

Primena hidrodinamičkih i hidrohemijskih metoda straživanja na primeru brane Lazići (RHE Bajina Bašta)

Marina Ćuk Đurović, Igor Jemcov, Maja Todorović,



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Primena hidrodinamičkih i hidrohemijskih metoda straživanja na primeru brane Lazići (RHE Bajina Bašta) | Marina Ćuk Đurović, Igor Jemcov, Maja Todorović, | XVI srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006946>

**UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA HIDROGEOLOGIJU**

HG

**XVI SRPSKI SIMPOZIJUM
O HIDROGEOLOGIJI
sa međunarodnim učešćem
ZBORNİK RADOVA**



**ZLATIBOR
28. septembar - 02. oktobar
2022. godine**



XVI SRPSKI SIMPOZIJUM O HIDROGEOLOGIJI
sa međunarodnim učešćem
ZBORNİK RADOVA

IZDAVAČ:

Univerzitet u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet
Đušina 7

ZA IZDAVAČA:

Prof. dr Biljana Abolmasov, dekan
Rudarsko-geološki fakultet

UREDNIK:

Doc. dr Ana Vranješ

TIRAŽ:

100 primeraka

ŠTAMPA:

Štamparija Grafolik, Beograd

GODINA IZDANJA: 2022.

Na 12/19-oj. sednici Departmana za hidrogeologiju doneta je odluka o organizaciji XVI srpskog simpozijuma o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, koja je utvrđena saglasnošću Nastavno-naučnog veća Rudarsko-geološkog fakulteta od 30.12.2019.

Naslovna strana: Sušičko vrelo, Zlatibor

CIP - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије, Београд

556(082)
628.1(082)

СРПСКИ симпозијум о хидрогеологији са међународним учешћем (16 ; 2022 ; Златибор)
Зборник радова / XVI Српски симпозијум о хидрогеологији са међународним
учешћем, Златибор 28. септембар - 02. октобар 2022. године ; [уредник Ана
Вранјеš]. - Београд : Универзитет, Рударско-геолошки факултет, 2022
(Београд : Графолік). - [18], 514 стр. : илустр. ; 30 cm

На врху насл. стр.: Департаман за хидрогеологију. - Радови цр.и лат. -
Тираж 100. - Стр. [5-6]: Уводна реч / Дејан Миленић. - Abstracts. -
Библиографија уз сваки рад.

ISBN 978-86-7352-380-4

а) Хидрогеологија - Зборници б) Снабдевање водом - Зборници

COBISS.SR-ID 74364937

Marina Ćuk Đurović, Igor Jemcov, Maja Todorović

Primena hidrodinamičkih i hidrohemijskih metoda istraživanja na primeru brane Lazići (RHE Bajina Bašta) 417

Nikola Nikolić, Vaso Novaković, Ferid Skopljak, Dejan Petrović, Miroslav Radić

Izbor metode i trajanje razrade bunara..... 423

Amela Greksa i Jasna Grabić

Povećanje dopune podzemnih voda u urbanim sredinama primenom bioinfiltracionih–bioretencionih sistema..... 429

Nataša Ćuković Ignjatović i Dušan Ignjatović

Principi projektovanja održivih objekata za korišćenje balneološkog potencijala na području Vojvodine..... 435

Milica Simonović, Gordana Šekularac, Dragica Stojiljković

Trend uticaja parametara vodnog bilansa zemljišta različitih područja Srbije..... 441

Vladimir Belličević i Zlatko Iljovski

Kompleksna hidrogeološka istraživanja uzroka procurivanja u zoni brane Uvac..... 443

Milorad Kličković

Grafički prilozi istorijatu Resavske pećine..... 449

Vladimir Lukić, Milenko Pušić, Vesna Tripković, Goran Jevtić, Boban Stojanović, Tomislav Mrđa, Vladimir Baćanin, Anđela Marinković

Softverska inovacija u prikupljanju, obradi i skladištenju hidrogeoloških podataka..... 455

Uroš Jurošević, Spasoje Glavaš

Projekat RER/7/013 procjena resursa podzemnih voda i interakcije podzemnih i površinskih voda u kontekstu adaptacije na klimatske promjene..... 461

