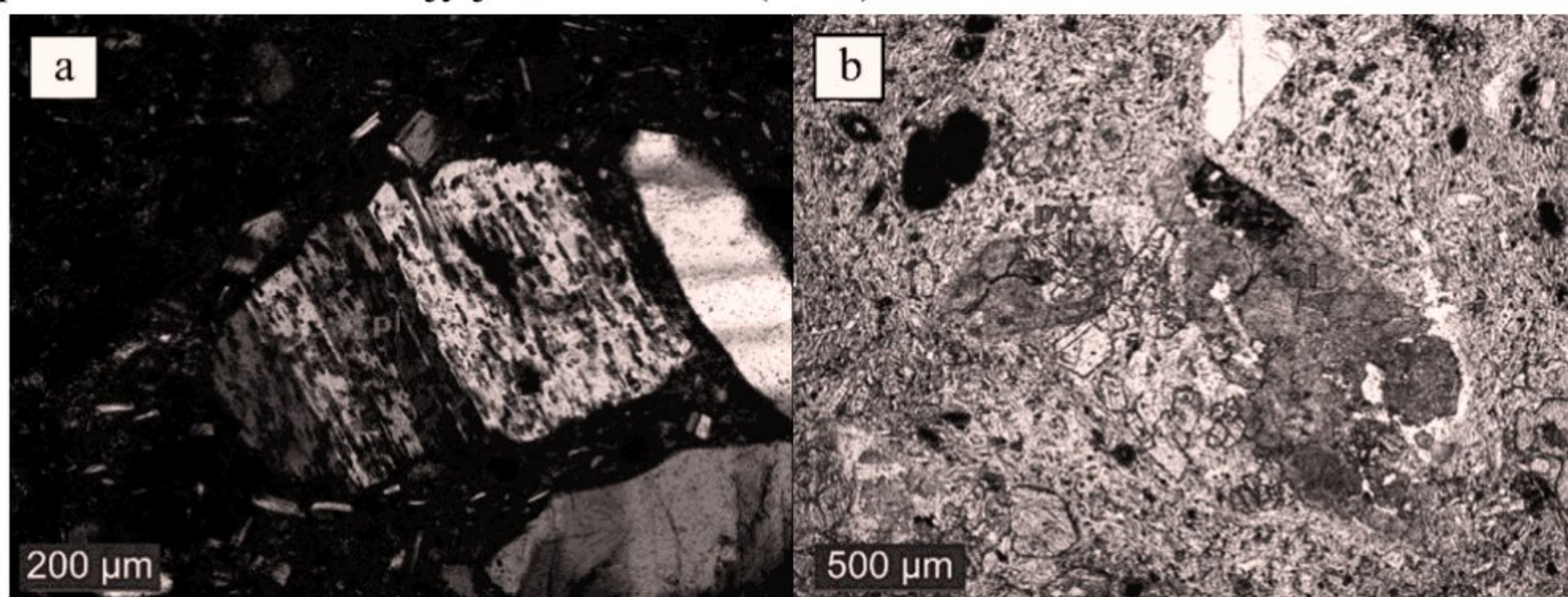
Сл. 2 – Микроскопски изглед кохерентних хорнбленда-пироксен-биотитских андезита.

(а) Флуидални распоред микрофенокристала плагиокласа у основној маси стене (стрелица указује на правац преовлађујуће оријентације), (б) микролити плагиокласа који у 'млазевима' оптачу фенокристале, градећи трахитску структуру; а – паралелни николи (*ppl*), б – укрштени николи (*xpl*)

Fig. 2 – Microscopic images of coherent hornblende-pyroxene-biotite andesites. (a) Fluidal arrangement of plagioclase microphenocrysts in the rock groundmass (the arrow points in the dominant orientation), (b) plagioclase microlites which encircle phenocrysts, thus forming the trachytic texture; a – plane polarized light (*ppl*), b - crossed polarized light (*xpl*)

У испитиваним узорцима кохерентних андезита запажен је и низ показатеља неравнотежне кристализације. Могу се приметити инклузије основне

маса у фенокристалима плагиокласа, које представљају трагове ресорпције, односно тзв. ситасту структуру (Слика 3а). Код порозног варијетета андезита, на неким фенокристалима плагиокласа, запажа се да је ситаста структура развијена претежно у виду тамних рубова. Уочавају се и полиминерални агрегати (анклаве) изграђени од пироксена и алтерисаног оливина (Слика 3б). Код порозног варијетета андезита, оливин се среће и у виду самосталних агрегата и лако се препознаје по форми, упркос значајном степену секундарних промена које је претрпео. Чињеница да ове стене садрже и кварц и оливин представља својеврстан термодинамички парадокс који се објашњава мешањем магми (Sakuуама 1979). Фенокристали хорнбленде су флуидално распоређени и изразито полихроични (од светлосмеђе до тамносмеђе боје). Лиске биотита (флогопита?) су изразито полихроичне и по њиховим ободима су развијени опацитски рубови. Осим плагиокласа, ситасту структуру или трагове неког другог типа неравнотежних реакција показују и неки фенокристали пироксена и хорнбленде, лиске биотита (флогопита?), као и зрна металичних минерала. Ове карактеристике такође сведоче о процесима мешања магми (Varol et al. 2008). Наведени налази у складу су са претпоставком о мешању магми изразито различитог састава коју је дао Костић (2019).



Сл. 3 – Микроскопски изглед кохерентних хорнбленда-пироксен-биотитских андезита.

(а) Инклузије основне масе у фенокристалу плагиокласа, које представљају ситасту структуру, (б) полиминерални агрегати изграђени од пироксена и алтерисаног оливина у кохерентним хорнбленда-пироксен-биотитским андезитима; а - *xpl*, б - *ppl*

Fig. 3 - Microscopic images of coherent hornblende-pyroxene-biotite andesites. (a) Groundmass inclusions in the plagioclase phenocrysts that form sieve texture, (b) polymineral aggregates of pyroxene and altered olivine in coherent hornblende-pyroxene-biotite andesites; а - *xpl*, b - *ppl*

## Вулканокластичне стене

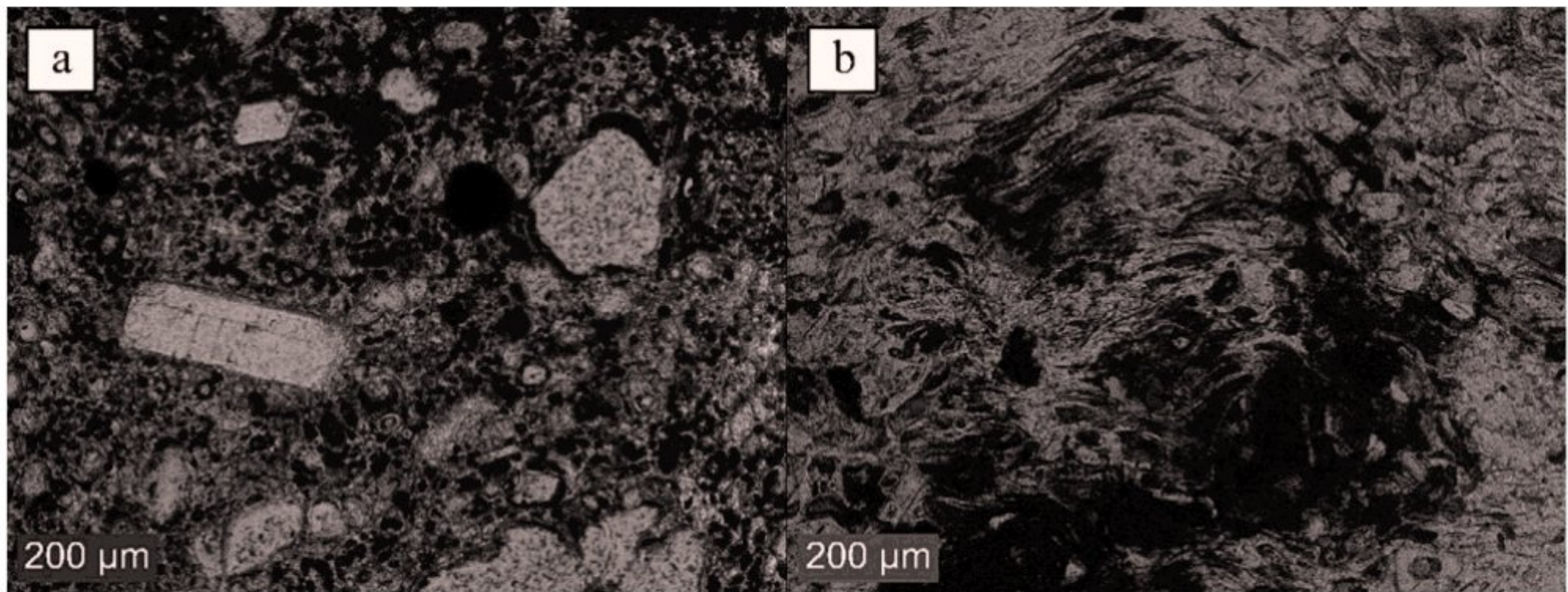
Вулканокластичне стене овог подручја представљене су вулканокластичним бречама и вулканокластичним пешчарима. Вулканокластичне брече су изграђене од угластих фрагмената порозног андезита (величине преко 2 mm) који су везани ситнозрнијим матриksom од истих стена. Вулканокластични пешчари (>50% фракције у опсегу 0.05-2 mm), који се према негенетској, дескриптивној класификацији могу одредити и као вулкански псамитолити

(Цветковић 1998), изграђени су од фрагмената кохерентних андезита везаних ситнозрним матриком. Матрикс је подређен и истоветног састава као фрагменти. Сортираност вулканокластичних пешчара је добра, а уочава се и ламинација, што указује на то да је редепоноване највероватније извршено бујичним токовима. Примећују се и елементи ритмичне слојевитости, који указују да су наслаге настале вишекратним спирањем. Вулканокластични детритус је представљен одломцима вулканита и индивидуалним зрнима минерала. Одломци вулканита су величине 1-3 mm. Одликују се хијалопилитском и порфирском структуром, што указује на то да су у питању фрагменти већ описаних кохерентних андезита. Уочавају се угласта, субугласта и субзаобљена зрна плагиокласа, кварца, санидина, моноклиничног пироксена, биотита, металних минерала и хидроксида гвожђа.

### **Пирокластичне стене**

Пирокластичне стене су представљене ретким наслагама падавинских лапилита, које су сачуване само у виду реликата сочивастих форми, чија максимална дебљина не прелази један метар. Најважнија карактеристика ових наслага јесте добра сортираност, односно изостанак ситнозрног матрикса, тако да је стена готово потпуно састављена од фрагмената пловућаца димензија лапила. Осим пловућаца, садрже и веома ретке фрагменте кохерентног андезита тамносиве до црне основне масе. Због доминације белих пловућаца, ове стене су упадљиво беле боје. Падавинске лапилите, дакле, сачињавају преко 95 запр.% одломци пловућаца, док изузетно подређени ситнозрни матрикс изграђују крхотине самих пловућаца, као и одломци фенокристала и стена. Сами пловућци се одликују веома израженом везикулацијом. Фрагменти пловућаца су присутни у две форме. Прва форма се одликује претежно сферичним везикулама различитих величина (Слика 4а). Полуслепљене шупљине и вулканско стакло сачињавају саћасту текстуру (енг. *honeycomb texture*). Друга форма фрагмената пловућаца одликује се издуженим, сочивастих формама, са еутакситном текстуром и елипсоидалним везикулама (Слика 4б).

Међу фенокристалима унутар пловућаца најзаступљенији су плагиокласи, а присутне су још и лиске биотита, хлорита, зрна амфибола, пироксена, кварца, оксиди и хидроксида гвожђа и метални минерали. Фенокристали плагиокласа су варијабилних димензија (од испод 1 mm до преко 10 mm) и угластих до субугластих форми. Уочавају се зонарност и ламеларно ближњење. Многе одликује ситаста структура, односно, „нагриженост“ од стране основне масе. Лиске биотита су полихроичне и делимично прелазе у хлорит. Зрна амфибола су еухедрална и изразито полихроична. Многа од њих имају ситасту структуру, односно садрже бројне капљичасте инклузије које одговарају матриксу. Зрна кварца су мање заступљена и зонарно помрачују. Одломци стена имају порфирску и хијалопилитску основу, што указује на то да су у питању фрагменти кохерентних андезита.



Сл. 4 – Микроскопски изглед одломака пловућаца у падавинским лапилитима. (а) Одломак пловућаца који се одликује сферичним везикулама различитих величина, (б) одломак пловућаца који карактеришу издужене форме вулканског стакла и елипсоидне везикуле; а, б – ppl.

Fig. 4 – Microscopic images of fragments of pumice in lapilli fall deposits. (a) A pumice fragment characterized by spherical vesicles of different sizes, (b) a pumice fragment characterized by elongated forms of volcanic glass and ellipsoidal vesicles; a, b – ppl.

Присуство високовезикуларних пловућаца у виду фрагмената лапила који изграђују падавинске наслаге може бити карактеристично за снажне експлозивне ерупције киселе до интермедијарне магме које стварају високе еруптивне стубове и велике количине везикуларног и стакластог материјала у виду падавинских творевина (Cas & Wright 1987; Fisher & Schmincke 1984). Поред вулканолошких и петрографских доказа о експлозивној вулканској активности, као и оних о мешању магми, који су приказани до сада, о еволуцији Лецког вулканског комплекса може се закључивати и посредно, на основу узимања у обзир резултата истраживања која су рађена у другим областима кенозојског вулканизма у Србији (Рудник, Копаоник, Голија, Авала, Велики Мајдан). Истраживања вршена на Рогозни (Šoštarić et al. 2012) и Руднику (Cvetković et al. 2016b) указују на то да је на овим подручјима до иницирања експлозивних вулканских ерупција дошло услед мешања магми лампроитског и киселог калко-алкалног (дацитског) карактера. Према треба нагласити да током овог истраживања ЛВК нису пронађене стене лампроитског карактера, с обзиром на аналогност наведених подручја и Лецког вулканског комплекса, може се претпоставити да су се слични процеси одвијали и на овом простору. У прилог овом тумачењу сведоче и петрографски докази о мешању магми (присуство анклава оливина у стенама које садрже и кварц, ситаста структура која се запажа код различитих минерала), као и постојање одломака кохерентних андезита у пирокластичним стенама, које указује на то да је изливна активност претходила експлозивној. Међутим, како би се ово са сигурношћу могло тврдити, неопходно је извршити додатна истраживања која би у свом фокусу имала геохемијске карактеристике ових стена.

## ЗАКЉУЧАК

У овом раду, приказани су резултати петрографско-вулканолошке анализе стена источног дела Лецког вулканског комплекса. Главни циљ истраживања

било је испитивање постојања трагова експлозивне вулканске активности на овом подручју. На основу опсервација на терену и лабораторијских испитивања, издвојене су три вулканолошке фације: фација кохерентних хорнбленда-пироксен-биотитских андезита, вулканокластичне стене и пирокластичне стене. Дефинитивно постојање трагова експлозивне вулканске активности документовано је присуством падавинских лапилита изграђених готово у потпуности од одломака пловућаца, што представља главни налаз овог истраживања. Може се претпоставити да је ова експлозивна активност била плиниског типа, као и то да је до ње дошло због мешања магми различитог карактера. Наведена тумачења проистичу из резултата ове студије, као и из њихове интеграције са резултатима ранијих истраживања.

## **ЗАХВАЛНОСТ**

Истраживање је урађено у оквиру Уговора о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2022. години, бр. 451-03-68/2022-14/ 200126.

## **ARE THERE TRACES OF EXPLOSIVE ERUPTIONS IN THE EASTERN PART OF THE LECE VOLCANIC COMPLEX?**

### **INTRODUCTION**

The Lece volcanic complex (LVC) is one of the areas that documents Cenozoic volcanism in Serbia. It spans more than 700 km<sup>2</sup>, which makes it the second-largest volcanic complex in this country (after the Timok Magmatic Complex). It is located on the contact between the Serbo-Macedonian Massif in the east and the Vardar Zone in the west. The complex originated through a post-collisional magmatic activity which lasted from the Oligocene to the Miocene (Cvetković et al. 2016a). Considerable progress in understanding the origin and the evolution of LVC was made during the creation of the Basic Geological Map of Yugoslavia (Dimitrijević et al. 1965; Rakić et al. 1965; Malešević et al. 1974; Vukanović et al. 1975). Over time, however, certain volcanological oversights made during this mapping became evident; they were mainly due to misunderstanding the differences between volcanoclastic and pyroclastic rocks. Recently, Kostić (2016) conducted a petrographic-volcanological investigation of the western part of LVC and pointed out the importance of utilizing a volcanological approach in geological investigations of this area. The results of his study did not reveal the existence of traces of explosive eruptions in the western part of LVC. The eastern part of the complex has also been a subject of research lately (Cvetković et al. 2020). This study focused on determining the origin of rocks which were used to build the early Byzantine archaeological site “Caričin Grad” (*Justiniana Prima*); during this research, the rocks from the site were compared to the rocks from the eastern part of LVC. Although rocks from the eastern part of LVC were researched both by the present paper and by the work of Cvetković et al. (2020), it is important to emphasize that the



goals of these studies were different. In the work of Cvetković et al. (2020) the results were interpreted in the context of geoarchaeology, whereas the present study interpreted them in a way that made it possible to answer the volcanological question asked in the title of the article, and that is determining the existence of traces of past explosive volcanic activity in the eastern part of the Lece Volcanic Complex.

