

# Implementacija hidrohemijskih i multivarijantnih statističkih metoda za razumevanje hidrodinamike karsta; Implementation of Hydrochemical and Multivariate Statistical Methods for Studying Karst Hydrodynamics

Marina Ćuk Đurović



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Implementacija hidrohemijskih i multivarijantnih statističkih metoda za razumevanje hidrodinamike karsta; Implementation of Hydrochemical and Multivariate Statistical Methods for Studying Karst Hydrodynamics | Marina Ćuk Đurović | Knjiga apstrakata 10. Simpozijuma o zaštiti karsta, Zlatibor, 14-15. oktobar 2023. ;Abstract volume of the 10th Symposium on karst protection, Zlatibor, October 14-15 2023 | 2023 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008401>

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)

AKADEMSKI SPELEOLOŠKO – ALPINISTIČKI KLUB  
STUDENT SPELEOLOGICAL AND ALPINISTIC CLUB



**KNJIGA APSTRAKATA**

10. SIMPOZIJUM O ZAŠTITI KARSTA

---

10<sup>TH</sup> SYMPOSIUM ON KARST PROTECTION

**ABSTRACT VOLUME**

**Knjiga apstrakata 10. Simpozijuma o zaštiti karsta**  
**Abstract volume of the 10<sup>th</sup> Symposium on karst protection**

IZDAVAČ / PUBLISHED BY

Akademski speleološko – alpinistički klub (ASAK)  
Studentski trg 16, Beograd

UREDNIK / EDITOR

Ana Mladenović

TEHNIČKA PRIPREMA / PRE-PRESS

Ana Mladenović

DIGITALNO IZDANJE

ISBN 978-86-907923-6-8



Akademski speleološko – alpinistički klub (ASAK) iz Beograda deseti, jubilarni put organizuje Simpozijum o zaštiti karsta, 14 – 15. oktobra 2023. godine na Zlatiboru. Simpozijum su podržali Opština Čajetina, Odbor za kras i speleologiju SANU, Društvo geomorfologa Srbije, Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU, Komisija za karst Srpskog geološkog društva i Savez speleoloških organizacija Srbije.

Student Speleological and Alpinistic club (ASAK) from Belgrade organizes the Symposium on karst protection for the 10<sup>th</sup> time, from October 14<sup>th</sup> to 15<sup>th</sup> 2023 on Zlatibor Mts. The Symposium is supported by the Municipality of Čajetina, Board on karst and speleology SASA, Serbian Society of Geomorphologists, Geographical Institute "Jovan Cvijić" SASA, Karst Commission of the Serbian Geological Society and Federation of Speleological Organizations of Serbia (SSOS).

#### **Organizacioni odbor / Organizing Committee:**

**Ana Mladenović** (ASAK i Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**Predrag Stošić** (ASAK)  
**Bojana Đajić** (ASAK)  
**Gojko Paskota** (ASAK)  
**Jelena Čalić** (ASAK i Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU)  
**Mihajlo Mandić** (ASAK)  
**Selena Blagojević** (ASAK)

#### **Naučni odbor / Scientific Committee:**

**dr Ana Mladenović** (ASAK i Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**dr Jelena Čalić** (ASAK i Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU)  
**dr Ivana Budinski** (Institut za biološka istraživanja "Siniša Stanković" Univerziteta u Beogradu)  
**prof. dr Slobodan Marković** (Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Novom Sadu)  
**prof. dr Igor Jemcov** (Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**prof. dr Zoran Stevanović** (Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**prof. dr Aleksandar Petrović** (Geografski fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**dr Dragan Antić** (Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**dr Dragan Nešić** (Zavod za zaštitu prirode Srbije)  
**dr Milovan Milivojević** (Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU)  
**dr Marko Milošević** (Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU)