PRIMENA HIDRODINAMIČKIH I HIDROHEMIJSKIH METODA ISTRAŽIVANJA NA PRIMERU BRANE LAZIĆI (RHE BAJINA BAŠTA) APPLICATION OF HYDRODYNAMIC AND HYDROCHEMICAL METHODS ON THE EXAMPLE OF LAZIĆI DAM (RHPP BAJINA BAŠTA)

Marina Čuk Đurović¹, Igor Jemcov² i Maja Todorović³

¹Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, 11000 Beograd. E-mail: marina.cuk@rgf.bg.ac.rs

²Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, 11000 Beograd. E-mail: igor.jemcov@rgf.bg.ac.rs

³Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, 11000 Beograd. E-mail: maja.todorovic@rgf.bg.ac.rs

APSTRAKT: U ovom radu prikazana je sprega hidrauličkog (analiza histereziisa) i hidrohemijskog (multivarijantna statistička analiza) pristupa u cilju istraživanja karstne izdani na terenu na kom se nalazi površinska akumulacija. U složenim sistemima, kao što je karstni hidrogeološki sistem sa izgrađenom hidrauličkom barijerom neophodno je adekvatno razumevanje hidrogeoloških uslova u cilju uspešnog određivanja pravaca cirkulacije voda. Poznavanje hidrogeološkog funkcionisanja takvog sistema, posebno u pogledu procene funkcionisanja barijere, hidrogeochemijskih procesa i dinamike protoka, moguće je postići kombinovanim hidrauličkim i hidrohemijskim pristupom istraživanja. U ovom radu prikazano je da integrirani pristup analize nivoa vode u površinskoj akumulaciji i osmatračkim objektima (pijezometrima) sa uporedom analizom hemijskog sastava vode značajno doprinosi identifikaciji glavnih procesa unutar karstne izdani, i pomaže u karakterizaciji svojstava hidrauličke barijere. Detaljna prostorna analiza preovlađujućih hidrohemijskih faktora i interpretacija dijagrama histereziisa omogućila je karakterizaciju dominantnih procesa koji se odvijaju u sistemu brane i okolnoj izdani. Na taj način postignut je doprinos razumevanju celokupnog sistema, što je omogućilo izdvajanje mikrolokacija od interesa za dalja istraživanja. Na analiziranom primeru akumulacije Lazići – RHE Bajina Bašta, pokazano je da kombinovana primena hidrodinamičkih i hidrohemijskih metoda ima važnu ulogu u razumevanju hidrauličkog mehanizma cirkulacije podzemnih voda u indukovanim uslovima u kojima su hidrodinamički i fizičko-hemijski procesi intenzivirani.

Ključne reči: karst, injekciona zavesa, površinski rezervoar, analiza histereziisa, hidrohemija

ABSTRACT: In this paper is presented a combined hydraulic (hysteresis analysis) and hydrochemical (multivariate statistical analysis) approach to better understand karst aquifer behavior in terrain where the surface water reservoir is built. In complex aquifer systems, such as karst media with an artificial hydraulic barrier, adequate comprehension of the hydrogeological conditions is crucial to successfully address the issue of water leakage direction. Knowledge of the hydrogeological functioning of such a system – especially for estimating the functioning of the barrier, hydrogeochemical processes, and the dynamics flow – is inferred with a combined hydraulic and hydrochemical approaches presented in this paper. The integrated approach of water level analysis in the system and water chemistry significantly contributes to identifying major processes within a karst aquifer as well as properties of the hydraulic barrier. Detailed spatial analysis of the predominant hydrochemical factors and interpretation of hysteresis diagrams enables characterization that contributes to a better understanding of the entire system, which enables focusing on micro-locations of interest for further research. The case example of the Lazići water reservoir (for the reversible HPP Bajina Bašta) shows that the combined application of hydrodynamic and hydrochemical methods plays an important role in understanding the hydraulic mechanism of groundwater circulation under induced conditions of intensified hydrodynamic and physicochemical processes.