## **METHODS**

In order to determine the petrographic and volcanological characteristics of rocks from the eastern part of LVC, field and laboratory methods were utilized. The fieldwork included making observations in the field and collecting samples. The examined area encompassed the eastern slopes of the Radan mountain, starting at the *Petrov vrh* and ending at the edge of the Lece Volcanic Complex (Figure 1). Six rock samples were collected, and petrographic thin sections were created from the samples later on. Photomicrographs were created using a polarizing microscope with transmitted light (Leica DMLSP) with a built-in digital camera (Leica DC 300).

## **RESULTS AND DISCUSSION**

Synthesizing the observations derived from the field and laboratory investigations of the samples collected from the eastern part of the Lece Volcanic Complex, it has been determined that three volcanologically different facies may be determined: 1) coherent hornblende-pyroxene-biotite andesites, 2) volcanoclastic rocks, and 3) pyroclastic rocks.

### **Coherent hornblende-pyroxene-biotite andesites**

In the area of *Petrova gora*, there are several outcrops of coherent andesites, on which platy and columnar jointing can be observed. These rocks manifest porphyritic and massive textures. Their groundmass is dark grey to black, which makes the determination of the minerals difficult. The only easily observable minerals are the milky white plagioclase phenocrysts, which are occasionally fluidly arranged. Further down the main road, after leaving the forest, there are outcrops of a porous variety of the same rock. These rocks display porphyritic, fluidal and vesicular textures and their groundmass is white in color. There are noticeable phenocrysts of hornblende occasionally above 1 cm in length. Coherent hornblende-pyroxene-biotite andesites consist of plagioclase, hornblende, pyroxene, biotite (phlogopite?), quartz, olivine, sanidine, and metallic minerals. In terms of the crystallinity of their groundmass, these rocks are hypocrySTALLINE-porphyritic to hyalopilitic, whereas, in terms of the abundance of phenocrysts, they are oligophyric (relative abundance of phenocrysts ~ 40%). The texture is massive to fluidal. Amongst phenocrysts, the most abundant are euhedral plagioclase phenocrysts which exhibit lamellar twinning and zoning. They are often fluidly arranged (Figure 2a). The trachytic texture may also be observed, in the form of microlites of plagioclase that encircle the larger phenocrysts in the groundmass (Figure 2b). These characteristics (fluidal fabric, trachytic texture,

euohedral plagioclase phenocrysts, absence of broken phenocrysts) prove that these rocks originate from the lava flow, and not from explosive activity (Bard 1986; Vernon 2018).

The investigated samples of coherent andesite also exhibit a series of indicators of disequilibrium crystallization. Droplet inclusions of the groundmass in the plagioclase phenocrysts can be observed, forming the sieve texture (Figure 3a). In the porous variety of andesites, sieve texture can be observed on some of the plagioclase phenocrysts in the form of dark rims. There are also polymineral aggregates (enclaves) consisting of pyroxene and altered olivine (Figure 3b). In the porous variety of andesite, olivine forms monomineral aggregates and can easily be recognized by its characteristic form, despite the significant degree of alteration. The fact that these rocks contain both quartz and olivine represents a thermodynamic paradox that is commonly explained by magma mixing (Sakuyama 1979). Hornblende phenocrysts are fluidly arranged and display strong pleochroism (ranging from light brown to dark brown). Biotite (phlogopite?) plates also exhibit strong pleochroism as well as opacitic rims. Aside from plagioclase phenocrysts, sieve texture or traces of other types of disequilibrium reactions, can also be observed on phenocrysts of other minerals, such as: pyroxene, hornblende, biotite (phlogopite?) and metallic minerals. These characteristics also imply processes of magma mixing (Varol et al. 2008). The stated findings are in line with the previously proposed hypothesis (Kostić 2019) of mixing between two magmas of distinctly different compositions.

## **Volcaniclastic rocks**

Volcaniclastic rocks are represented by volcaniclastic breccias and volcaniclastic sandstones. Volcaniclastic breccias consist of angular fragments of porous andesites (over 2 mm in size) embedded in a fine-grained matrix consisting of the same rocks. Volcaniclastic sandstones (>50% of fraction between 0.05 and 2 mm), that may be determined as volcanic psammitolites according to a non-genetic, descriptive classification (Cvetković 1998), consist of fragments of coherent andesites embedded in a fine-grained matrix. The matrix is scarce and has the same composition as the fragments. The volcaniclastic sandstones are well-sorted and laminated, which indicates that the redeposition most likely occurred through intermittent flows. There are also elements of rhythmic layering, which indicate that the deposits most likely formed through repeated short episodes of erosion. The volcaniclastic detritus consists of fragments of volcanic rocks and individual mineral grains. The size of volcanic fragments is between 1 and 3 mm. They exhibit hyalopilitic and porphyritic textures, implying that they are fragments of previously described coherent andesites. There are also angular, subangular and subrounded grains of plagioclase, quartz, sanidine, clinopyroxene, biotite, metallic minerals and hydroxides of iron.

## **Pyroclastic rocks**

Pyroclastic rocks are represented by lapilli fall deposits, preserved only in the form of up to one meter wide lens-shaped relicts. These deposits are well-sorted, i.e., they lack a fine-grained matrix and consist almost exclusively of lapilli-sizes pumice

fragments. Aside from pumice clasts, they contain very rare fragments of coherent andesites with dark grey to black groundmass. Due to the domination of white pumice (over 95% wt.%), the rocks are distinctively white. The scarce fine-grained matrix is built out of glass shards (tiny fragments of vesicle walls), as well as fragments of phenocrysts and groundmass. Fragments of pumice are present in two forms. The first is characterized by mainly spherical vesicles of different sizes (Figure 4a) and the second is characterized by elongated, lenticular forms, with eutaxitic texture and ellipsoidal vesicles (Figure 4b).

The most abundant phenocryst in pumice is plagioclase, but it also contains flakes of biotite and chlorite, grains of amphibole, pyroxene, quartz, oxides and hydroxides of iron, and metallic minerals. Plagioclase phenocrysts are variable in size (from <1 mm to > 10 mm) and their forms are angular to subangular. They display zoning and lamellar twinning. Many of them are characterized by a sieve texture, that is, they are absorbed by the groundmass. Biotite flakes exhibit pleochroism and a partial transition into chlorites. Amphibole grains are euhedral and display strong pleochroism. Many of them also exhibit a sieve texture, meaning that they contain numerous droplets of the matrix. Quartz grains are less abundant and show zoning. Rock fragments exhibit porphyritic and hyalopilitic textures, indicating that they are fragments of coherent andesites.

The presence of highly vesicular pumice in the form of lapilli fragments that make up the fall deposits indicates strong explosive eruptions of acidic-to-intermediate magma, which create high eruptive columns and produce large amounts of vesicular and glass material (Cas & Wright 1987; Fisher & Schmincke 1984). Aside from the volcanological and petrographic evidence of explosive volcanic activity, as well as of magma mixing, which have been presented thus far, the evolution of the Lece Volcanic Complex may also be constrained by the analogy with other areas of Cenozoic volcanism in Serbia (e.g., Rudnik, Kopaonik, Golija, Avala, Veliki Majdan). Previous studies on Rogozna (Šoštarić et al. 2012) and Rudnik (Cvetković et al. 2016b) argue that explosive volcanic eruptions in these areas were initiated by mixing between magmas of lamproitic and acidic calc-alkaline (dacitic) character. Taking into account that these areas are petrogenetically similar to the Lece Volcanic Complex, it may be assumed that a similar process took place in this area. However, it should also be noted that lamproites (or lamprophyres) were not found during this study of the LVC. Yet, this interpretation is in line with the petrographic indicators of magma mixing (the presence of enclaves of olivine in rocks that also contain quartz, sieve texture displayed by multiple minerals), as well as the existence of fragments of coherent andesites in pyroclastic rocks, which indicates that the effusive activity preceded the explosive activity.

## CONCLUSION

In this paper, the results of a petrographic-volcanological analysis of rocks from the eastern part of the Lece Volcanic Complex were presented. The main goal of the study was to investigate the existence of traces of explosive volcanic activity in this area. Based on the field observations and laboratory investigations, three

volcanological facies were determined: coherent hornblende-pyroxene-biotite andesites, volcanoclastic rocks, and pyroclastic rocks. The definitive existence of traces of explosive volcanic activity is documented by the presence of relicts of lapilli fall deposits, consisting nearly exclusively of pumice, which is the main finding of this study. It may be assumed that the explosive activity was Plinian in type, as well as that it was triggered by mixing of magmas of different composition.

## ACKNOWLEDGEMENT

The research has been financed by the Contract on realization and financing of scientific research of SRI in 2022, Nr. 451-03-68/2022-14/ 200126.

## ЛИТЕРАТУРА

- Bard, J. P., 1986. *Microtextures of igneous and metamorphic rocks* (Vol. 1). Springer Science Business Media.
- Cas, R. A. F., Wright, J. V., 1987. *Volcanic successions, modern and ancient: A geological approach to processes, products, and successions*. Allen Unwin.
- Cvetković, V., Šarić, K., Tanović, D., Stamenković, A., Matović, V., 2020. Ranovizantijski lokalitet Caričin grad: Poreklo vulkanita i vulkanoklastita korišćenih kao arhitektonsko-gradjevinski materijal. *Aktuelna Interdisciplinarna Istraživanja Tehnologije u Arheologiji Jugoistočne Evrope: zbornik radova, Beograd*, 28. 02.2020., Srpsko arheološko društvo, Beograd, str. 56-62.
- Cvetković, V., Šarić, K., Pécskay, Z., Gerdes, A., 2016b. The Rudnik Mts. volcano-intrusive complex (central Serbia): An example of how magmatism controls metallogeny. *Geologia Croatica*, 69(1), pp. 89-99.
- Cvetković, V., Prelević, D., Schmid, S., 2016a. Geology of South-Eastern Europe. In: Papić, P. (ed.), *Mineral and Thermal Waters of Southeastern Europe*, pp. 1-30.
- Cvetković, V., 1998. Predlog sistematike i nomenklature vulkanskih procesa i vulkanogenih produkata. *XIII Kongres geologa Jugoslavije*, Herceg Novi, str. 93-104
- Dimitrijević, M., Petrović, B., Ćikin, M., Možina, A., Vukanović, M., Karajičić, Lj., 1965. *Tumač za list Leskovac (OGK SFRJ 1:100000)*. Savezni Geološki Zavod SFRJ, Beograd.
- Dragić, D., Mišković, A., Hart, C., Tosdal, R., Dunav, P. F., Glišić, S., 2014. Spatial and temporal relations between epithermal and porphyry style mineralization in the Lece Magmatic Complex, Serbia. In *Proceedings of the SEG Conference "Building Exploration Capability for the 21st Century"*. Society of Economic Geologists, United States (Vol. 109).
- Fisher, R. V., Schmincke, H.-U., 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer Berlin Heidelberg.
- Kostić, B., 2016. *Vulkanološka analiza dela Leckog vulkanskog kompleksa (Brankova kula - Prolom Banja)*. Master teza, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet.
- Kostić, B., 2019. *Understanding a volcanic history of SW part of Lece Volcanic Complex from plagioclase composition, zircon geochemistry and U-Pb age*. International Lithosphere Program, Hévíz, Hungary.
- Malešević, M., Vukanović, M., Brković, T., Obradinović, Z., Karajčić, Lj., Stanisavljević R., Dimitrijević, M., Urošević, M., 1974. *Tumač za list Kuršumlija (OGK SFRJ 1:100000)*. Savezni Geološki Zavod SFRJ, Beograd.
- Rakić M., Dimitrijević M., Bodić D., Terzin V., Cvetković D., Petrović V., 1965. *Tumač za list Niš (OGK SFRJ 1:100000)*. Savezni Geološki Zavod SFRJ, Beograd.

- Sakuyama, M., 1979. Evidence of magma mixing: Petrological study of Shirouma-Oike calc-alkaline andesite volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5(1–2), pp. 179–208.
- Varol, E., Temel, A., & Gourgaud, A., 2008. Textural and compositional evidence for magma mixing in the evolution of the Camlıdere Volcanic Rocks (Galatean Volcanic Province), Central Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(4), 709-727.
- Vernon, R. H., 2018. *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge university press.
- Vukanović M., Karajičić Lj., Dimitrijević M. N., Dimitrijević M., Rajčević D., Pejčić M., 1975. *Tumač za list Podujevo (OGK SFRJ 1:100000)*. Savezni Geološki Zavod SFRJ, Beograd.
- Šoštarić, S. B., Cvetković, V., Neubauer, F., Palinkaš, L. A., Bernroider, M., Genser, J., 2012. Oligocene shoshonitic rocks of the Rogozna Mts.(Central Balkan Peninsula): Evidence of petrogenetic links to the formation of Pb–Zn–Ag ore deposits. *Lithos*, 148, pp. 176-195.

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les années 2022*

*REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022*

Beograd, 2023

**Петар Војновић<sup>1</sup>**

**Petar Vojnović<sup>1</sup>**

## ХИДРОГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОДРУЧЈА ЦЕРНИЧКОГ ПОЉА И КЉУЧКЕ РИЈЕКЕ

## HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE KLJUČKA RIJEKA AND CERNIČKO POLJE AREA

ПРЕТХОДНА САОПШТЕЊА, СТРУЧНИ РАДОВИ, ЕСЕЈИ - REPORTS

**Апстракт:** Подручје истраживања односно Церничко поље, са својим главним током, Кључком ријеком, налази се у југоисточном дијелу Републике Српске и припада сливу ријеке Требишњице. У овом дијелу су се још од средине двадесетог вијека, па до данас вршила хидрогеолошка истраживања у више наврата. Међутим, свеобухватна анализа и синтеза добијених резултата, као и приједлог даљих хидрогеолошких истраживања до сада нису рађена. Стим у вези, током јула 2018. године извршена су детаљна хидрогеолошка истраживања шире околине Церничког поља са циљем дефинисања услова храњења, правца, смјера и брзине кретања подземних вода, затим дренажа издања и режима подземних вода. У ову сврху коришћене су следеће методе: реконосцирање терена, опит обиљежавња и видеоендоскопско снимање бушотина. Са хидрогеолошког аспекта могу се издвојити сви већ познати типови издања, од којих доминантну улогу има карстни тип. Режим истицања подземних вода, који у највећој мјери зависи од инфилтрације оборинских вода, оцјењује се као неравномјеран са односом између минималних и максималних вриједности од  $Q_{min}:Q_{max} = 1:6000$ . Током истраживачког периода извршен је и опит обиљежавања Na-флуоресцеином који је упуштен у понор Кључке ријеке, а праћење појаве трасера вршено је низводно на еставели Обод у Фатничком пољу (фиктива раздаљина 14 km) и на Врелу Око (извор ријеке Требишњице) у Билећи (фиктивна раздаљина 26 km). Опитом је утврђена подземна веза са обје тачке осматрања, док је фиктивна брзина кретања подземних вода према еставели Обод износила 0.5 cm/s, те према врелу Око 1 cm/s. Добијене брзине указују на добру развијеност и повезаност карстних канала. Упуштање обиљеживача на једној тачки те његово појављивање на двије релативно удаљене локације (сва 18 km) указује на присуство подземне вододјелнице. Примјењена методологија, заједно са анализом и синтезом претходних резултата, даје добру основу за наставак истраживања на овом

<sup>1</sup> Рударско-геолошки факултет, Београд, Србија

E-mail: petarpodosoje@gmail.com

Faculty of Mining and Geology, Belgrade, Serbia

E-mail: petarpodosoje@gmail.com

подручју, првенствено са циљем дефинисања могућности формирања површинске акумулације на простору Церничког поља.

**Кључне ријечи:** карст, подземне воде, опит обиљежавања, Кључка ријека, Церничко поље

**Abstract:** The research area, ie Cerničko polje, with its main flow, Ključna rijeka, is located in the southern part of Republika Srpska and belongs to the Trebišnica river basin. Hydrogeological research has been carried out in this area on several occasions since the middle of the twentieth century. However, a comprehensive analysis and synthesis of the obtained results, as well as a proposal for further hydrogeological research have not been done so far. In connection with that, during July 2018, detailed hydrogeological researches of the wider surroundings of Cerničko polje were performed with the aim of defining feeding conditions, direction and velocity of groundwater movement, then drainage and groundwater regime. For this purpose, the following methods were used: terrain reconnaissance, tracing test and video endoscopic recording of wells. From the hydrogeological aspect, all already known types can be distinguished, of which the karst type has a dominant role. The groundwater runoff regime, which largely depends on rainwater infiltration, is assessed as uneven with a proportion between the minimum and maximum values of  $Q_{min}: Q_{max} = 1: 6000$ . During the research period, an experiment with Na-fluorescein marking was performed, which was introduced into the Ključka rijeka ponor, and the occurrence of tracers was monitored downstream at the Obod estate in Fatničko polje (14 km fictitious distance) and at Vrelo Oko (Trebišnjica river spring) in Bileća (fictitious distance 26 km). The test determined an underground connection from both observation points, while the fictitious velocity of groundwater movement towards the Obod estuary was 0.5 cm / s, and towards the Vrelo Oko 1 cm/s. The introduced of the marker at one location and its appeared at two relatively distant locations (approx. 18 km) indicates the presence of an underground watershed. The applied methodology, together with the analysis and synthesis of previous results, provides a good basis for continuing research in this area, primarily with the aim of defining the possibility of forming a surface accumulation in the Cerničko polje.