## SADRŽAJ

<b>1990. – 2023.</b>	
<i>Mihajlo Mandić</i> .....	3
<b>Karstno vrelo Опачица – реткост приобалног карста Боке Которске</b>	
<i>Зоран Никић, Оливера Доклестић, Васо Мрваљевић, Ненад Марић</i> .....	6
<b>Cijanobakterije kao komponenta lampenflore u turističkim pećinama Srbije</b>	
<i>Slađana Popović, Gordana Subakov Simić, Olga Jakovljević, Marija Pečić, Dragana Predojević, Nataša Nikolić</i> .....	12
<b>Implementacija hidrohemijskih i multivarijantnih statističkih metoda za razumevanje hidrodinamike karsta</b>	
<i>Marina Ćuk Đurović</i> .....	15
<b>Opšte odlike karsta planine Zlatar (jugozapadna Srbija)</b>	
<i>Dragan Nešić</i> .....	20
<b>Rastovačka pećina u klisuri Panjice kod Arilja</b>	
<i>Milorad Kličković, Aleksandra Zatezalo</i> .....	25
<b>Izazovi u proučavanju pećinskih stonoga Dinarskog krasa – primer litobiomorfnih stonoga (Chilopoda, Lithobiomorpha)</b>	
<i>Anja Kos, Dalibor Stojanović, Teo Delić, Maja Zagmajster</i> .....	26
<b>Gornja Baračeva špilja – povijest paleontoloških istraživanja</b>	
<i>Hrvoje Cvitanović, Slaven Vuković</i> .....	30
<b>Speleon – Centrar podzemne baštine</b>	
<i>Slaven Vuković, Hrvoje Cvitanović</i> .....	31
<b>Anthroleucosomatidae (Myriapoda, Diplopoda, Chordeumatida) Balkanskog poluostrva: pregled „Bulgarosoma“ kompleksa rodova</b>	
<i>Mirko Šević, Dragan Antić, Slobodan Makarov</i> .....	32
<b>Valisneria spiralis – nova vrsta alohtone biljke u kraškim vodama Bosne i Hercegovine</b>	
<i>Mihajlo Stanković, Marlena Ćukteraš, Marinko Dalmatin</i> .....	37
<b>Geomorfološke posledice poplava 2014. godine u karstu Dževrinske grede (istočna Srbija)</b>	
<i>Jelena Ćalić, Dejan Jeremić, Ana Mladenović</i> .....	41
<b>Hidraulički tranzijenti u karstnoj sredini tokom rada hidroelektrane</b>	
<i>Maja Todorović, Marina Ćuk Đurović, Igor Jemcov</i> .....	45
<b>Novija speleološka istraživanja u Parku prirode Stara planina na teritoriji Opštine Knjaževac</b>	
<i>Mladen Milošević</i> .....	50
<b>Speleološki objekti klisure reke Ribnice: biodiverzitet, značaj, ugroženost</b>	
<i>Mirko Šević, Mihailo Vujić, Vukašin Gojšina, Dragan Antić, Dalibor Z. Stojanović, Slobodan E. Makarov</i> .....	57
<b>Pregled najnovijih speleoloških istraživanja centralnog dela Zlatara</b>	
<i>Nenad Rumenić, Predrag Matović</i> .....	61

## **Implementacija hidrohemijskih i multivarijantnih statističkih metoda za razumevanje hidrodinamike karsta**

### **Implementation of Hydrochemical and Multivariate Statistical Methods for Studying Karst Hydrodynamics**

Marina Ćuk Đurović<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet

#### Summary

Karst aquifers are complex and dynamic hydrogeological systems that exhibit high sensitivity to different sources of recharge, such as short-term storms, recharge through sinkholes, and infiltration through the epikarst or soil of varying thickness. If hydrotechnical structures, such as dams or hydraulic tunnels, are built in karst terrain, the hydrodynamics becomes even more complex.

This paper will illustrate the application of hydrochemical methods combined with multivariate statistical data analysis to address various issues related to karst hydrodynamics in both natural and artificial contexts (tunels and dams). Properly designing the monitoring network, selecting monitoring parameters, and ensuring timely sampling are essential components for collecting high-quality input data. High-frequency sampling is usually conducted during flood events, while seasonal sampling aligns with the hydrological cycle or specific research phenomena. Considering the dynamic nature of sampling, a large number of parameters and the observed objects, data processing guides research toward the application of multivariate statistical analyses, specifically two-way hierarchical cluster analysis (HCA) and factor analysis (FA), including principal component analysis (PCA). The integration of these multivariate statistical methods with classical hydrochemical graphical techniques has facilitated the following outcomes: 1) a closer definition of the hydrogeological characteristics of the karst-fissured aquifer system under different hydropower tunnel operation regimes; 2) additional insights into the groundwater flow directions in the presence of artificial barriers like dams; 3) development of a spatio-temporal conceptual model of the behavior of complex karst systems during flood event, including the delineation of recharge areas and main hydrogeological processes.