Key words: karst, grout curtain, surface water reservoir, hysteresis analysis, hydrochemistry

UVOD

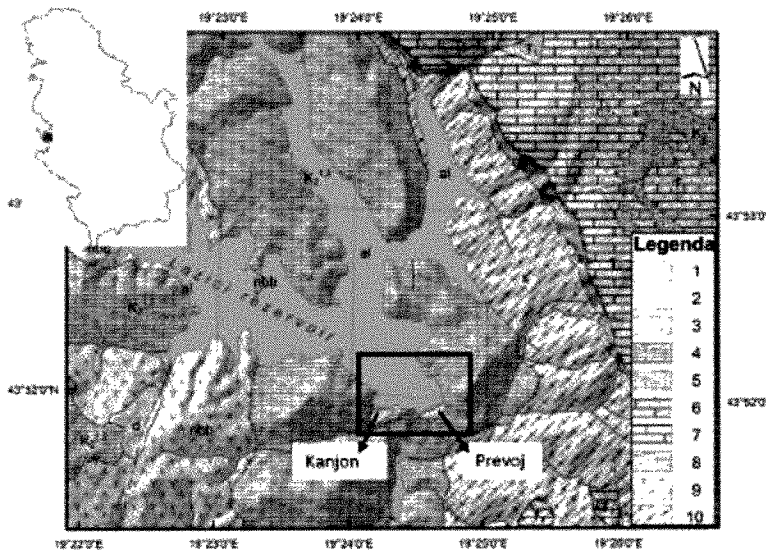
Podzemne vode karstnih izdani često pokazuju izražene promene kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika. Zbog toga karakterizacija dinamičkog ponašanja i izučavanje varijabilnosti karstnog sistema zahteva prikupljanje podataka pri što kraćim vremenskih intervalima (Hartman et al. 2014).

Brojne veštačke akumulacije su izgrađene u karstnim sredinama, za potrebe energetskog potencijala hidroelektrana. Voda u rezervoaru značajno povećava hidraulične gradijente u odnosu na prirodne uslove cirkulacije, što zahteva dobro organizovan monitoring nivoa podzemnih voda u blizini takvih objekata. Snažni hidraulički gradijenti ubrzavaju karstifikaciju ispod mesta brane (Bertrand et al. 2015), povećavaju isticanje vode i utiču na hidrohemijske procese u zoni hidrauličke barijere. Većina brana i akumulacija izgrađenih u karstu suočena je s problemom gubitka vode kroz barijeru (Milanović 2000, Roje-Bocnjani i Bocnjakovići 2013, Milanović i Vasić 2016). U mnogim slučajevima procurivanja mogu biti otkrivena analizom pijezometrijskih nivoa i primenom hidrohemijskih metoda. Nedavno je nekoliko hidrohemijskih istraživanja akumulacija vode izgrađenih u karstnim područjima bilo bazirano na primeni multivarijantnih statističkih analiza (hijerarhijska klaster klastera, faktorska analiza, diskriminativna analiza) za istraživanje zona procurivanja i razumevanje hidrogeoloških procesa u karstnom sistemu (Bertrand et al. 2015, Lee et al. 2009).

U ovom radu prikazana je komplementarna primena hidrauličkog i hidrohemijskog pristupa istraživanja zasnovanog na hipotezi da obe metode mogu značajno doprineti razumevanju procesa u karstu i proceni stanja hidrauličke barijere. Cilj hidrauličkog pristupa bio je otkrivanje obrazaca histerezisa formiranih između kote gornje vode (KGV) i osmatračkih objekata (pijezometara), kako bi se definisao hidraulički režim karstne izdani ispred i iza hidrauličke barijere. Svrha hidrohemijskog pristupa bila je utvrđivanje hidrogeohemijskih procesa i njihove prostorne raspodele u blizini hidrauličke barijere kao rezultat interakcije vode iz površinskog rezervoara i podzemnih voda. Pokazano je da kombinovana primena analize histerezisa i hidrohemijskih metoda ima važnu ulogu u razumevanju mehanizma cirkulacije podzemnih voda u sistemu u kom postoji veštačka hidraulička barijera.

PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Područje istraživanja pripada Dinarskom orogenom sistemu, i nalazi se u zoni direktnog kontakta dve velike tektonske jedinice – Drinsko-ivanjičke jedinice na istoku, i Zapadne vardarske ofiolitske jedinice na zapadu (Jemcov & Mladenović 2017, Slika 1).



Slika 1. Geološka karta istraživanog područja (prema radnoj verziji OGK list Višegrad 1:25000), Jemcov & Mladenović 2017
 Figure 1. Geological map of the study area (according to the OGK Višegrad 1: 25000), Jemcov & Mladenović 2017

Rezervoar površinske vode Lazići formiran je u krednim mikritima, laporovitim mikritima i laporcima, transgresivno prekrivenim jurskim peridotitom, gabrom i dijabazom. Ukupna zapremina rezervoara je $170 \times 10^6 \text{ m}^3$, a minimalni i maksimalni nivoi rada su 815 i 881,5 mm. Brana Lazići sastoji se od dve kamene brane sa glinenim jezgrom - Prevoj (dužina 316 m i visina 45 m) i Kanjon (dužina 218 m i visina 1,25 m), između kojih se nalazi kameni masiv - Kik. Injekciona zavesa ispod brana Prevoj i Kanjon duboka je oko 30 m. Na levoj obali brane Prevoj, duboko u stenskoj masi kroz galeriju, izgrađena je zavesa dužine 109 m dužine. Još jedna zavesa dužine 250 m nalazi se u srednjem delu, dok je treća, sa desne strane brane Kanjon, dugačka 126 m. Na području istraživanja nalazi se veliki broj osmatračkih objekata (pijezometara) koji su locirani ispred i iza pregradnog mesta.

METODE

Hidraulički pristup – Dijagrami histerezisa

Pijeziometrijski podaci i podaci o KGV prikupljeni su korišćenjem data-logera tačnosti 0,05% na dubini od 50 ili 100 m, zavisno od dubine pijeziometra i fluktuacije nivoa vode. Skupovi podataka pokrivaju višegodišnja osmatranja sa visokom vremenskom rezolucijom od dve do pet minuta, prikupljeni na velikom broju pijeziometara iz osmatračke mreže. Hidraulički pristup zasnovan je na principu da odnos KGV i nivoa vode u pijeziometrima često slede određene obrasce koji formiraju histerezise. Ovo pruža mogućnost analize strukture karstnog sistema i interpretacije funkcionalnosti hidrauličke barijere. Analiza histerezisa može biti kvalitativna i kvantitativna. Kvalitativni pristup se uglavnom zasniva na opisu histerezisnog obrasca između dve varijable, obično povezanog sa parcijalnom korelacijom i kros-korelacionom analizom (Jemcov 2019). Drugi mogući pristup je kvantitativna analiza petlji histerezisa - često predstavljenih histerezisnim indeksima (HI). Postoje različite metode računanja HI (Lawler et al. 2006; Lloyd et al. 2016), koje se mogu zasnivati na srednjoj tački (50% percentilom ili srednjom vrijednosti).