**Key words:** karst, groundwater, tracing test, Ključka rijeka, Cerničko polje

## УВОД

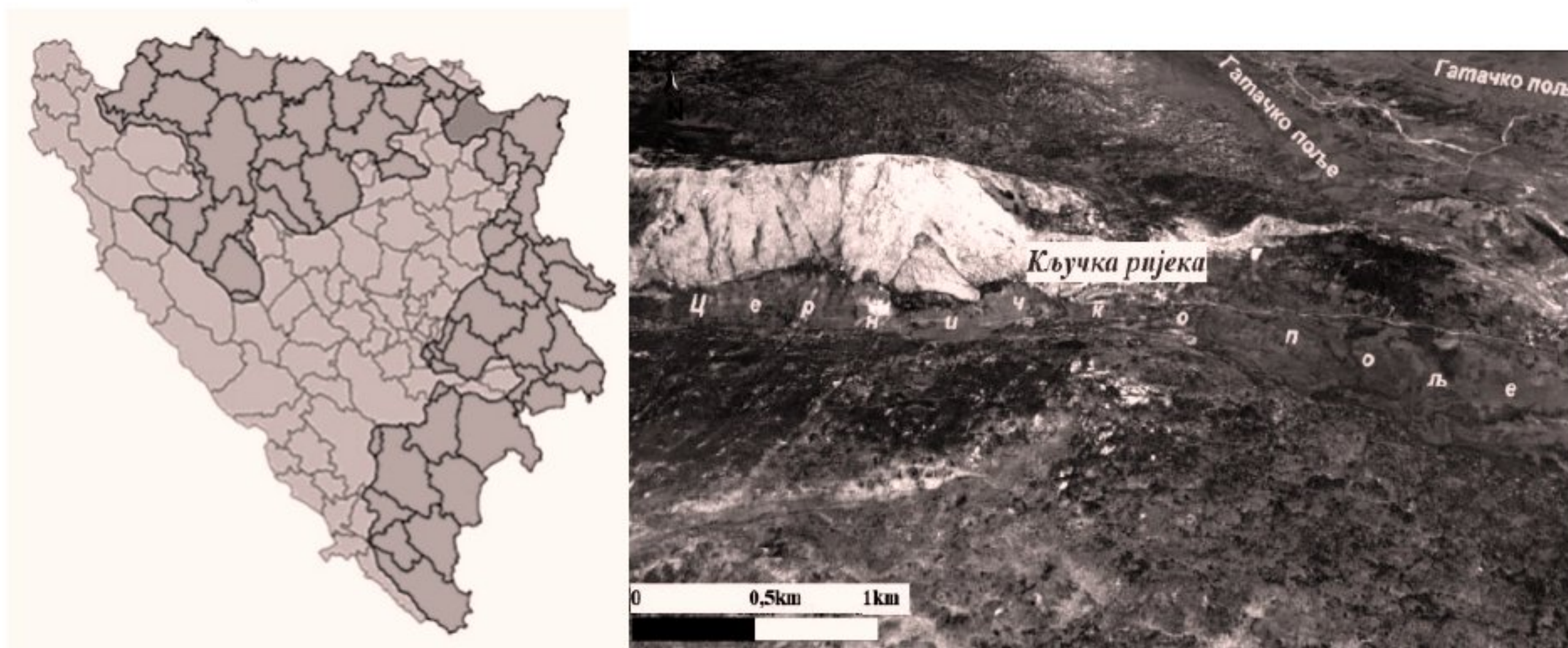
Проблематика рада односи се на хидрогеолошке карактеристике Церничког поља са Кључком ријеком као главним током. Претходна истраживања говоре да се: „Резултати вишегодишњих истраживања шире зоне Церничког поља односе на концепцију коришћења овог простора за акумулирање вода које се природним и дијелом вјештачким путем транспортују из зоне Гатачког поља које је хипсометријски више ка Фатничком пољу и врелима Требишњице на хипсометријски нижим котама од Церничког поља“<sup>1</sup>. Из тог разлога до сада на овом подручју су изведена одређена хидрогеолошка истраживања са циљем осматрања флукуације подземних вода зоне Церничког поља у различитим хидрогеолошким условима. Таква истраживања дала су опис основних хидрогеолошких својстава средине, као и добру подлогу за будућа детаљнија истраживања на овом подручју.

---

<sup>1</sup>Сорајић С. & Милановић С.: „Елаборат о хидрогеолошким карактеристикама функционисања Церничког поља у периоду малих и великих вода“, стр. 1

## ОПШТЕ КАРАТЕРИСТИКЕ ИСТРАЖНОГ ПОДРУЧЈА

Шира зона подручја истраживања представља југоисточни дио Републике Српске. Церничко поље (Слика 1.), преко кога тече Кључка ријека, спада међу мања карстна поља са површином око 3 km<sup>2</sup>. Подручје је брдско-планинско са великим бројем увала, брда, вртача, понора, извора и свих других подземних и површинских морфолошких облика карактеристичних за карст. Надморска висина поља креће од 817 до око 855 m.n.m.

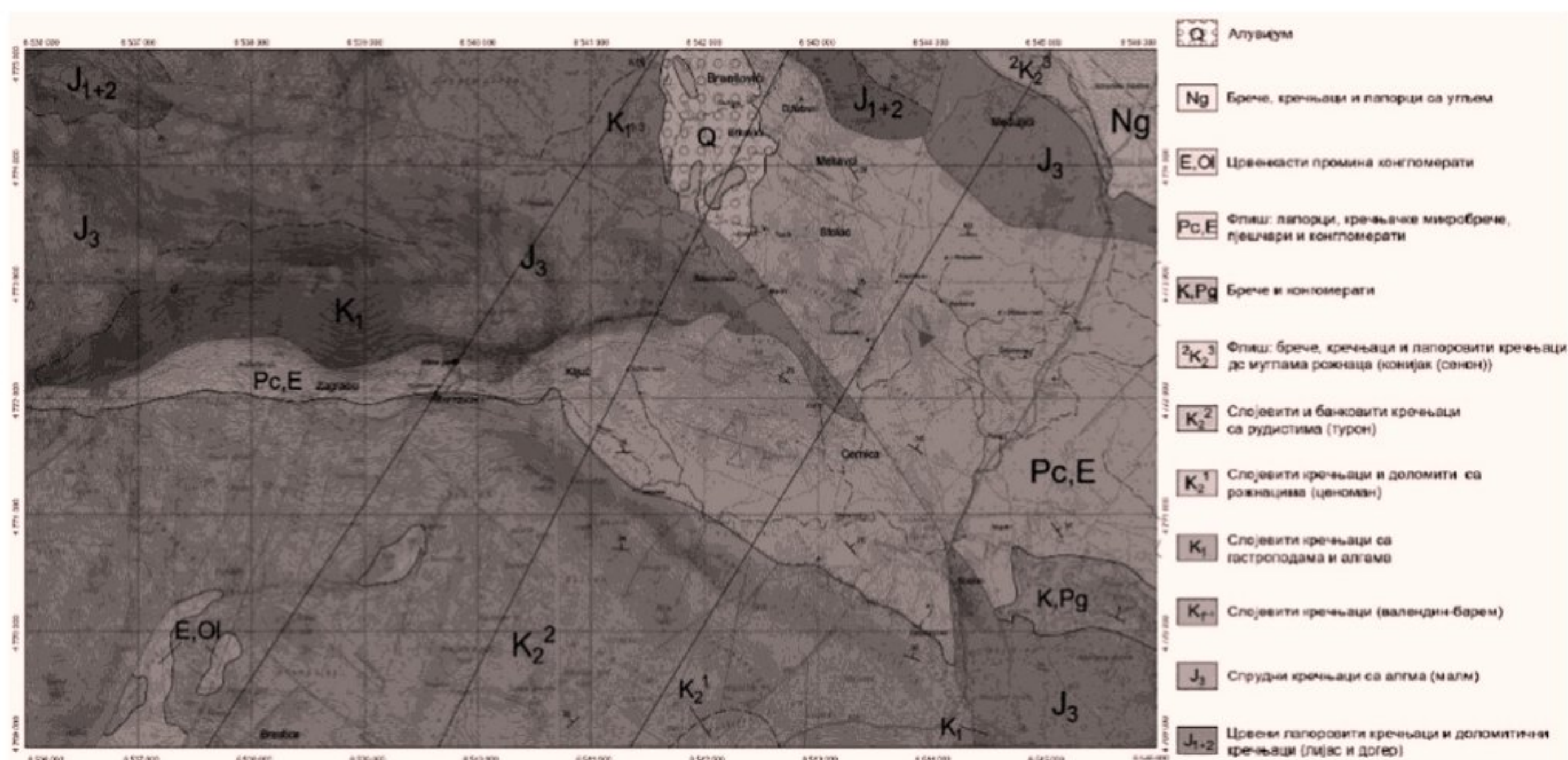


Слика 1. Географски положај Кључке ријеке и Церничког поља

Простор припада режиму измјењене маритимне климе, на прелазу према континенталној. Просјечне годишње падавине су уједначене и износе од 1500 до 2000 mm воденог талога. Просјечна температура износи 9,2 °C. Ток Кључке од извора Вилина пећина до момента понирања износи нешто више од 300 m. Протицај Кључке ријеке варира од 10 l/s у периоду минимума, до 60 m<sup>3</sup>/s у периоду максимума, што даје неравномјеран однос  $Q_{\min} : Q_{\max} = 1 : 6000$ . Најзначајнији спелошки објекат је Вилина пећина, која уједно и предстаља извор Кључке ријеке. Претходна истраживања показала су да се: „Подручје истраживања налази у граничном дијелу Спољашњих и Унутрашњих Динарида. Одликује се сложеном геолошком и тектонском грађом“<sup>1</sup>. Издвајају се три тектонске јединице: Тектонска јединица Мека Груда – Сњијежница, Тектонска јединица Бјеласице и Кучка тектонска јединица. Седименти мезозојика представљени су кречњацима и доломитима (јура и креда), док је кенozoјик изграђују седименти флиша, конгломерата и бреча. Церничко поље изграђује флиш палеоцена и еоцена, који има важну улогу за функционисање хидрогеолошког система (Слика 2.).

<sup>1</sup> Мирковић М. et al.: „Тумач за лист Гацко К34-26“, стр. 11





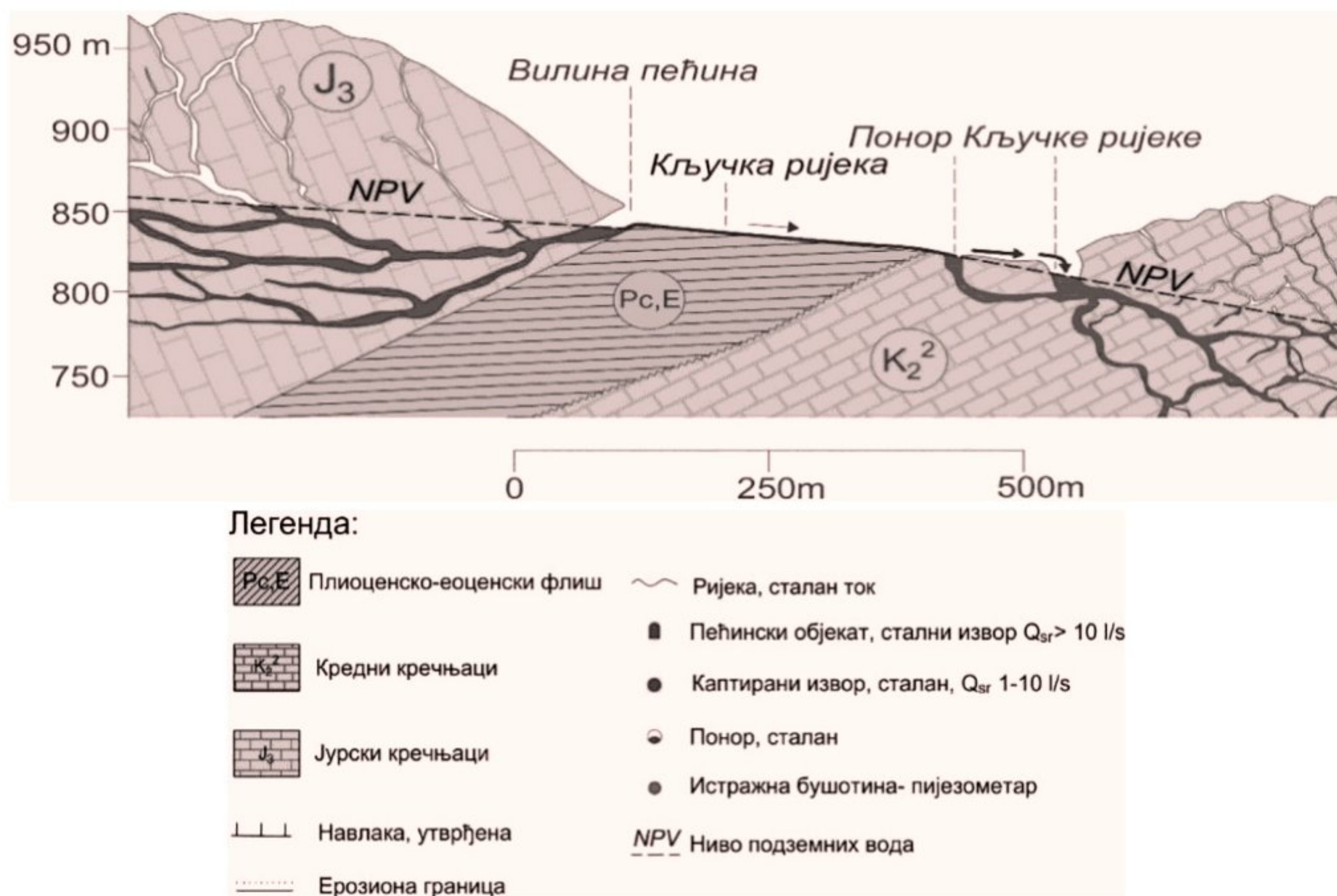
Слика 2. Геолошка карта Церничког поља

Са хидрогеолошког аспекта, а на основу досадашњих истраживања, могу се издвојити сви већ познати типови издани, а то су: карстни, сложени, пукотински, интергрануларни (збијени) тип издани, као и терени сиромашни изданима. Што се тиче квалитета воде, у принципу, ријеч је водама добрих физичких и хемијских својстава. Доминантан анјон је  $\text{HCO}_3^-$ , док су од катјона најзаступљенији  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . Режим карстног типа издани је динамичан, што се нарочито односи на издашност. Храћење издани врши се по ободу Церничког поља и у највећој мјери зависи од режима падавина. Ток Кључке ријеке формира се на тектонском контакту плиоценског-еоценског флиша и кречњака, а завршава се у понору Кључке ријеке са капацитетом гутања око  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Општа карактеристика оваког типа извора је непосредна зависност између падавина и његове издашности. Тако да у кишним периодима године, када понор не може да прими сву количину воде која тече коритом Кључке ријеке, долази до плавлјења Церничког поља.

## ПРИМЈЕЊЕНА МЕТОДОЛОГИЈА

Истраживања описаног подручја реализована су кроз теоретски приступ и детаљна теренска истраживања. Теоретски приступ се односио на синтезу, класификацију и анализу расположиве фондовске документације. Реконгосцирање терена као почетна теренска активност обухватала је дефинисање тачног координатног положаја свих тачака картирања (GPS) као и идентификацију и регистровање свих хидрогеолошких објеката и појава на истраживаном терену. Оно је обухватило површину од  $15.2 \text{ km}^2$ , док је картирање ради добијања цјелокупне хидрогеолошке слике изведено још и на локацијама на којима је вршено узорковање подземних вода у току извођења опита обиљежавања. Видеоендоскопско снимање за циљ је имало провјеру функционалности свих пијезометара на истраживаном простору. Опит обиљежавања, као једна од значајних метода хидрогеолошких истраживања у карсту изведена је у априлу 2018. године на понору Кључке ријеке (Слика 4.), са

циљем дефинисања брзине циркулације подемних вода и утврђивања подземне везе са еставелом Обод у Фатничком пољу (раздаљина 14 km) и Врелом Око у Билећи (раздаљина 26 km). Прије опита било је потребно обићи терен на унапријед предвиђеним локацијама, односно потенцијалним мјестима будућег појављивања трасера, те узети нулти узорк и имјерити издашност на осматрачким пунктовима. Као обиљеживач кориштен је Na-флуоресцеин. На основу прикупљених података утврђено је да је за квалитетан опит обиљежавања неопходно убацити 12 kg Na-флуоресцеина (Сорајић & Милановић, 2018). Концентрација узорка мјерена је на опреми Turner designs UV 10 флуорметру.



Слика 3. Шематизовани приказ хидрогеолошког профила Кључке ријеке (Према Милановић П., 1979.)