#### **1. Uvod**

Karstne izdani su složeni hidrogeološki sistemi osetljivi na različite izvore prihranjivanja kao što su kratkotrajne padavine visokog intenziteta, prihranjivanja preko ponora, infiltracije kroz zemljište i stene (Goldscheider 2015). Ako su u karstnim terenima izgrađeni hidrotehnički objekti, kao što su brane ili tuneli, karstna izdan može imati različit odgovor i istraživanje hidrodinamike karsta postaje još

kompleksnije (Milanović 2000, Jemcov 2019). Karstne izdani su visoko produktivne, ali i podložne kontaminaciji, a mreža pukotina i kanala čini cirkulaciju podzemnih voda složenom (Ford and Williams, 2007). Pored brojnih metoda koje se uobičajeno primenjuju, hidrohemijske i multivarijantne statističke metode su našle značajnu ulogu za razumevanje hidrodinamike karstnih sistema. U radu biće prikazani primeri primene hidrohemijskih metoda sa statističkom analizom na različitim problemima vezanim za hidrodinamiku karstne izdani – u uslovima gde su izgrađeni hidrotehnički objekti, tunel i brana (Ćuk et al. 2020; Jemcov I., Ćuk Đurović M. 2021), i u prirodnim uslovima u toku poplavnog talasa (Ćuk Đurović et al. 2022).

## **2. Pregled primenjivanih metoda**

Kako bi primena hidrohemijskih i multivarijantnih statističkih metoda bila od koristi za dublje razumevanje kompleksnih pitanja kao što je hidrodinamika karsta, ključno je pažljivo planiranje terenskih istraživanja. Pravilno projektovanje osmatračke mreže, izbor parametara za praćenje i pravovremeno uzorkovanje podzemnih voda predstavljaju osnove prikupljanja kvalitetnih ulaznih podataka. Vremenska komponenta u dizajnu istraživanja zavisi od prirode fenomena koji se proučava. Na primer, visoko-frekventna uzorkovanja se sprovode kada se istražuje nailazak poplavnog talasa u karstu, dok se povremena osmatranja primenjuju u slučaju analize hidrološkog ciklusa, gde se uzorci uzimaju sezonski ili u različitim vremenskim intervalima. Što se tiče istraživanja karstnih sistema sa prisustvom veštačkih objekata, frekvencija uzorkovanja će uglavnom zavisiti od ciljeva i problema specifičnih za konkretno istraživanje (Slika 1).

Analiza klasterisanja sa dvosmernim dendrogramom, poznata kao hierarhijska klaster analiza (HCA), predstavlja moćan alat za izdvajanje grupa sa sličnim hidrogeohemijskim karakteristikama, pri čemu jasna vizualizacija parametara koji deluju unutar grupa, omogućava bolje razumevanje prirodnih uslova u ovako izdvojenim klasterima (Li et al. 2019). Analiza glavnih komponenti (PCA) i faktorna analiza (FA) su se pokazale kao adekvatne metode za karakterizaciju prostorne i vremenske distribucije hidrohemijskih podataka i srodnih hidrogeohemijskih procesa. Ovakav pristup je korišćen za objašnjenje hidrodinamičkih i hidrohemijskih ponašanja izvora tokom poplavnih talasa (Mudarra & Andreo, 2011). Tumačenje rezultata HCA, FA i PCA analiza u kontekstu hidrogeoloških istraživanja ima ključnu ulogu u formiranju konceptualnih modela koji omogućavaju dublje razumevanje procesa i relacija u proučavanom hidrogeološkom sistemu.