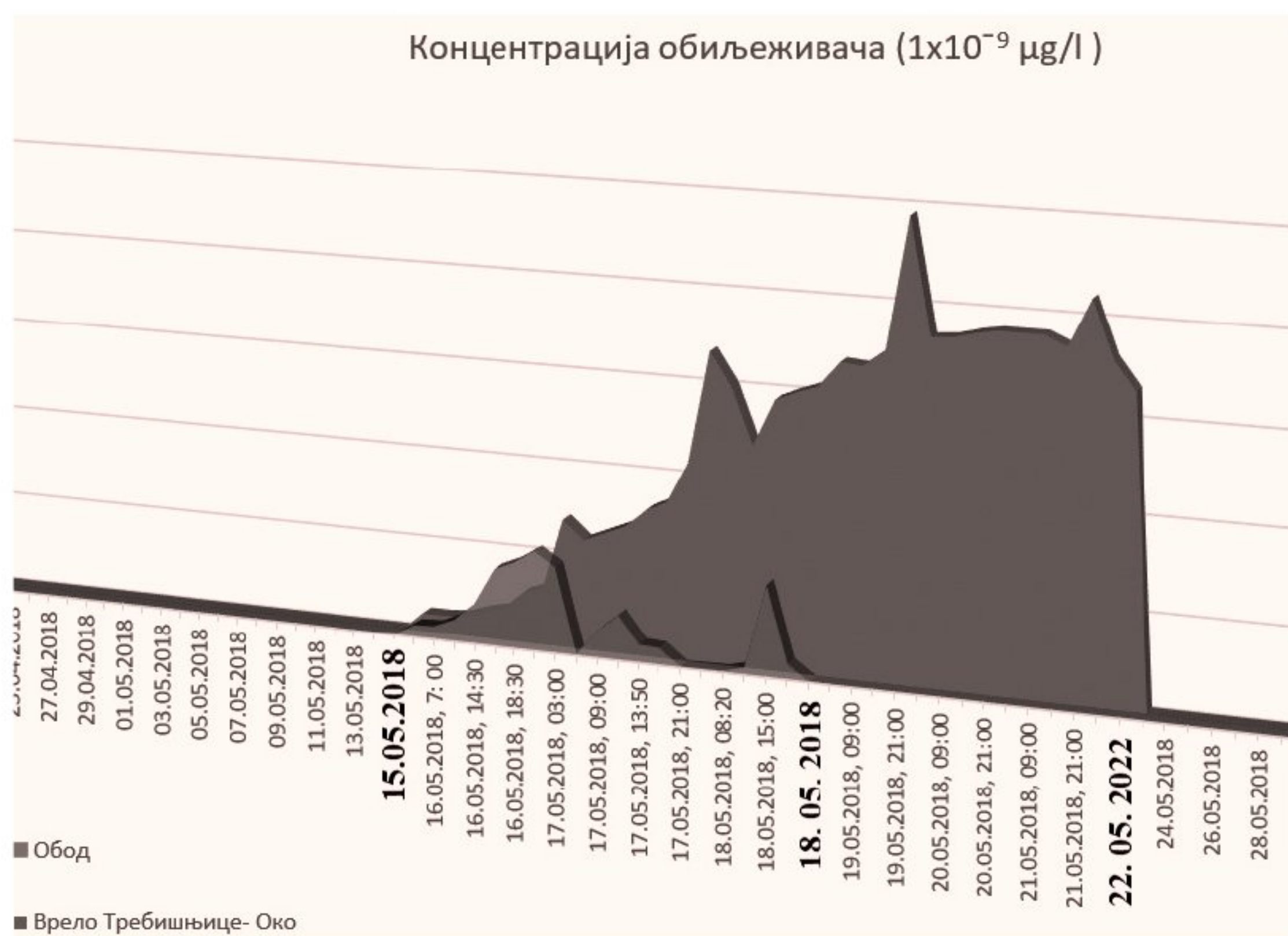


Слика 4. Убацавање обиљеживача у понор Кључке ријеке (Сорајић & Милановић, 2018)

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

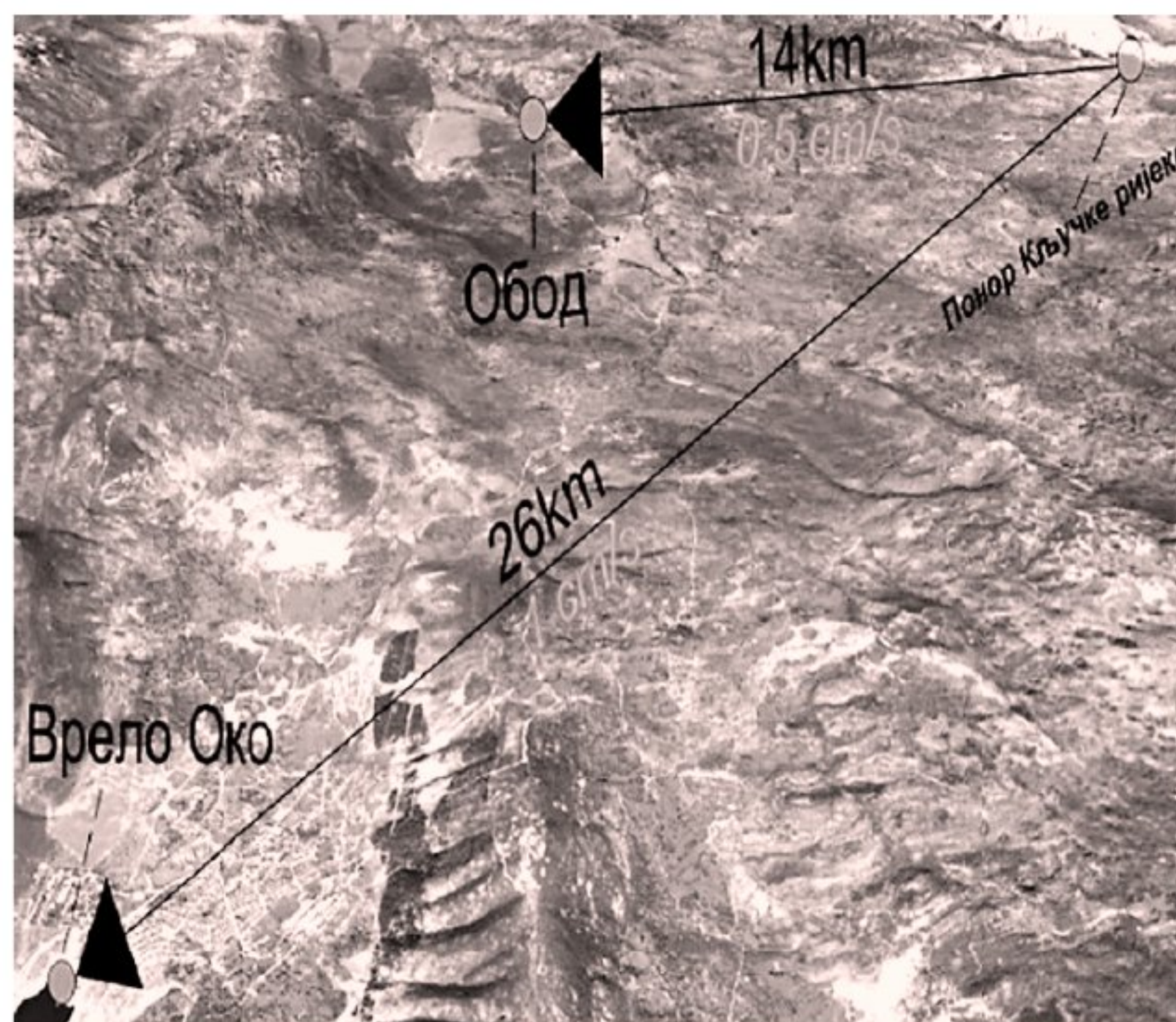
На основу реконосцирања терена прикупљени су подаци о морфологији подручја, те геолошким и хидрогеолошким карактеристикама терена. Захваљујући овој методи дефинисан је тачан координатни положај свих тачака картирања, а такође су идентификовани и регистровани сви хидрогеолошки објекти и појаве као што су: извори, стални и повремени токови, пећине, јаме, понори, истражне бушотине и пијезометри, те степен карстификације и испуцалости стијена. Током прегледа видеоендоскопских снимака пијезометара, констатовано је да се ради о конструкцијама које се налазе у добром стању, те се као такве могу користити за наставак мониторинга.

Опитом обиљежавања утврђена је подземна веза са еставелом Обод у Фатничком пољу и са Врелом Око у Билећи. На обје локације обиљеживач се појавио мјесец дана након његовог упуштања у понор Кључке ријеке (16. мај 2018.). На еставели Обод у Фатничком пољу последње појављивање обиљеживача регистровано је 18. маја-3 дана истицања, док је на врелу Око регистровано 22. маја-6 дана истицања (слика 5.)



Слика 5. Графички приказ времена појављивања и концентрације трасера

Фиктивна брзина кретања подземних вода према еставели Обод износи  $0.5 \text{ cm/s}$ , а према врелу Око  $1 \text{ cm/s}$  (слика 6.). Добијене фиктивне брзине указују на добру развијеност и повезаност карстних канала. Пошто је обиљеживач упуштен на једној тачки, а његово појављивање забиљежено на двије поприлично удаљене локације, може се говорити о присуству подземне вододјелнице, захваљујући којој се ток подземних вода рачва и наставља струјање у два правца.



Слика 6. Доказани правци кретања подземних вода са приказаним раздаљинама и фиктивним брзинама, шематизованим на Google Earth снимку

Примјеном описаних метода добијена је добра основа за наставак истраживања на овом подручју са циљем испитивања могућности формирања површинске акумулације на подручју Церничког поља. Међутим за те потребе, у наредном периоду, потребно је извести још додатна истраживања. Она првенствено треба да се односе на:

- Извођење нових истражних бушотина;
- Спровођење спелеолошких истраживања унутарашњости Вилине пећине;
- Формирање осматрачке мреже у зони Кључкој ријеке за континуалније праћење хидролошких параметара;
- Израда анализе физичких и хемијских својстава вода;
- Утврђивање изотопског састава вода;
- Оцјена рањивости подземних вода,
- Израда хидрогеолошког модела, 3D модела, детаљног 3D DEM модела, као и формирање релационе базе података са свим прикупљеним подацима

## ЗАКЉУЧАК

Још од средине двадесетог вијека, па до данас, на подручју Церничког поља примјењиване су различите методе хидрогеолошких истраживања, тако да се јавила потреба за њиховом анализом, синтезом и допуном. Са хидрогеолошког аспекта могу се издвојити сви већ познати типови издани, од којих доминантну улогу има карстни тип. У оваквим теренима важну улогу за формирање површинских токова, као што је Кључка ријека, имају седименти флиша који представљају баријеру кретању подземних вода. Добијени резултати показују добру развијеност карстних канала и повезаност понора Кључке ријеке са

оставелом Обод у Фатничком пољу и извору Требишњице у Билећи. Режим истицања Кључке ријеке, који се огледа кроз велике разлике између минималних и максималних протицаја, оцјењује се као нестабилан. Сагледавањем цјелокупне слике и узимајући у обзир циљ прикупљања података, а то је могућност формирања површинске акумулације, уочава се потреба за спровођењем неких нових истраживања. Од тих будућих истраживања очекује се да ће дати квалитетне одговоре на сва питања која су од значајна за израду потребних хидрогеолошких и хидротехничких идејних рјешења

## **СПИСАК ЛИТЕРАТУРЕ**

- Милановић П. (1979). Хидрогеологија карста и методе истраживања. Требиње: ХЕ на Требишњици
- Мирковић М., Калвезић М., Пајовић М., Рашковић С., Чепић М., Вујисић П. (1980). Тумач за лист Гацко К 34-26, Београд: Савезни геолошки завод
- Сорајић С., Милановић С. (2018). Елаборат о хидрогеолошким карактеристикама функционисања Церничког поља у периоду малих и великих вода, Билећа: Geo Eco Group d.o.o

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les année 2022*

*REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022*

Beograd, 2023

**Тивадар Гаудењи<sup>1</sup>**

**Tivadar Gaudenji**

## **125 ГОДИНА ОД ФОРМИРАЊА ЧАСОПИСА „ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА”**

## **125th ANNIVERSARY OF THE JOURNAL "ZAPISNICI SRPSKOG GEOLOŠKOG DRUŠTVA"**

**ПРЕТХОДНА САОПШТЕЊА, СТРУЧНИ РАДОВИ, ЕСЕЈИ - REPORTS**

**Апстракт:** „Записници Српског геолошког друштва” поред „Геолошких анала Балканског полуострва” представљају једне од најстаријих геолошких часописа у Србији и у југоисточној Европи. У „провизорном” периоду који представља време од оснивања до усвајања Статута и формалне регистрације Српског геолошког друштва (СГД) у виду извештаја су издавани записници са Зборова СГД који су објављивани у часописима „Наставник”, „Дело” и „Просветни гласник”. Тако је и стихијски именован часопис „Записници Српског геолошког друштва”. Први број Записника Српског геолошког друштва је одштампан 1900. године и обухватао је саопштења са зборова СГД у периоду 1897-1900. Као година формирања часописа узима се 1897., када је посао прикупљања, уређивања материјала саопштења са зборова СГД започет, иако је први број одштампан три године касније због објективних разлога.

Други период је представљао време од оснивања до Првог светског рата, када је часопис излазио са збирним издањима за неколико годишта. СГД је тек 1906. године успео да успостави континуитет издавања часописа на годишњом нивоу које је одржано до Првог светског рата.

Трећи период је започет са реорганизацијом СГД у новој држави који је био са потешкоћама, али тако да су Записници Српског геолошког друштва поново на нивоу збирних годишта излазили све до 1937. након чега су поново штампане годишње свеске. Оваква пракса је прекинута Другим светским ратом.

Четврти период свакако је након 1947. до распада Социјалистичке Федеративне Републике Југославије. Излажење Записника, слично и активностима СГД у многоме је зависило од ажурности управе и финансија, тако да су често излазиле свеске које су обухватале 2-3 годишта.

---

<sup>1</sup> Географски институт „Јован Цвијић” САНУ, Ђуре Јакшића 9. 11000 Београд.  
E-mail: t.gaudenyi@gi.sanu.ac.rs)

Geographical Institute “Jovan Cvjić” of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Đure Jakšića 9, 11000 Belgrade, Serbia. (E-mail: t.gaudenyi@gi.sanu.ac.rs)

Најтежи (пети) период у раду СГД су свакако од 1990-те до 2003. године. У овом периоду је изашло само 3 свеске Записника Српског геолошког друштва.

Од 2004. Управе СГД су се трудиле да издају свеску Записника Српског геолошког друштва на годишњем нивоу (2 пута им није успело).

Изазови времена захтевају осавремењавање Записника Српског геолошког друштва у смислу да буду боље видљиви и приступачнији и уједно да представља научни национални часопис који сада мора да има и циљ да развија геолошку терминологију на српском језику.

**Кључне речи:** Записници Српског геолошког друштва, *Comptes Rendus des scéances de la Société Serbe de géologie*, структура и концепт научног часописа.

**Abstract:** Journals “*Zapisnici Srpskog geološkog društva*” and “*Geološki anali Balkanskoga poloustrva*” represents one of the oldest geological journals in Serbia and Southeast Europe. “*Zapisnici Srpskog geološkog društva*” in the “provisional” period, which represents the time from the foundation to the adoption of the Statute and formal registration of the Serbian Geological Society (SGD), the minutes (in Serbian: *zapisnici*) of the meetings of the Serbian Geological Society were issued in the form of reports and published in the magazines “*Nastavnik*”, “*Delo*” and “*Prosvetni Pregled*”. That’s the brief history journal “*Zapisnici Srpski Geologiskoga društva*” was originally denominated. The first issue of the “*Zapisnici Srpskog geološkog društva*” was printed in 1900 and included articles from meetings of the Serbian Geological Society in the period 1897-1900. The year 1897 is taken as the year of formation of the journal, when the work of collecting and editing articles from the meetings of the SGD was started, although the first issue was printed three years later due to editorial work.

The second period represented the time from its founding to the First World War, when the magazine was published with combined editions for several years. Only in 1906, SGD managed to establish the continuity of publication of the magazine on an annual level, which was maintained until the WWI.

The third period began with the reorganization of the SGD in the new state after the WWI, which was with difficulties, but the “*Zapisnici Srpskog geološkog društva*” were again published at the level of aggregate years until 1937, after which the annual volumes were printed. This practice was interrupted by the WWII.

The fourth period is certainly after 1947 until the collapse of the Socialist Federal Republic of Yugoslavia. The publication of the “*Zapisnici Srpskog geološkog društva*”, was similar to the activities of the SGD, depended in many ways on the up-to-dateness of the administration and finances, so volumes covering 2-3 years were often published.

The most difficult (fifth) period in the work of SGD was certainly from 1990 to 2003. In this period, only 3 volumes of the “*Zapisnici Srpskog geološkog društva*” were published.

Since 2004, the SGD has been trying to publish a volume of the “*Zapisnici Srpskog geološkog društva*” on an annual basis (they failed twice).

The challenges of the more modern world require the modernization of the “*Zapisnici Srpskog geološkog društva*” in the sense that they are more visible and accessible and at the same time represent a scientific national journal which must now also have the goal of developing geological terminology in the Serbian language.

**Key words:** *Zapisnici Srpskog geološkog društva*; *Comptes Rendus des scéances de la Société Serbe de géologie*; concept and scope of scientific journal

## УВОД

У 2022. години обележавамо 125 година постојања часописа „Записници Српског геолошког друштва”. Часопис Српског геолошког друштва нам даје управо увид у три ствари:

1) Активности Српског геолошког друштва и рад Управе Српског геолошког друштва

2) Пројекте и геолошка истраживања у земљи

3) Финансирање и подршку научно-струковним организацијама, који се баве првенствено фундаменталним истраживањима.

Активности Српског геолошког друштва (у даљем тексту: СГД) су публиковане пре шест година у монографији поводом 125 година СГД (Rundić & Grubić., 2016), где је богато илустрован и детаљно приказан рад једног од најстаријих научних друштва у Србији. У овом раду није циљ да анализирамо текстове објављене у „Записницима СГД” и да се понављају и преписују недавно објављене чињенице, него да се кроз кратак преглед анализе часописа предложи у ком правцу би требали ићи како би као „финални производ” добили савремени национални геолошки часопис.

## КРАТАК ИСТОРИЈАТ ЧАСОПИСА „ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА”

„Записници Српског геолошког друштва” поред часописа „Геолошки анали Балканскога полуострва” представљају једне од најстаријих геолошких часописа у Србији и у југоисточној Европи. Настанак часописа „Записници Српског геолошког друштва” (у даљем тексту: „Записници СГД”) је био помало стихијски и представља одраз времена у коме се огледају и околности око организовања геолога у виду научног друштва. Кратак историјат је дат у виду тока и концепта „Записника СГД”:

### Провизорни период (1891-1897)

Провизорни (или прелазни) период од прерастања записника са геолошких зборована у часопис „Записници СГД” представља период од 1891. до 1897. године.

Геолошки зборови Велике школе започети 1891. су означавали почетак активности СГД, док 1897. године је усвојен први статут СГД. Српски геолози крајем XIX века увидели су значај писане речи и потребу за публикавањем закључака геолошких дискусија и истраживања. Закључке са геолошких зборована су објављивали у виду записника у „Геолошким анализа Балканскога полуострва”, „Наставнику”, „Делу” и „Просветном гласнику”. У том времену је овакав начин био много једноставнији од издавања и штамапања посебног часописа. У провизорном (1891-1897) периоду веома битан моменат представља XXII збор СГД који је био о београдском водоводу 1894. године када је од стране државних органа дата примедба да о оваким битним темама за Београд не могу



одлучивати неформалне групе („приватни скупови геолога”) већ је то потребно да се уреди кроз деловање регистрованог друштва. Геолози су пробали да некако ствари одложе, јер административно-правни послови нису била област у којима су били експерти (и нерадо губили време). Ипак, највероватније када су били опоменути од стране државних органа саставили су статут СГД чијим усвајањем (и регистрацијом) је рад друштва формализован и озваничен.

### **Од оснивања часописа до Првог светског рата (1897-1914)**

Овај период „Записника СГД” представља време од усвајања статута и формалне регистрације СГД (1897) до почетка Првог светског рата (1914), што представља 17 година постојања часописа.

Назив часописа „Записници Српског геолошког друштва” указује на фомру како су извештаји са зборова СГД објављивани у другим часописима док нису постали самостални часопис. Тако да је именовање је проистекло стихијски на основу форме како су предати радови са зборова друштва.

Први број Записника СГД је одштампан 1900. и обухватао је саопштења са зборова СГД у периоду 1897-1900. Као година формирања часописа узима се 1897. година, када је посао прикупљања, уређивања материјала саопштења са зборова СГД започет, иако је први број одштампан четири године касније због објективних разлога. Два касније издата броја (тома) такође су обухватале два односно три годишта. Тек код четвртог броја се постигао циљ да један број представља једно годиште иако тај 4. број „Записника СГД” за 1906. годину штампан тек 1908. године. Слично томе 5. број „Записника СГД” за 1907. годину је штампан 1910. године. Шести број „Записника СГД” за 1911. годину штампан 1912, док 7. број „Записника СГД” за 1908. годину је успешно одштампан 1913. године (7. број/свеска „Записника СГД” ни СГД ни Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду нема у својим књижницама/библиотекама само их поседује Народна библиотека Србије).

У Записницима СГД за 1920-1922 (Luković, 1923) констатује се да Записници СГД за 1909. годину је штампани у Нишу 1915. године, док су Записници СГД од 1910. закључно са 1914. годином изгубљени за време рата. Међутим, највероватније се ради о штампарској грешци и односи се на Записнике СГД за 1910. годину (а не Записнике СГД за 1909). Тако да Записници СГД за 1910. су штампани у Нишу и током рата изгубљени. Каснији записници 1911-1914. године нису штампани током рата.

Део саопштења са зборова који су припремљени за „Записнике СГД” за 1910. и 1913. годину су публиковани тек у „Записницима СГД” за 1948. годину, одштампаним 1953. године.

Уређивање часописа по правилу је вршио секретар СГД. Пракса је била да се уредно хронолошки по зборовима поређају предавања. Садржај часописа огледао се у раду зборова у којима су обрађиване следеће теме: (1) Некролози; (2) Информације из Друштва; (3) Предлози за чланство; (4) Пошиљке из унутрашњости и иностранства (писма, телеграми, збирке); (5) Разгледање

пристиглих публикација; (6) Обавештења о новим налазима фосила, минерала и стена у Србији; (7) Преводи и реферати о важним публикацијама, нарочито из геологије Балканског полуострва; (8) Оригинални радови ; и (9) Расправе о геолошкој терминологији.

### **Међуратни период (1920-1941)**

СГД је од 1920. године обновио своје активности у новим околностима (Краљевина Срба, Хрвата и Словенаца). Битна новина је била што су од 1925. угледни геолози из Загреба и Сарајева почели приступати СГД. Записници СГД за 1920-1922 су објављени 1923. године. По први пут није назначено који је број свеске, иако су они требали да носе број десет. Записници СГД су исто помало стихијски излазили углавном када се скупио сав материјал за објављивање или је било довољно финансија за штампање. Свеска „Записника СГД” за 1923. је објављена 1925., док су за годишта 1924-1930. Свеска је прештампана из Геолошких анализа Балканског полуострва објављена 1932. године. Ово значи да су аутори своја саопштења са збора из 1924. могли да прочитају тек 1932. године. У ово време (Записници СГД за године 1924-1937) су излазили као додаток часопису Геолошки анали Балканског полуострва (у три посебне свеске Записници СГД за 1924-1930 штампани 1932. године, Записници СГД за 1931-1935 штампани су 1972. године, док Записници за од марта 1935-1937. године).

Вођење редних бројева зборова се одржало до 1930. године. 241. Збор СГД се одржао 10. децембра 1929. године, док следећи збор (242.) који је одржан 10. јануара 1930. није назначен који по реду, него је дат само датум одржавања, након чега је то постао стандард за све следеће зборове.

Самостална свеска по годишту је поново успостављена за Записнике СГД од 1936. године, и излазила све до 1940. Записници СГД за 1941. су одштампани након Другог светског рата у Записницима СГД за 1949. годину, која је одштампана 1953. године.

### **Других педесет година СГД (1947-1990)**

У околностима новог државног уређења рад СГД је обновљен одржавањем оснивачке скупштине 25. децембра 1947. године. Тако је свеска Записника СГД за 1948. годину објављена 1950. године. Нова управа је искористила моменат и успела да нека ранија припремљена и необјављена саопштења са зборова (за 1910, 1913 и 1941 годину) објави у Записницима СГД за 1949. годину. Поново нова управа је „хватала” ритам и чинило се да ће се изборити са нелагодама и поново објављивати свеске Записника СГД које обухватају само једно годиште, али овај циљ није увек успешно реализован. Разлог томе су биле (не)ажурност управе и геолошки конгреси за које су се издавани зборници радова од неколико томова. Свеске Записника СГД су поново обухватале понекад два (1958-59; 1960-61; 1975-76; 1985-86; 1990-91), три (1968-69; 1987-89) и једном четири (1964-67) годишта.

## **Гашење Савеза геолошких друштава Југославије (1991-2006)**

Овај период можемо назвати гашењем Савеза геолошких друштава Југославије (у даљем тексту: СГДЈ). Наиме након XII конгреса геолога Југославије 1990. донета је одлука да се следећи геолошки конгрес одржи у Загребу (1994). Адреса СГДЈ је била од оснивања (1952) у Београду тек 1990 за потребе организовања конгреса је пребачена у Загреб. Након прославе јубилеја 100 година од оснивања (1991), исте године започети су трагични догађаји распадом СФРЈ и ратни сукоби. У овом околностима СГДЈ се брише из евиденције у Загребу и Хрватско геолошко друштво иступа из СГДЈ чији пример следе и друга републичка друштва. Тако су, после скоро 40 година постојања, у СГДЈ од 1992. остали практично само СГД и Црногорско геолошко друштво. То је трајало све до 2006. године, када се распада и државна заједница Србије и Црне Горе. Ратно окружење, санкције, инфлација и криза у земљи су веома депримирајуће утицали на постојање самог СГД. Ипак најтежи период је био крајем 1990-тих када је СГД под утицајем политичких одлука изгубило своје просторије а веома добро сређена књижница Друштва је неплански и нестручно премештена и покрадена. Током кризних година Записници СГД за 1990 и 1991 су успели да се одштапају тек 1995, следећа свеска Записника СГД која је обухватала 6 годишта (1992-1997) је одштамана 1998. Да би НАТО интервенција и проблеми са просторијама СГД учинила своје да Записници СГД за шестогодишњи период (1998-2003) буду одштампана 2005.

## **Записници СГД у првим декадама XXI века (2006-2022)**

До неке условно речено стабилизације дошло 2005-2006, када је СГД је поставио за циљ редовно излажење Записника СГД које зависи од малобројних активних чланова Друштва. Излазак Записника СГД је препуштено ажурности управе која је мање-више успевала да се избори са уређивачким послом и благовременим штампањем часописа. Пошто је уочена све слабија заинтересованост за зборове Српског геолошког друштва, допуштена је и могућност да се предају и рукописи који нису саопштени на зборовима СГД. Ово је за последицу имало и обавезну рецензију рукописа, јер су приликом саопштења на зборовима саопштени резултати били изложени критикама, сугестијама или полемици. Управа се заложила да часопис буде препознат и код ресорног министарства тако да је уведено неколико и новима, од свеске Записника СГД за 2012. годину оформљен и међународни уређивачки одбор часописа. Вишегодишњи труд и рад чланова СГД око побољшавања часописа је напослетку уродио плодом и 2019. године Записници СГД су напослетку уврштени у листу реферисаних часописа из области геонаука од стране ресорног министарства. "Са великим задовољством вас обавештавамо, да је након вишегодишњег залагања и труда претходне и садашње Управе, часопис „Записници српског геолошког друштва“ рангиран у оквиру М-51 категорије за 2020. године (врхунски часопис националног значаја) на основу Правилника о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. Гласник РС“, бр. 24/2016 и 21/2017).

Међутим, Записници СГД се даље суочавају са slabим приливом рукописа и нису довољно видљиви у медијима модерних комуникација.

## **ПОТРЕБЕ ЗА МОДЕРНИЗАЦИЈОМ И ОРГАНИЗАЦИЈОМ ЧАСОПИСА – ИЗАЗОВИ ВРЕМЕНА**

У последњих десет година Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду остао је једина научно-истраживачка организација у Србији. На овај начин знатно се смањио број истраживача што је заједно са малим бројем научних пројеката основних геолошких истраживања довело да релативно мале продукције научних резултата у домаћим часописима.

Часопис Записници СГД уз Геолошке анале Балканскога полуострва представља традицију научног издаваштва у Србији. Ова два часописа који заједно са Билтенем Природњачког музеја у Београду представљају данашње геолошке часописе Србије. Од поменута три часописа једино су Записници СГД остали као часопис који објављује радове у целости (и на) српском језику, али потребно је да се јасније профилише и боље организује. Тако Записници СГД остају једини часопис који развија научну терминологију на српском језику.

Предложене активности за организацију боље профилисање, организацију и видљивост часописа:

Уређивање часописа је од оснивања задатак Управе СГД и по правилу га је уређивао секретар или председник СГД. Међутим, Управа СГД која се бира 2+2 годишњи мандатни период не успева увек да се најбоље снађе и посвети управљању научним часописом. Можда би адекватније решење било да се формира независни Уређивачки одбор од стране СГД који би био искључиво фокусиран на рад часописа. Уређивачки посао би требало да се координише од стране главног уредника који би био у обавези да има члана уређивачког одбора за сваку област за коју се укаже потреба. Страни чланови би представљали Међународни саветодавни одбор (*International Advisory Board*).

Назив часописа би требао да остане Записници Српског геолошког друштва / *Comptes Rendus des scéances de la Société Serbe de géologie* који би био обавезујући садржај на корицама часописа, скраћени наслов часописа би био униформни на свим језицима: Записници СГД (*Zapishnici SGD*). Уместо означавања за које годиште се односи свеска Записника СГД боље би било да буду редни бројеви свеске часописа. Овим би се избегла стална конфузија неких аутора при цитирању и читалаца везано за свеску часописа и годину издања. Самим тим уредништво не би морало да чека неки рукопис из дате године да се преда како би комплетирали чланке за дату свеску часописа. Бројеви часописа су били дати за првих седам свески Записника СГД (на насловној станици римским бројевима). Бројеви за све свеске Записника СГД су урађени ретроактивно за све бројеве часописа и представљени у Табели 1.

Табела 1. Преглед одштаманих бројева часописа Записници Српског геолошког друштва

Записници СГД за	Година издања	Број свеске	Напомена
1897-1900.	1900	1.	
1901-1902.	1902	2.	
1903-1905.	1905	3.	
1906.	1908	4.	
1907.	1909	5.	
1908.	1912	6.	
1909.	1913	7.	
1910.	1915(?)	8.	Штампано у Нишу, изгубљено за време рата
1920-1922.	1923	9.	
1923	1925	10.	
1924-1930	1932	11.	Додатак Геолошких анала Балканскога полуострва бр. 11 (1) 1932.
1931-1935	1972	12	Додатак Геолошких анала Балканскога полуострва бр.37, 1972
1935 март-1937	1937	13	Додатак Геолошких анала Балканскога полуострва бр.14, 1937
1937	1938.	14.	
1938	1939.	15.	
1939	1940.	16.	
1940	1941.	17.	
1948	1950.	18.	
1949 (+1910, 1913, 1941)	1953.	19.	
1950-1952	1954.	20.	
1953.	1955.	21.	
1954.	1956.	22.	
1955	1957.	23.	
1956	1957.	24.	
1957	1959	25.	
1958-1959	1962	26.	
1960-1961	1963	27.	
1962	1966	28.	
1963	1966	29.	
1964-1967	1969	30.	Са симпозијума о вулканогено-сидиментним творевинама (1964). Јубиларна свеска 75. година СГД
1968-1970	1972	31.	

Записници СГД за	Година издања	Број свеске	Напомена
1971	1972	32.	
1972	1973	33.	
1973	1974	34.	
1974	1977	35.	
1975-1976	1977	36.	
1977	1978	37.	
1978	1979	38.	
1980	1981	39.	
1981	1982	40.	
1982	1983	41.	
1983	1984	42.	
1984	1985	43.	
1985-1986	1988	44.	
1987-1989	1991	45.	
1990-1991	1995	46.	
1992-1997	1998	47.	
1998-2003	2005	48.	
2004-2005	2006	49.	
2006	2007	50.	
2007	2008	51.	
2008	2011	52.	
2009-2010	2012	53.	
2011	2013	54.	
2012	2014	55.	
2013	2014	56.	
2014	2015	57.	
2015	2015	58.	
2016	2016	59.	Јубиларна свеска
2017	2017	60.	
2018	2019	61.	
2019	2020	62.	
2020	2021	63.	
2021	2022	64.	

Платформа за часопис би требала да буде слична као што је за Геолошке анале Балканскога полуострва (<http://gabp.rgf.bg.ac.rs/index.php/gabp>). Овако би било могућа видети објављене бројеве, стање предатог рукописа и *online first* опцију. Самим тим и број штампаних примерака би требало свести на минимум (обавезни примерци за репозиторијуме, библиотеке и ауторски примерци).

Праксу обавезног рецензирања рукописа би требало наставити.

Упутство ауторима за припрему рукописа би требало поједноставити и урадити мустре (*template*) стране како би сам аутор радио прелом. Због специфичности српског језика (два писма) требало би урадити у три верзије (текст чланка 1. чланак српски -ћирилично писмо са насловом и апстрактом и на енглеском; 2. чланак српски -латинично писмо са насловом и апстрактом и на енглеском; 3. чланак енглески (наслов и апстракт и на српском).

Као неопходан захтев треба ставити и то да литература мора бити на латиничном писму пошто при мерењу и анализама софтвери узимају у обзир само латинично писмо.

Категоризација научних чланака мора да увек да буде у сагласности са важећим Актом о уређивању научних часописа.

Такође неопходно је додељивање DOI броја сваком научном чланку због боље видљивости и начина налажења научних чланака. DOI (*Digital Object identifier*) представља јединствен број додељен објектима у дигиталној форми (чланак, поглавље, књига итд.). Кроз овај број је осигурана веза са интернет страницом где је документ похрањен. Веза са чланцима, DOI бројевима and веб адресама је омогућено кроз сервис CrossRef ([www.crossref.org](http://www.crossref.org)).

## **ЗАКЉУЧАК**

Мало геолошких друштава на свету имају часопис који је старији од једног века. Записници Српског геолошког друштва представљају једну од малобројних оваквих часописа који је 2022. године обележио 125 година излажења. Кроз свој период постојања сам часопис као и Српско геолошко друштво пролазило кроз разне турбуленције и имао проблеме са издавањем одређених бројева. Кроз ретроспективу излажења и анализе излажења појединих годишта предложени су кораци и активности како би се овај часопис осавременио и имао бољу видљивост. Добри примери из праксе који су већ примењени „код старијег брата” (Геолошких анала Балканскога полуострва) требали би да се примене и код овог часописа.

## **Захвалница**

Аутор се захваљује на помоћи проф. др Дејану Радивојевићу, Марини Букавац и Марији Вулетић за помоћ при доступности стручне литературе.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- Luković M.T. (Ed.) (1923) 178. Zbor. Zapisnici SGD 1920-1922. godine. 1-3.  
Rundić, Lj., Grubić, A (Eds.) 2016. 125 godina Srpskog geološkog društva. Srpsko geološko društvo (1891-2016), Beograd.