## **3. Studije slučaja**

U tabeli 1 prikazana su tri primera na kojima je kombinacija multivarijantnih statističkih metoda (HCA, FA i PCA) omogućila: 1) bliže definisanje karaktersitika izdani u karstno-pukotinskom sistemu uz hidrohemijski odgovor podzemne vode pri različitom režimu rada dovodnog tunela pod pritiskom; 2) dodatno razumevanje pravaca cirkulacije podzemnih voda u uslovima izgrađene hidrauličke barijere -

brane; 3) razvoj prostorno-vremenskog konceptualnog modela kompleksnog karstnog sistema tokom poplavnog talasa, uz definisanje zona prihranjivanja i glavnih hidrogeoloških procesa.



**Slika 1.** Dijagram toka implementiranih metoda i postupaka koji su rezultirali formiranjem konceptualnog modela.

Deskriptivna statistička analiza predstavlja prvi korak u procesu selekcije parametara za kasniju primenu multivarijantne statističke analize. U ovoj fazi, posebna pažnja se posvećuje parametrima koji pokazuju visoku varijabilnost ili uopšteno pokazuju značajne promene tokom razmatranog vremenskog perioda, i kao takvi se uključuju u dalje analize

Integrirana primena HCA i PCA/FA omogućila je konstrukciju naprednog multivarijantnog hemograma. Ovaj analitički postupak je prvi put primenjen u binarnoj karstnoj izdani poznatoj po složenoj hidrodinamici i i mešanju sličnih hidrohemijjskih voda (Čuk Đurović et al. 2022). Primena multivarijantnih hemograma u odnosu na tradicionalne hemograme ima ključne prednosti jer omogućava fokusirano analiziranje dominantinih hidrogeoloških faktora u svakoj dinamičkoj fazi pražnjenja karstnih izvora. Ovaj pristup omogućava dublje razumevanje



hidrohemijskih i hidrauličkih karakteristika dominantnih faktora u istraživanom području, uz sposobnost procene vremenskog trajanja procesa koji utiču na dinamiku karstnih izvora.

**Tabela 1.** Primeri hidrogeoloških istraživanja sa primenjenim multivarijantnim statističkim metodama i definisanim konceptualnim modelima

<b>Primer</b>	<b>HCA</b>	<b>FA/PCA</b>	<b>Konceptualni model</b>
Hidrotehnički tunel pod pritiskom u složenoj karst-pukotinskoj izdani (HE Pirot)	-identifikacija grupa podzemnih voda prema litologiji i hidrohemijskim osobinama	-interakcija voda-stena u višeslojnom hidrogeološkom sistemu, rastvaranje evaporita -rastvaranje kalcita i dolomita	-izdvajanje hidrohemijskih zona duž ose tunela -definisanje najznačajnijih hidrohemijskih promena -procena uticaja rada tunela na hidrohemiju podzemnih voda
Injekciona zavesa u karstu, akumulaciono jezero Zaovine (Tara)	-izdvajanje hidrohemijski različitih voda u odnosu na pregradno mesto (branu) i vodu iz akumulacije	-procesi rastvaranja u karstnoj izdani i injekcionoj zavesi -podzmine vode sa dužim periodom boravka u izdani (Sr, Li) -cirkulacija novoinfiltrirane vode kroz nezasićenu zonu (niska EC, povišen Fe, Cl, Na)	-intenzivno ispiranje injekcionog materijala u galeriji pri povišenim kotama gornje vode (KGV), -u periodu niskih KGV duži boravak podzemnih voda u izdani i sporija cirkulacija -pretpostavka pravaca cirkulacije podzemnih voda u skladu sa hidrauličkim metodama
Poplavni talas na izvorima reke Unice (Jugozapadna Slovenija)	-dinamika prihranjivanja karstnih izvora -definisanje preovlađujućih komponenti za dinamičke faze pražnjenja karstnih izvora	-faktori koji kontrolišu promene kvaliteta vode u karstu -izdvajanje glavnih komponenti kao preporuka za dalji monitoring: bakterije, Ca/Mg, EC	-izrada multivarijantnih hemograma -formiranje prostorno-vremenskog konceptualnog modela ponašanja kompleksnog karstnog sistema u toku poplavnog talasa

Multivarijantni hemogrami su korisni alati za analizu i tumačenje složenih hidrogeoloških sistema i pružaju preciznije razumevanje njihove dinamike. Kao konkretan primer, istraživanje je obuhvatilo dobro istraženi karstni sistem u jugozapadnoj Sloveniji, sa relativno homogenim hidrohemijskim sastavom vode.