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les année 2022  
REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022*

Beograd, 2023

**Радивојевић Дејан<sup>1</sup>**  
**Radivojević Dejan**

## СЕЋАЊЕ НА БОРБУ ВАТРЕ И ВОДЕ – ХАТОН И ВЕРНЕР

ИНФОРМАЦИЈЕ, ПРИКАЗИ, КОМЕНТАРИ – NOTES

Ове године навршава се 225 година од смрти зачетника плутонистичке теорије **Џејмса Хатона (James Hutton)**, односно 205 година од смрти аутора нептунистичке теорије **Абрахам Готлоба Вернера (Abraham Gottlob Werner)**. Двојица савременика су имала дијаметрално супротне идеје у вези постанка наше планете, али су обојица оставили неизбрисив траг у историји геолошке науке.

### ЏЕЈМС ХАТОН

**(03.06. 1726, Единбург, Шкотска – 26.03. 1797, Единбург, Шкотска)**

Шкотски геолог, пољопривредник, произвођач хемикалија, природњак и физичар. Током Хатоновог живота већина научне заједнице је сматрала да је живот на Земљи стар само неколико хиљада година. Хатон је на крају довео у питање ово виђење теоријом плутонизма. Често се сматра за оца савремене геологије с' обзиром да је одиграо кључну улогу у успостављању геологије као савремене науке. Међутим, његов пут ка бриљантном геологу није био једноставан.

### Рани дани и фармерски живот

Рођен је у Единбургу као једно од петоро деце Саре Балфор (Sarah Balfour) и Вилијама Хатона (William Hutton) трговца који је био благајник града Единбурга. Нажалост, Џејмс остаје без оца 1729. године када је имао три године.

Хатон је образован у Високој школи у Единбургу где је показао посебно интересовање за математику и хемију, а када је напунио четрнаест година похађао је Универзитет у Единбургу као „студент хуманистичких наука“ студирајући класичне науке. Био је правнички помоћник Џорџ Чалмерса (George Chalmers) када је имао седамнаест, али се више занимао за хемијске експерименте

---

<sup>1</sup> Рударско-геолошки факултет, Каменичка 6, Београд  
dejan.radivojevic@rgf.bg.ac.rs



него за правне послове. Док је похађао Универзитет у Единбургу, Колин Мекларин (Colin Maclaurin) му је био ментор. Мекларин му је пренео знање о Њутновим законима физике и концепту деизма<sup>1</sup>. Ове идеје су постале кључне у Хатоновом каснијем геолошком раду зато што су му омогућиле да замисли свет руковођен искључиво природним законима. У време када је црква имала изузетан друштвени утицај најпрогресивнији аспект Хатонове теорије је био то што је Земља представљена као савршени, самоодрживи систем који диктирају природни закони. Међутим то не значи да он није веровао у Бога. У ствари, Хатон је веровао да је Бог створио све на Земљи толико савршено да природна историја није имала потребе за било каквим натприродним утицајима како би функционисала.

Са осамнаест година постао је асистент физике и похађао предавања медицине на Универзитету у Единбургу. После три године отишао је у Париз да настави студије и постао доктор медицине током 1749. године са својом тезом о циркулацији крви.

Након дипломирања отишао је у Лондон, после чега се средином 1750-тих вратио у Единбург и наставио хемијске експерименте са својим блиским пријатељем Џејмсом Дејвијем (James Davie). Њихов рад на производњи нишадора (амонијум-хлорида) од чађи направио је од њиховог партнерства профитабилни посао, а производња је коришћена за прављење боје, мирисне соли и у металној индустрији (PERMAN, 2022).

Хатон је наследио од свог оца Бервикшир (Berwickshire) фарме у Слајхаусес-у (Slighouses), око 40 км југоисточно од Единбурга. Низијске фарме су биле у породици од 1713. године као и фарма на брду Недер Монинат (Nether Monynut). У 1750-тим он се преселио у Слајхаусес и посветио се унапређивању фарме уводећи праксе узгајања из других делова Британије и експериментисање са биљкама и домаћим животињама. Забележио је своје идеје и иновације у необјављеној расправи о елементима пољопривреде. Експериментисао је са различитим техникама узгоја и претворио своју породичну фарму у најуспешнију у Шкотској. Док је радио на својој фарми постао је опседнут тиме како су ветар, киша и гравитација обликовали земљу на којој је радио (DEAN, 1992).

Хатонов фармерски живот је био прекретница када је од добро обученог научника постао генијални геолог. Касније током 1753. године написао је да је „постао веома заинтересован за студирање наука о Земљи и да гледа са анксиозном радозналошћу сваку јаму, јарак или речно корито које се нађе пред њим“. Математичар Џон Плејфер описао га је као човека који је приметио да је „велики део савремених стена састављен од материјала добијених разарањем тела животиња, биљака и минерала из старијих формација“ (PLAYFAIR, 1802).

Хатон се вратио у Единбург 1768. године и препустио фарму закупцима али је и даље узимао добит од напретка фарме и истраживања које је укључивало експерименте које је изводио у Слајхаусесу. Један од њих је и прављење црвене боје од корена јеле.

---

<sup>1</sup> Деизам је идеја о Богу интелегентном ствараоцу свега након чега није неопходно ништа мењати у идеалном самоодрживом универзуму у којем живимо.

## Хатон и геологија

Након напуштања фармерског живота, Хатон се вратио у Единбург 1768. године где је био „оборен са ногу“ од стране шкотског просветитељства. Оно је у то време било обележено са неколико научних проналазака омогућених од стране водећих шкотских научника. Конкретно, Хатон је почео да ради са Џозефом Блеком (Joseph Black), који је открио угљен-диоксид, на одређивању тога како су настали различити типови стена на Земљиној површини. Током овог времена он је схватио да су температура и притисак неопходни за минерализацију стена. Након тога је одредио да су екстремни притисак и температура који су неопходни за формирање стена могли доћи само из унутрашњости Земље. Ово је представљало основу Хатонове теорије плутонизма која је тврдила да је процес формирања стена вођен температуром која се налази у унутрашњости Земље.

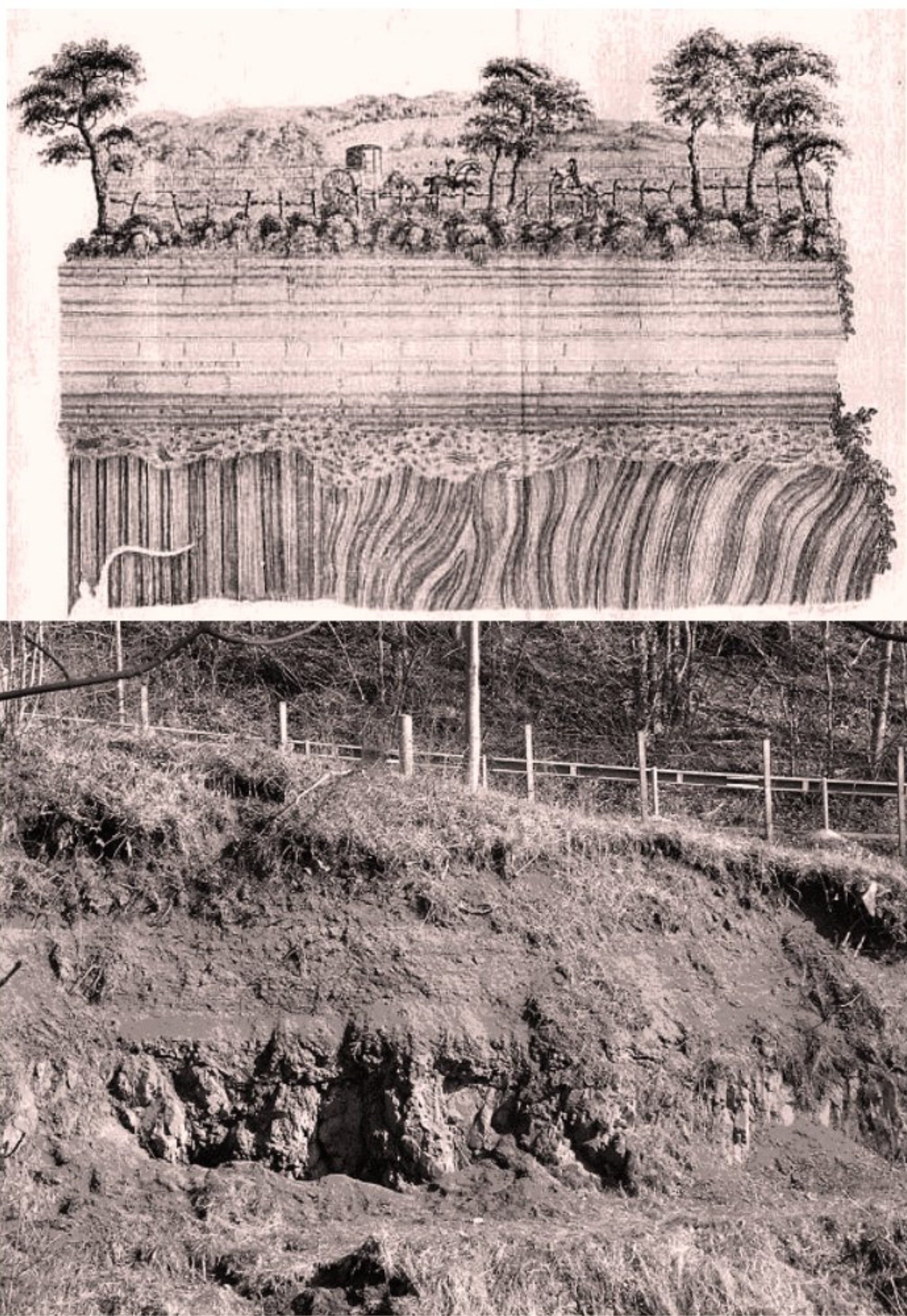
Хатон је унапредио идеју да далеку физичку историју света можемо извести из доказа на данашњим стенама. Преко својих испитивања о облицима у рељефу и обалској линији своје родне Шкотске низије као што су Салсбери Крегс (Salisbury Crags) или Сикар поинт (Siccar Point) он је развио теорију да геолошки облици не могу бити статични већ су подвргнути континуираним променама преко неодређено дугог временског периода. Стога, он се залагао, заједно са многим првим геолозима да Земља не може бити тако млада. Био је један од најранијих заговорника онога што је 1830-тих постало познато као униформизам, наука која објашњава облике Земљине коре као резултат непрестаних природних процеса током дугачке геолошке временске историје. Он је такође „погурао“ тезу „Земља као насељиви систем“ односно то да је она настала као деистички механизам направљен тако да свет буде у потпуности погодан за људе. Ово представља рани покушај да се формулише оно што се данас може назвати једним видом антрополошког принципа (ВАХТЕР, 2003).

Хатонова теорија плутонизма препознала је гранит као интрузивно магматско тело што је било у потпуној супротности са нептунистичком теоријом да су они најстарије оборене стене из прастарих мора. У лето 1785. године на Глен Тилту (Glen Tilt) у најсевернијем делу Шкотске пронашао је граните који пресецају метаморфне шкриљце. С' обзиром да гранит сече слојеве Хатон је знао да они морају бити утиснути у стену и да им је остављено време да очврсну. Како су седименти морали бити присутни пре него што се гранит утиснуо он је схватио да он мора бити млађи од седимената (MCINTYRE, 2006).

Касније 1787. године Хатон је забележио оно што је данас познато као Хатонова или „велика“ дискорданција у Инчбонију (Inchbonny) у слојевима седиментних стена. Слојеви грауваке у доњим слојевима клифа су нагнути готово вертикално, а изнад убаченог слоја конгломерата леже хоризонтални слојеви старих црвених пешчара (слика 1).

Касније је написао како се „обрадовао својој доброј срећи када се саплео на ствар тако занимљиву у природи Земље и коју је толико дуго тражио у венама“. Хатон је резонувао да морају постојати небројени циклуси од којих сваки укључује депоновање морског дна, издизање са искошавањем и ерозијом затим поновно спуштање испод мора за наставак депозиције. Он никада није предложио механизам којим би савремена идеја навлачења могла настати, али је

тачно одредио да унутрашња топлота мора бити водећа сила одговорна за овај феномен. Веровао је да су у питању исте геолошке силе које су владале у прошлости које веома споро функционишу и данас и да дебљина изложених стена указује на невероватно дугачак временски распон.



Слика 1. Хатонска дискорданција у Инчбонију. Горе је илустрација Џона Клерка (из HUTTON, 1788), а доле је фотографија из 2003. године од Кита Монтгомерија. Координате дискорданције су N 55.4721, W 2.5545.

Иако Хатон није био први који је предложио плутонизам, био је научник одговоран за ширење ове теорије у Краљевском друштву у Единбургу и генерално у научној заједници. Хатонове опсервације о интрузији, навлачењу, ерозији и депозицији као и његова теорија плутонизма постала је темељ савремене геологије. Његова теорија плутонизма је била у директној супротности са тада популарнијом теоријом нептунизма коју је успела да претекне тек током 19. века, након Хатонове смрти и довела до формирања нове научне дисциплине – геологије. Чарлс Лајел (Charles Lyell) је на крају синтетизовао теорије

плутонизма и униформизма у свом уџбенику „Principles of Geology“ публиковане 1830. године омогућавајући њен успех у 19. веку.

### **Завршне године**

Од 1791. године имао је велике болове од камења у бешици и напустио је теренски рад како би се фокусирао на завршавање својих књига. Опасна и болна операција није успела да реши његов проблем (PLAYFAIR, J., 1822). Умро је у Единбургу 1797. године и сахрањен у гробници Ендрјуа Балфура (Andrew Balfour) насупрот гробнице његовог пријатеља Џозефа Блека у сада затвореном југозападном делу гробља (Greyfriars Kirkyard, познатом као Covenanter's Prison). Хатон није био ожењен и није имао законске деце. Око 1747. године добио је сина са Мис Едингтон и иако је давао свом сину Џејмсу (James Smeaton Hutton) финансијску помоћ није имао са њим пуно контакта. Дечак је касније постао службеник поште у Лондону.

### **АБРАХАМ ГОТЛОБ ВЕРНЕР**

**(25.09. 1749, Вехрау, Пруска Шлезивија – 30.06. 1817, Дрезден, Краљевина Саксонија)**

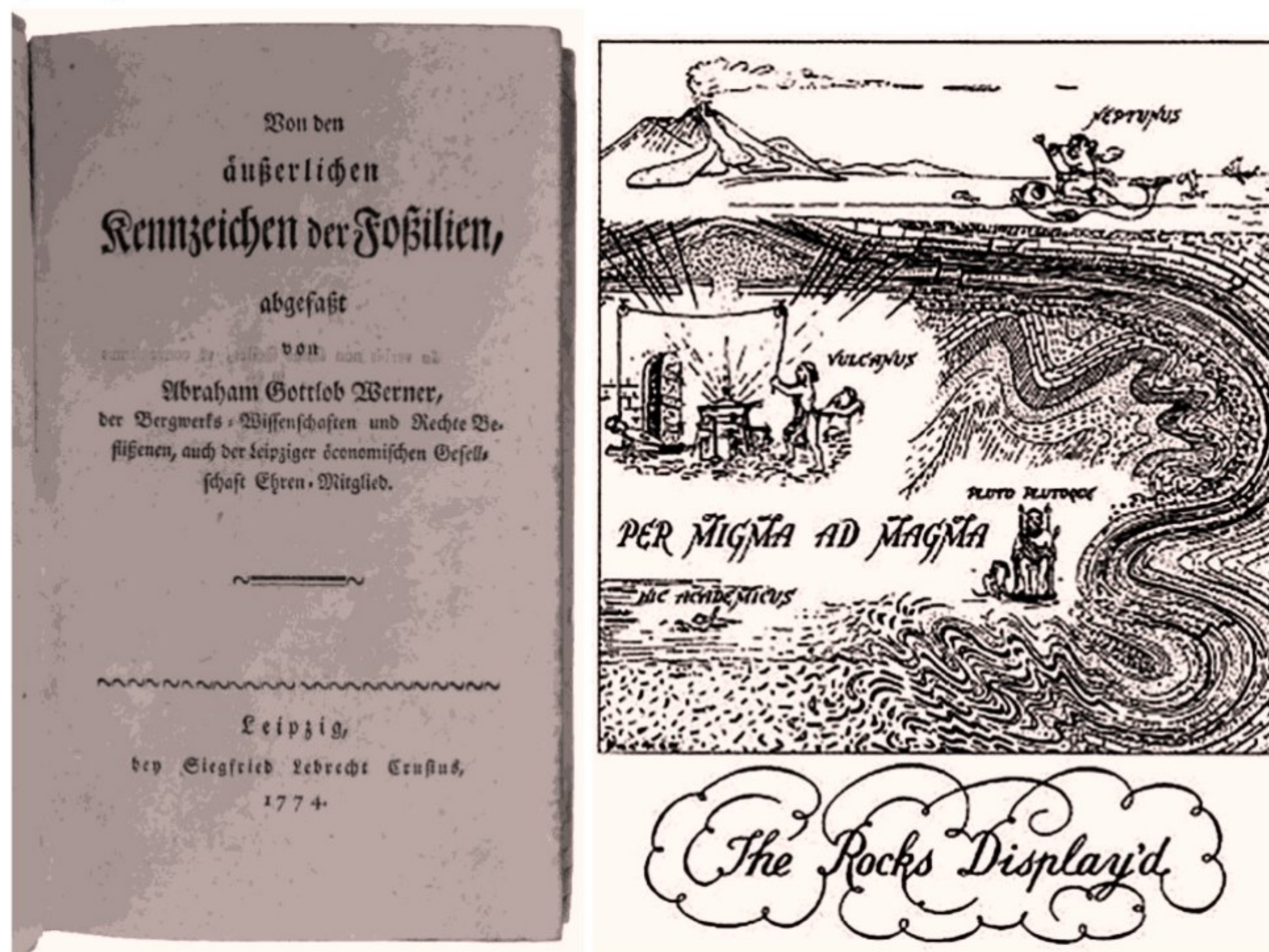
Немачки геолог најпознатији по својој раној теорији стратификације Земљине коре. Он је изложио теорију о Земљиној историји коју су други назвали нептунизам која каже да су све стене воденог порекла. Вернер је одбио идеју униформизма која је веровала да је геолошка еволуција униформни и континуирани процес. Док је већина начела нептунизма на крају напуштена, наука је захвална Вернеру за јасну демонстрацију хронолошке сукцесије стена, за ревност коју је улио у своје студенте и за подстицај који је тиме дао за студирање геологије. Стога је назван „оцем немачке геологије“.

### **Младост и образовање**

Вернер је рођен у Вехрау (Wehrau сада Осиечница (Osiecznica), данашња Пољска) као друго дете и једини син. Рођен је у рударској породици и од раног детињства је био окружен стенама. Његов отац Абрахам Давид Вернер (Abraham David Werner) је био инспектор радова у рудницама гвожђа компаније Duke of Solm's у Вехрау и Лорзендоф (Lorzendorf, данашње Восковице Мале (Woskowitz Małe), Пољска). Већ са девет година Вернер је стекао прва искуства у експлоатацији руде гвожђа и имао прве лекције о минералогии од свог оца и тако се заинтересовао за систематску идентификацију и класификацију минерала. Као младић, Вернер је балансирао између образовања у Фрајбушкој рударској школи, Универзитету у Лајпцигу и рада у рударској оперативи у Саксонији.

Постојало је велико разилажење међу минералозима 18-ог века о томе да ли минерали треба да буду класификовани по свом спољашњем изгледу (природни метод) или по свом хемијском саставу (хемијски метод). Вернер је направио је нову класификацију минерала и током 1774. године објавио је први

модерни уџбеник (слика 2) о дескриптивној минералогии под називом „*Von den äusserlichen Kennzeichen der Fossilien*“ у којој је описао минерале на основу њихових дијагностичких физичких карактеристика. Књига је постигла одличан успех зато што је помогла геолозима да одреде стене на терену. Такође, она је допринела његовој слави зато што је у њој препознато да класификациона шема минерала не може бити направљена искључиво на основу физичких карактеристика.



Слика 2. Насловна страна чувене Вернерове књиге „*Von den äusserlichen Kennzeichen der Fossilien*“ (лево). Насловна страна "The Granite Controversy" од Н. Н. Read (1957), цртеж од D. A. Walton.

Годину дана након објављивања књиге Вернер је напустио Фрајбуршку рударску школу, а да није дипломирао. Међутим, ово није задржало Вернера ван његовог Универзитета. Одбор Фрајбуршке рударске школе понудио је Вернеру позицију наставника рударства и кустоса Универзитетске колекције минерала. Понуда је проширена након успеха његове књиге као и након његовог изузетног рада са студентима. Он је ову понуду прихватио и остао је наставник на Универзитету све до краја живота. Током својих четрдесет година предавања школа је порасла од локалне академије у светски признати научни центар. Вернер је био бриљантан предавач и и невероватно харизматична особа чији интелект је привлачио студенте који су инспирисани њиме постајали водећи геолози Европе. Он и Лине (Linnaeus) су били два најпопуларнија наставника у целој Европи током 18-ог века, тако да је јасно да је био мајстор педагогије и стварно је знао своје минерале споља и изнутра. Током своје каријере открио је осам минерала и назвао двадесет и шест. Вернер је на крају усвојио током 1817. године мешане

критеријуме и поделио минерале на четири главне класе – земљане, слане, запаљиве и металичне.

## **Временска подела стена**

Током 18. века стене су објашњаване у смислу библијског потопа и класификоване у три групе на основу онога што је већина људи повезивала са библијским потопом: „примарни“ од старих стена без фосила (за које се верује да су биле пре потопа), „секундарни“ од стена које садрже фосиле (често повезане са самим потопом) и „терцијарни“ од седимената за које се верује да су настали након потопа. Вернер није променио уобичајено веровање о библијском потопу, али је препознао различите групе стена које се нису уклапале у ову класификацију. Стене са нешто фосила који су млађи од примарне стене, али старији од секундарне назвао је „прелазним“.

## **Вернерова геогнозија**

Посебна одлика Вернеровог учења је брига коју је водио приликом предавања о стенама и минералима и редоследу геолошких формација - предмет који је назвао геогнозија<sup>1</sup>. Под утицајем Јохана Готлоба Лемана (Johann Gottlob Lehmann) и Георга Кристиана Фихсела (Georg Christian Fuchsel), Вернер је демонстрирао да су стене на Земљи депоноване по одређеном редоследу. Иако никада није путовао, он је претпоставио да су секвенце стене које је посматрао у Саксонији исте као и у остатку света.

Веровао је да је Земља некада била у потпуности прекривена океаном и да су се током времена сви минерали оборили из воде и формирали јасне слојеве – теорија позната као нептунизам. Обзиром да ова теорија није дозвољавала истопљено језгро он је сугерисао да су вулкани недавни феномени настали спонтаним сагоревањем потповршинских слојева угља. Он је тврдио да су базалти и сличне стене акумулације древних океана док су их други геолози препознали као магматске минерале (стене). Ово је био првенствени разлог неслагања од које је касније настала једна од највећих геолошких контроверзи (слика 2).

## **Нептунистичка теорија**

Вернер је био блиско упознат са секвенцом слојева стена у источној Немачкој где се питао зашто се формације стена налазе у одређеним специфичним секвенцама и како би ово објаснио 1780-тих година је предложио да су све формације стена депоноване из воде у време када је Земља била покривена првобитним океаном. Вернер је теоретисао да је у једно време Земља у потпуности била покривена океанима и да, како су седименти и хемикалије у води падале на океанско дно, формирали су слојеве стена који ће на крају постати

---

<sup>1</sup> наука о склопу и грађи Земље као васионског тела које се састоји из анорганских маса, нарочито о саставу и грађи чврсте Земљине коре; геогностика.

копно. Током времена, вода из океана је испарила откривајући копно и остављајући водене „цепове“ у ниским подручјима. Како је вода лагано тонула и хемија океана се мењала тако да су се различити типови стена депоновали на површини по одређеном редоследу. По његовом мишљењу гранит се први појавио, следили су га високометаморфисани шкриљци, гнајс, базалт, кречњаци, слабометаморфисани шкриљци, пешчари и на крају земљиште и шљунак. Ова хипотеза постала је позната као нептунизам зато што је подразумевала да су све стене које постоје на површини Земље једном оборене у огромном океану који је покривао целу планету.

Током четрдесет година рада на Фрајбуршкој рударској школи он је промовисао теорију нептунизма на формирање стена. Вернерова наставничка репутација је привукла многе студенте у Фрајбург и дозволила да се нептунизам лако прошири у научним круговима. Обзиром да је Вернер остао на својој позицији у школи цео свој живот никада није много путовао. Тако се његова теорија нептунизма развила на основу одређене групе стена. Стене које је он посматрао су биле добро услојене и потврђивале су његову теорију формирања стена. Нептунизам је наравно имао своју привлачност са Вернеровим ученицима који су је ширили по целој Европи. Предност ове теорије је што је била теолошки прихватљива, једноставна и показала је како Земља може бити формирана у кратком временском периоду.

Многи геолози су сугерисали да су базалт и гранит магматске стене настале од растопљених стена, али Вернер који никада није видео активни вулкански регион је одбијао ову идеју. Једини базалт за који је знао у близини Столпена (Stolpen) је нађен у слојевима у „сендвичу“ између кречњака и било је логичније закључити да је базалт оборен из воде баш као и кречњак. Да је живео у Шкотској или Италији вероватно би извео потпуно другачије закључке о пореклу кристаластих стена као што је базалт.

Током касног осамнаестог века постојала је велика дебата у научној заједници о томе да ли су у праву нептунисти или плутонисти. Иако су неке од Хатонових идеја касније модификоване, научници су почетком деветнаестог века били у могућности да докажу да је његова теорија тачнија, а Вернерова нептунистичка је дискредитована (2). Једна од критика ове хипотезе је и та да Вернер није довољно путовао како би је доказао. Ово је довело до напуштања нептунизма, али тек након Вернерове смрти 1817. године.

## Признања

Вернер је написао само 26 научних радова од којих су то већином само кратка саопштења у часописима. Његов отпор према писању је растао толико да је на крају усвојио навику да чува своју пошту неотворену (LAYELL, 1830). Иако је изабран за страног члана Француске академије наука 1812. године о томе је сазнао много касније када је о томе случајно прочитао у часопису. Упркос неуспеху да направи опширни геолошки рад, Вернерове теорије су верно усвојене и често презентоване широм Европе од стране његових оданих студената. Иако су многи од њих касније напустили нептунистичку теорију нису се јавно одрекли ње све док је Вернер био жив.

Током живота Вернер је стекао бројна признања. У децембру 1799. године је постављен за планинског саветника. Током 1807. године је постао почасни члан Краљевског друштва у Единбургу, а 1808. године постаје страни члан Баварске Академије Наука. Током 1804. године постао је дописни, а 1812. године страни члан француске академије наука *Académie des sciences*. У 1816. години је награђен витешким крстом Саксонског реда за допринос и лојалност.

### **Завршне године**

Вернер се целог живота мучио са slabим здрављем и мирно је живео у непосредној близини Фрајбурга. Умро је као нежења у Дрездену 1817. године од унутрашњих компликација за које се сматра да су настале запањеношћу несрећом која је погодила Саксонију током Наполеонових ратова.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- BAXTER, S., 2003. *Ages in Chaos: James Hutton and the Discovery of Deep Time*. Forge Books, 256 pp.
- DEAN, D. R., 1992. *James Hutton and the history of geology*. Cornell University Press, 303 pp.
- HUTTON, J. 1788. *The theory of the Earth*, Royal Society of Edinburgh, 209-304.
- LAYELL, C. 1830. *Principles of Geology*, Penguin Classics, 528 pp.
- MCINTYRE, D. 2006. *James Hutton: The Founder of Modern Geology*, National Museum of Scotland, 51 pp.
- PLAYFAIR, J. 1802. *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth*. Cambridge Library Collection. Edinburgh, 554 pp.
- PLAYFAIR, J., 1822. *Biographical Account of the late James Hutton, M.D. The Works of John Playfair*, Royal Society of Edinburgh, 39-99.
- PERMAN, R. 2022. *James Hutton: The Genius of Time*, Birlinn, 304 pp.
- READ, H.H. 1957. *The Granite Controversy*. Thomas Murby, 430 pp.
- WERNER, A. G., 1774. *Von den äusserlichen Kennzeichen der Fossilien*, Crusius, 304 pp.



# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les année 2022  
REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022*

Beograd, 2023

## ЗАПИСНИК СА ГОДИШЊЕ СКУПШТИНЕ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА

Прилози – ANNEXES

Редовна годишња Скупштина СГД одржана је у среду 29.03.2023. године са почетком у 15:00 часова. Рад Скупштине је почео након 15 минута одлагања, након гласања акламацијом, због присуства недовољног броја активних чланова СГД (мање од 50%), чиме је задовољен критеријум пуноважног доношења одлука.

Скупштини је присуствовало 38 чланова.

За рад скупштине предложен је и једногласно усвојен следећи дневни ред према коме су донесене следеће одлуке и закључци:

### Дневни ред

1. Отварање Скупштине и усвајање пословника о раду;
2. Избор радног председништва;
3. Извештај о раду управе током 2022. године;
4. 18 Конгрес геолога;
5. Финансијски извештај за 2022. годину;
6. Извештај Надзорног одбора;
7. Извештај суда части
8. Дискусија о свим извештајима и њихово усвајање;
9. Избор управе друштва;
10. Додела признања;
11. Предлог новог НК КБГА за период 2023-2027;
12. Предлог плана рада за наредни период;
13. Одлука о висини чланарине;
14. Текућа питања.

## **1. ОТВАРАЊЕ СКУПШТИНЕ И УСВАЈАЊЕ ПОСЛОВНИКА О РАДУ**

Годишњу скупштину отворио је председник СГД Владимир Симић и упознао присутне чланове са предлогом пословника о раду:

- Рад Скупштине ће се одвијати према усвојеном дневном реду;
  - Иако је одржавање Скупштине уживо, предлаже се да се гласања спроводе акламацијом;
  - Дискусије ће се одвијати по редоследу пријаве уз ограничено време.
- Скупштина је једногласно прихватила предложени пословник.

## **2. ИЗБОР РАДНОГ ПРЕДСЕДНИШТВА;**

Према једногласно усвојеном предлогу, Скупштина је изабрала радно председништво у саставу: Слободанка Лазарев, Владимир Живановић и Владимир Симић; записничар: Марија Петровић; оверивачи записника: Невенка Ђерић и Марија Вулетић.

Скупштина се сагласила са предлогом радног председништва и даљи рад Скупштине одвијао се у складу са овим закључком.

## **3. ИЗВЕШТАЈ О РАДУ УПРАВЕ ТОКОМ 2022. ГОДИНЕ;**

Извештај о активностима у периоду између два заседања скупштине поднео је Владимир Симић, председник СГД.

### **Рад управе друштва**

У протеклом периоду, чланови Управе заседали су више пута због организације 18 Конгреса геолога Србија, а редовна јесења седница управе СГД одржана је 25.10.2022, а записник се налази на сајту Друштва. Све седнице одржане су уживо. Седницама је присуствовала већина чланова Управе тако да су све донете одлуке пуноважне.

### **Чланство**

Подаци о чланству су редовно ажурирани а примећено је да су чланарине знатно више уплаћиване током 2022. године због појачане активности управе друштва. Евиденција уплата је и даље на ниском нивоу. Пријем нових чланова се одвијао по аутоматизму након уплате чланарине и они су евидентирани на списку чланова СГД. Током 2022 имали смо плаћених 165 чланарина, од чега 34 студентске и 5 пензионерских чланарина, у укупном износу од 146.500,00 РСД. Током исте године имали смо 19 нових чланова из редова студената.

## **Зборови друштва**

У 2022. години одржан је Збор друштва 21. децембра.

## **ИЗДАВАЧКА ДЕЛАТНОСТ**

У првој половини 2022. године, објављена је нова свеска Записника СГД у којој се налазе радови из 2021. године. Свеска је одштампана у досадашњем формату али је и доступна на интернет страници Друштва.

Након посебног залагања претходне и садашње Управе друштва, Записници Српског геолошког друштва су испунили услове за сврставање у категорију М51 – врхунски часопис националног значаја, а исту категорију су задржали и током 2022.

## **Промотивне и остале активности**

У претходном периоду, сајт Друштва је редовно ажуриран актуелностима и вестима значајним за Друштво. Најављене активности и догађаји су одржани према плану.

Друштво је током 2022. године углавном пружало подршку различитим институцијама и појединцима и то:

- Српски тим међународног пројекта под називом "Mineral deposits safeguarding as a basis of Europe's mineral raw materials safety - SafeMin4Europe" финансиран од стране Пољске националне агенције за академску размену огласио је међународну конференцију Mineral deposits safeguarding as a basis of mineral raw materials safety која је одржана 10-11 маја 2022, у Кракову, Пољска;
- Обавештење Комисије за карст СГД о активностима које су се одвијале 2022 године;
- Завршен је постер под називом ГЕО-НАУКЕ ЗА БУДУЋНОСТ (Geoscience for the Future), преведен на српски језик и слободан је за дистрибуцију свима.
- Наше друштво добило је Захвалницу Републичког завода за геолошка истраживања Републике Српске поводом 30 година постојања и успешног рада.
- Секција за Економску геологију и рудна лежишта организовала је предавање под насловом: КАРАКТЕРИСТИКЕ ГЕОЛОШКОГ СОФТВЕРА GDM (Geological Data Management), које је одржао наш члан Бранислав Пашајлић 06. септембра 2023.
- Секција за нафтну геологију и геофизику Српског геолошког друштва организовала је предавања под насловом: "3D IP and TDEM, with Canadian case studies" и "Borehole Gravity for Carbon capture and storage underground and Carbon Mineralization" која је одржао Kris Nind (Chris Nind, Abitibi Geophysics) 22.09.2022.

- Трећу годину за редом ENGIE пројекат и Српско геолошко друштво учествовали су на традиционалној манифестацији НОЋ ИСТРАЖИВАЧА За разлику од претходне две године, наш геолошки штанд налазио се на платоу испред Природно-математичког факултета;
- Српски симпозијум о хидрогеологији са међународним учешћем одржан је од 28.09. до 02. 10.2022. године на Златибору поводом обележавања јубилеја 125 година Хидрогеологије у Србији. Том приликом Српском геолошком друштву уручена је повеља за допринос развоју Хидрогеологије у Србији.
- У организацији Секције за минералологију, петрологију, геохемију и седиментологију Српског геолошког друштва, 25. 10. 2022. год., Марина Лазаров, Research fellow at Leibniz Universität Hannover, Germany, одржала је предавање са темом „USE OF TRACE ELEMENT AND STABLE METAL ISOTOPES FOR DETERMINATION OF ORE-FORMING PROCESSES“;
- У организацији Секције за минералологију, петрологију, геохемију и седиментологију Српског геолошког друштва одржан је Симпозијум под називом: Путовање кроз време - Реконструкција затварања Тетиса на Балкану - Travel in Time-Reconstruction of the Tethys' waning in the Balkans, у оквиру пројекта „Rekonstrukcija zatvaranja Tetisa na Balkanu- RECON TETHYS“ Фонда за науку РС „Идеје“, 4. новембра 2022.
- Члан нашег друштва Душан Симић, директор компаније Јантар група, као и председник Српског геолошког друштва Владимир Симић дали су интервју за дневни лист Политика под називом „Треба нам широк дијалог о рударству и геолошким истраживањима“.
- У организацији секције за нафтну геологију и геофизику др Магдалена Марковић Јухлин (Uppsala University) одржала је предавање под називом: Рефлективна сеизмометрија за истраживање металних минералних сировина: 2Д, 3Д и технике машинског учења, у четвртак 24.11.2022.