Ovaj pristup je verifikovan zahvaljujući prethodnom detaljnom poznavanju ključnih komponenti sistema podzemnog toka, kao što su ponori, pećine i izvori, uz duboko razumevanje hidrogeoloških karakteristika istraživanog područja i poznatih veza unutar karstnih kanala.

#### 4. Zaključak

Zajednička saznanja prikazanih hidrogeoloških istraživanja ističu ključnu ulogu kombinovanja hidrohemijskih i multivarijantnih statističkih metoda u analizi karstnih sistema sa važnim doprinosom u razvoju hidrodinamičkih konceptualnih modela. Ovakav multidisciplinarni pristup pruža dragocen uvid u složene hidrogeološke sisteme i njihovu dinamiku. Posebno se ističe važnost prostorne analize hidrohemijskih komponenti koja omogućava karakterizaciju procesa shodno hidrogeološkoj problematici. Analiziranje i interpretacija hidrohemijskih parametara predstavlja ključnu dopunu hidrodinamičkom monitoringu i neophodna je za potpuno razumevanje i efikasno upravljanje karstnim hidrogeološkim sistemima.

#### 5. Spisak literature

1. Ćuk Đurović M, Petrić M, Jemcov I, Mulec J, Mazej Grudnik Z, Mayaud C, Blatnik M, Kogovšek B, Ravbar N. 2022. *Multivariate Statistical Analysis of Hydrochemical and Microbiological Natural Tracers as a Tool for Understanding Karst Hydrodynamics (The Unica Springs, SW Slovenia)*. Water Resources Research. doi: [10.1029/2021WR031831](https://doi.org/10.1029/2021WR031831)
2. Ćuk M., Jemcov I., Mladenović A., Ćokorilo Ilić M. 2020. *Hydrochemical impact of the hydraulic tunnel on groundwater in the complex aquifer system in Pirot, Serbia*. Carbonates Evaporites 35: 31. doi: [10.1007/s13146-020-00563-y](https://doi.org/10.1007/s13146-020-00563-y)
3. Ford D., Williams P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. 576 pp. Wiley: Hoboken, USA, ISBN: 978-0-470-84997-2
4. Goldscheider, N. 2015. *Overview of Methods Applied in Karst Hydrogeology*. Chapter 4, pp. 127-145. in: *Karst Aquifers – Characterization and Engineering, Professional Practice in Earth Sciences* Z. Stevanović (ed.), International Publishing Switzerland doi: [10.1007/978-3-319-12850-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4_4)
5. Jemcov I., Ćuk Đurović M. 2021. *A hydraulic–hydrochemical approach to impact assessment of a grout curtain on karst aquifer behavior*. Hydrogeol J 29: 179–197. doi: [10.1007/s10040-020-02245-4](https://doi.org/10.1007/s10040-020-02245-4)
6. Jemcov, I. 2019. *Impact assessment of grout curtain on the hydraulic behavior in karst, based on time a series analysis*. Environ Earth Sci 78: 415. doi: [10.1007/s12665-019-8412-z](https://doi.org/10.1007/s12665-019-8412-z)
7. Li, P., Tian, R., & Liu, R. 2019. *Solute Geochemistry and multivariate analysis of water quality in the Guohua phosphorite mine, Guizhou province, China*. Exposure and Health, 11(2), 81–94. doi: [10.1007/s12403-018-0277-y](https://doi.org/10.1007/s12403-018-0277-y)
8. Milanović PT. 2000. *Geological engineering in karst*. Monograph. Zebra, Belgrade, 374 pp.
9. Mudarra M., Andreo, B. 2011. *Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain)*. Journal of Hydrology, 397(3–4), 263–280. do: [10.1016/j.jhydrol.2010.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.005)