Међународна активност Друштва је напредовала, међународни пројекти се успешно реализују, а планиране међународне конференције су отказане и пролонгиране за наредни период. Најављени PERC семинар који је требало да се одржи у организацији Друштва, одложен је за мај 2023.

Дугогодишња чланица СГД и делегат у ЕФГ Ирис Вуковић Катрал је изабрана за потпредседника ЕФГ у наредном мандату.

#### **4. 18 КОНГРЕС ГЕОЛОГА;**

У периоду од 1-4 јуна 2022. године одржан је 18 конгрес геолога Србије са међународним учешћем, у заједничкој организацији нашег друштва и Универзитета у Београду – Рударско-геолошког факултета. Скупу је присуствовало 158 учесника из земље и 54 из иностранства, од тога 126 учесника

са радом из из земље и 48 из иностранства. Укупно је било 94 оралне презентације резултата и 53 постер презентација. Пленарна предавања и предавања по позиву биће одштампана у овогодишњој свесци Записника СГД.

## 5. ФИНАНСИЈСКИ ИЗВЕШТАЈ ЗА 2022. ГОДИНУ;

Финансијски извештај је реферисао Владимир Симић.

Стање на рачунима Друштва за период од 01.01.2022. до 31.12.2022. године:

<b>Динарски рачун</b>	
Стање на рачуну 01.01.2022.	309.689,14 РСД
Стање на рачуну 31.12.2022.	930.892,55 РСД
Разлика	621.203,41 РСД
<b>Девизни рачун</b>	
Стање на рачуну 01.01.2022.	37.543,29 ЕУР
Стање на рачуну 31.12.2022.	44.364,09 ЕУР
Разлика	6.820,80 ЕУР
<b>Средства у Управи за Трезор Министарства финансија</b>	
Стање на рачуну 01.01.2022.	103.420,00 РСД
Стање на рачуну 31.12.2022.	3.379,00 РСД
Разлика	100.041,00 РСД

## Приходи друштва

У претходном периоду, Друштво је имало следеће приходе:

<b>Динарски рачун</b>	
Чланарина	199.750,00 РСД
Котизације за 18 Конгрес	1.420.579,00 РСД
Спонзорства 18 Конгрес	190.000,00 РСД
Оглашавање конференције Пољска	45.000,00 РСД
<b>Укупан износ прихода</b>	<b>1.855.329,00 РСД</b>
Пренос средстава са девизног рачуна	1.120.598,20 РСД
Пренос средства из Трезора	350.000,00 РСД
<b>Укупан износ прихода са пренесеним средствима</b>	<b>3.325.927,20 РСД</b>
<b>Девизни рачун</b>	
Пројекат ENGIE	3.560,00 EUR
Пројекат INFACST	730,50 EUR
Пројекат ROBOMINERS	877,50 EUR
Пројекат Crowdthermal	3.486,00 EUR
Пројекат CRM	3.029,80 EUR
Приходи од котизација и екскурзије 18 Конгреса	5,951,00 EUR

<b>Укупан девизни приход</b>	<b>17.634,80 EUR</b>
<b>Средства у Управи за Трезор Министарства финансија</b>	
Спонзорство 18 Конгрес	250.000,00 РСД
<b>Укупна рефундација</b>	<b>250.000,00 РСД</b>

## Расходи друштва

У претходном периоду, Друштво је имало следеће динарске и девизне расходе:

<b>Динарски рачун</b>	
Одржавање сајта СГД и чување података (Контера)	7.800,00 РСД
Одражавање рачуна и остали трошкови банке	15.492,97 РСД
Финансијски извештај АПР	550,00 РСД
Читач личне карте	1.450,00 РСД
Књиговодствене услуге (агенција Матрица)	11.761,77 РСД
Пројекат ENGIE	218.104,00 РСД
КБГА	35.196,00 РСД
Хонорари за пројекте	1.224.358,52 РСД
Трошкови 18 Конгреса и штампања записника	1.190.010,53 РСД
<b>Укупни динарски расходи Друштва</b>	<b>2.704.723,79 РСД</b>
<b>Девизни рачун</b>	
Чланарина EFG	617,00 EUR
Чланарина IUGS	597,00 EUR
Откуп девиза	9.600,00 EUR
<b>Укупан девизни расходи Друштва</b>	<b>10.814,00 EUR</b>

Ауторски хонорари за пројекте су исплаћивани у динарима али углавном на основу трансфера средстава са тих пројеката, с обзиром да су приходи Друштва по питању чланарина веома ниски!

## Финансијски извештај са 18 Конгреса

	EUR	Укупно
Котизација домаћи, RSD		1,495,917.00
Котизација страни, EUR	5,261.00	615,537.00
Спонзорства		
Јелен до		100,000.00
Рударски институт Београд		30,000.00
Министарство		250,000.00
Geoing group		30,000.00
GeoProtect		30,000.00
Ибис Инжењеринг доо	250.00	29,250.00

<b>Приход</b>		<b>2,580,704.00</b>
Штампа програма и постера		31,112.00
Држач за оловке од камена		10,000.00
Плочице од камена		75,000.00
Конгресни материјали		178,873.77
Трошкови штампе конгресних материјала		39,240.00
Трошкови ИСБН броја за књигу апстраката		1,300.00
Израда обрасца за пријаве		33,750.00
ИТ услуге		23,600.00
Теренски трошкови организације		78,323.81
Израда банера		4,250.00
Набавка презентера		4,700.00
Свечана вечера		363,000.00
Музика		40,000.00
Трошкови смештаја СГД		154,320.00
Трошкови кафе пауза		61,170.00
Штампа теренског водича, 40 примерака		17,200.00
Изнајмљивање аутобуса		45,000.00
Музеј камена		56,640.00
<b>Укупно трошак</b>		<b>1,217,479.58</b>
<b>Чист приход</b>		<b>1,363,224.42</b>

Желимо и овом приликом да се захвалимо свим спонзорима, како онима који су уплатили одређена средства, тако и онима који су донирали своје производе:

Министарство просвете, науке и технолошког развоја

Јелен до d.o.o., Carmeuse group

Рударски институт Београд

Ибис Инжењеринг доо Бања Лука

Geoing group

GeoProtect

Вода Вода

Књаз Милош

СИМЕКС Вучија ракија

Нарочито желимо да се захвалимо УТД „НАРЦИС“ Дивчибаре на изузетној организацији и гостопримству током одржавања 18 Конгреса геолога Србије.

Захваљујемо се и Универзитету у Београду – Рударско-геолошком факултету на финансирању дела трошкова Конгреса.

## **6. ИЗВЕШТАЈ НАДЗОРНОГ ОДБОРА**

Владимир Симић је пренео да Надзорни одбор није имао ниједну примедбу на пословно и финансијско пословање СГД у протеклом периоду.

## **7. ИЗВЕШТАЈ СУДА ЧАСТИ;**

Љупко Рундић је известио Скупштину да Суд части СГД, у периоду од последње Скупштине није добио притужби ни по једном основу и да је рад СГД био у свему по статутарним правилима и законима.

## **8. ДИСКУСИЈА О СВИМ ИЗВЕШТАЈИМА И ЊИХОВО УСВАЈАЊЕ;**

Сви извештаји који су предстаљени Скупштини су једногласно усвојени.

## **9. ИЗБОР УПРАВЕ ДРУШТВА;**

Управи СГД није стигао ниједан предлог за промену управе или било ког појединачног члана, па стога садашња управа предлаже да настави са радом још две године.

## **10. ДОДЕЛА ПРИЗНАЊА;**

Реферише Владимир Симић.

Управа СГД је на крају друге године мандата исказала захвалност свим појединцима који су допринели бољем раду Управе и целог Друштва у претходном периоду.

Предлог Управе за доделу повеља и захвалница за 2022. годину је да се повеље доделе вишегодишњим спонзорима геолошких конгреса и то:

1. Рударски Институт д.о.о. Београд
2. Геоинг Гроуп Београд
3. ИБИС ИНЖЕЊЕРИНГ д.о.о. Бања Лука.

Захвалнице за спонзорство 18 Конгреса геолога:

1. Jelen Do d.o.o. Carmeuse group
2. GeoProspect d.o.o. Beograd
3. VODAVODA



4. Књаз Милош
5. СИМЕКС Суботица
6. УТД НАРЦИС Дивчибаре

## **11. ПРЕДЛОГ НОВОГ НК КБГА ЗА ПЕРИОД 2023-2027**

Претходни изборни период од 5 година у Националном Комитету Карпато-балканске геолошке асоцијације је истекао крајем прошле године, а чинили су га Љупко Рундић, Невенка Ђерић, Александар Костић, Александра Маран Стевановић и Весна Ристић. На Изборној скупштини СГД 29. марта 2023. треба да се изабере нови НК КБГА за период 2023-2027. Чланови СГД захваљују се претходном НК на достојном представљању Србије и СГД у Савету КБГА.

На основу Статута СГД и Правилника о раду НК КБГА, одлучено је да се предложи нови Комитет:

1. Александар Пачевски
2. Драгана Ђурић
3. Урош Стојадиновић
4. Зоран Миладиновић
5. Невенка Ђерић – досадашњи члан НК КБГА

Предлог је једногласно прихваћен, а на конститутивној седници НК КБГА треба да се изабере председник НК.

## **12. ПРЕДЛОГ ПЛАНА РАДА ЗА НАРЕДНИ ПЕРИОД;**

Председник Друштва Владимир Симић поновио је жељу да Друштво постане самоодрживо по питању функционисања, што подразумева да може да финансира све своје обавезе осим чланарина у међународним организацијама. Подсетио је да нова Управа мора да оснажи и анимира рад по Секцијама друштва, као и потребу да се посвети пажња млађим и новим члановима Друштва.

Љупко Рундић је подсетио да је следеће године стогодишњица увођења термина „Паратетис” у геологију и предлаже да се одржи скуп посвећен Владимиру Ласкареву. Љупко Рундић преузима улогу координисања уз сву потребну помоћ Управе и осталих чланова Друштва.

Ненад Марић је подсетио на обавезу потписивања споразума о сарадњи са Геолошком асоцијацијом САД и стављања линка ка истој.

## **13. ОДЛУКА О ВИСИНИ ЧЛАНАРИНЕ**

Једногласно је прихваћен предлог Управе да остане исти износ чланарине од 1500 динара за запослене и 750 динара за пензионере и студенте за 2024

годину. За све чланове који су уплатили чланарину унапред неће бити доплаћивања уколико сами чланови то не желе.

## 14. ТЕКУЋА ПИТАЊА.

Управа предлаже Друштву неколико промена везано за Записнике СГД, а иницираних од стране нашег дугогодишњег активног члана Тивадара Гаудењија:

1. Формирање Уређивачког одбора од стране СГД који би био искључиво фокусиран на рад часописа. Уређивачки посао би требало да се координише од стране главног уредника који би био у обавези да има члана уређивачког одбора за сваку област за коју се укаже потреба. Страни чланови би представљали Међународни саветодавни одбор (International Advisory Board). Такође би требало имати и техничког уредника уколико не желимо да услугу припреме за штампу плаћамо.
2. Уместо означавања за које годиште се односи свеска Записника СГД боље би било да буду редни бројеви свеске часописа. Овим би се избегла стална конфузија неких аутора при цитирању и читалаца везано за свеску часописа и годину издања. Према томе свеска која сада треба да иде у штампу била би број 65.

Прихваћен је предлог да се до следеће годишње Скупштине Друштва припреми предлог уређивачког одбора са уредником и техничким уредником. Управа ће радити на томе уз укључивање свих заинтересованих чланова Друштва. Владимир Живановић је предложио увођење ДОИ бројева што би ишло у пакету са избором уређивачког одбора. Такође је прихваћен предлог да се нумеришу свеске Записника СГД

Управа СГД предлаже да мало променимо и допунимо правила за додељивање награде младим колегама и студентима за изузетне радове, и то да остану досадашња ограничења по питању година, али да променимо члан 3 и избацимо да не смеју на раду да буду колеге старије од 35 година нити да су запослени на факултету. Овако дефинисан члан конкурса директно је супротан тежњама за унапређење науке и струке и даје веома негативан пример младима да сами раде уместо да сарађују. Наравно да је на управи и комисијама да се постарају да као и до сада најбољи добију награде.

После обимне дискусије није било консензуса, па је одлучено да се направи комисија која ће размотрити садашњу ситуацију и изаћи са предлогом Управи Друштва, који ће после тога бити дистрибуиран свим члановима.

Ирис Вуковић Катрал је обавестила присутне о одржавању PERC семинара и састанка Савета ЕФГ у Београду у мају 2023. године.

Владимир Симић се захвалио садашњој Управи и целокупном чланству на исказаној подршци у раду Друштва и прихватио је све сугестије које су предложене за будући рад Управе.

Скупштина је завршена у 16:15.

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА ЗА 2022 ГОДИНУ

*COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE  
pour les années 2022*

*REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY  
for the year 2022*

Beograd, 2023

## ГОДИШЊИ КОНКУРС ЗА НАЈБОЉИ РАД МЛАДИХ ГЕОЛОГА И СТУДЕНАТА

### ПРИЛОЗИ – ANNEXES

У циљу подстицања научног рада младих геолога и студената одлуком Управе Српског геолошког друштва од 23. 11. 2012. и изменама одлуке од 05. 09. 2019. одлучено је успостављање сталног конкурса за доделу награде младом геологу или студенту свих нивоа академских студија на геологији (основне, мастер, докторске).

### Опис награде

Награда се додељује на годишњем нивоу и уручује лауреатима на Годишњој скупштини СГД.

Првонаграђени добија надокнаду трошкова за учешће на научном скупу или куповину стручне литературе до износа од 250 € у динарској противвредности, комплет књига и пригодну диплому.

Другонаграђени добија надокнаду трошкова за учешће на научном скупу или куповину стручне литературе до износа од 150 € у динарској противвредности, комплет књига и пригодну диплому.

Трећенаграђени добија надокнаду трошкова за учешће на научном скупу или куповину стручне литературе до износа од 100 € у динарској противвредности, комплет књига и пригодну диплому.

Награде се исплаћују једнократно на основу достављеног предрачуна благајнику Друштва.

### Критеријуми конкурса

1. Право учешћа на конкурсима имају сви чланови Српског геолошког друштва, који до 31. децембра у години у којој конкуришу за награду не напуне више од 30. година.

2. Конкурисати се може са радовима саопштеним у току календарске године на скуповима СГД и са достављеним рукописима према важећем упутству за штампу радова у Записницима СГД.

3. При конкурисању се у обзир узимају само радови кандидата који су једини или први аутор у групи аутора од којих ни један није старији од 35 година и који нису запослени у звању наставника на високошколској установи.

4. Особа која конкурише доставља пријаву Комисији за доделу награде или секретару СГД. Комисија може да у конкурс уврсти и да размотри и све друге радове који одговарају критеријумима конкурса.

5. Кандидати могу само једном да добију награду СГД за најбољи рад.

## **Правила конкурса**

1. Конкурс се у штампаној форми објављује у Записницима СГД а у електронској форми се поставља стално на веб сајту СГД.

2. Конкурс је стално отворен и по аутоматизму се одржава за сваку календарску годину. За промену правила конкурса надлежна је Управа СГД. Услови конкурса се могу мењати на предлог комисије за награде или чланова Управе СГД. Промене ће се примењивати наредне године од године доношења одлуке о промени и објаве на сајту СГД.

3. О додели годишње награде одлучује Управа СГД на првој седници у наредној календарској години, на предлог Комисије за награде која се формира и ради у току мандатног периода Управе.

4. Награда се први пут уручује на годишњој скупштини СГД током 2014 године, за резултате остварене током 2013. године, а након тога, успоставиће се континуитет доделе награде која ће се уручивати на годишњој скупштини СГД за резултате остварене у претходној години.

5. Награда се не додељује уколико критеријуми нису задовољени или нема пристиглих радова на конкурс. У складу са квалитетом пристиглих радова, Комисија има право да предложи доделу награда без обавезе поштовања редоследа. На пр. додела само друге и треће награде.

6. На предлог Комисије или на предлог члана Управе при одлучивању се могу консултовати и експерти за одређене уже стручне области.

7. О додели награде одлучује Управа СГД на предлог Комисије за награду. Одлучује се простом већином гласова присутних чланова на седници на којој се доноси одлука, с тим да постоји кворум за рад према Статуту СГД.

8. Одлука о додели награде се објављује у Записницима СГД, а информација и записник са седнице Управе се стављају на увид на веб сајту СГД.

9. Особе којима је додељена награда обавештава секретар СГД најкасније 7 дана након доношења одлуке.

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

061:55(497.11)

**ЗАПИСНИЦИ Српског геолошког друштва за  
2022 годину** = Comptes rendus des séances de la Société  
Serbe de géologie pour l' année 2022 = Reports of the  
Serbian Geological Society for the year 2022 / главни  
уредник Владимир Симић. - 1891- Београд : Српско  
геолошко друштво, 1892- (Београд : River print). - 24 cm

Годишње. - ISSN 0372-9966 = Записници Српског  
геолошког друштва  
COBISS.SR-ID 70169095