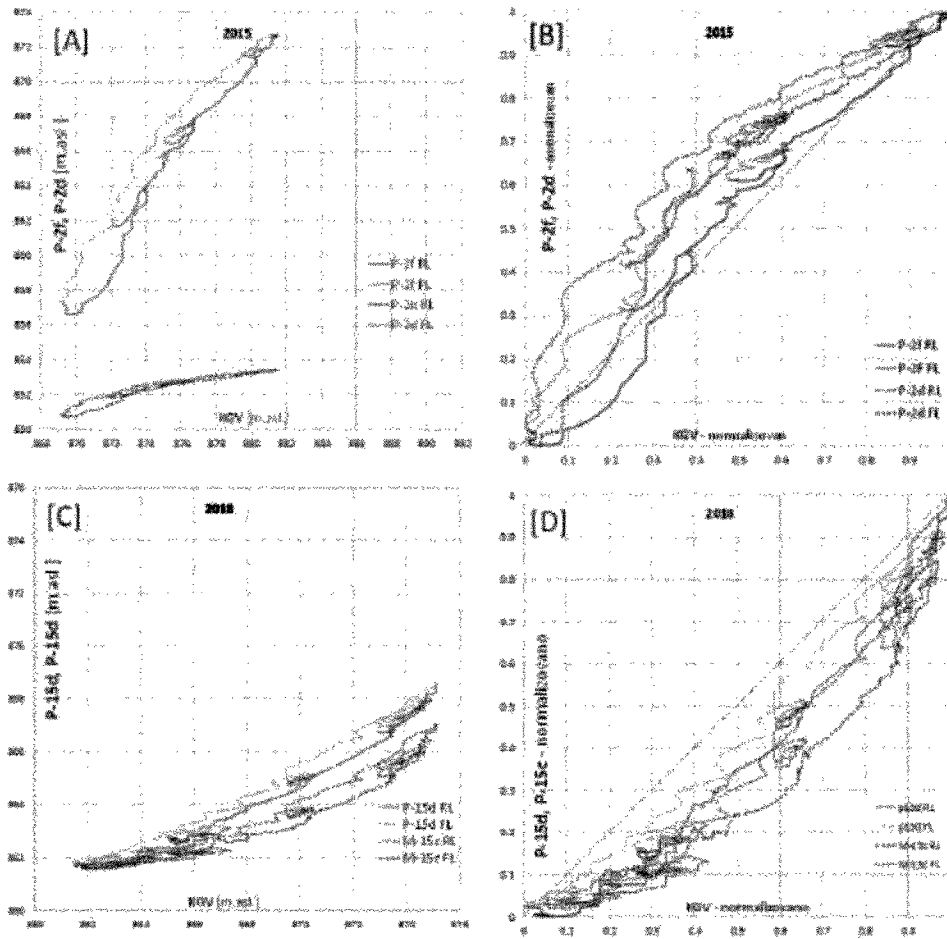
Zbog funkcionalne složenosti reverzibilne HE, indukovane naglim povećanjem ili padom KGV, formiraju se složeni histerezisi. Da bi se uklonili problemi višestrukog očitavanja funkcija histereze, manje petlje su zanemarene, a fokus je stavljen na dominantne segmente uzlaznih ili padajućih delova krive sa većom dužinom.

Hidrohemijski pristup – Multivarijantna statistička analiza

U uslovima formirane hidrauličke barijere, hidrohemijske metode predstavljaju važan segment istraživanja i pružaju dodatna saznanja neophodna za karakterizaciju karstne izdani i funkcionisanja protivfiltracione barijere. Hidrohemijska istraživanja obuhvatila su merenja fizičko-hemijskih parametara (T, pH, ORP, EC) i uzorkovanja voda iz osmatračkih objekata u sistemu brane za potrebe izrade hemijskih analiza (HCO_3^- , Cl, SO_4 , NO_3^- , Na, K, Ca, Mg, Fe, Li, Sr) u zavisnosti od karakterističnih stanja nivoa vode u akumulaciji. Prilikom planiranja hidrohemijskih istraživanja neophodno je obuhvatiti celokupan ciklus funkcionisanja sistema (izdizanje i spuštanje nivoa vode u akumulacionom jezeru) kako bi se definisao stepen interakcije površinskih voda i voda iz karstne sredine. Imajući u vidu dinamiku uzorkovanja, veliki broj parametara i objekata na terenu, interpretacija hidrohemijskih rezultata bila je zasnovana na primeni multivarijantne statističke analize (klaster analiza - HCA). U ovom radu primenjena je dvosmerni HCA analiza kod koje su se na osnovu međusobnih sličnosti grupisali uzorci voda iz 25 osmatračkih objekata (K-mod HCA) i fizičko-hemijski parametri (R mod HCA) - što je rezultiralo dvosmernim dendrogramom (Holland 2006).

REZULTATI I DISKUSIJA

Normalizovani dijagrami histerezisa pokazali su se kao koristan alat za interpretaciju različitih serija podataka, u poređenju sa interpretacijom sirovih podataka (Slika 2). Svođenjem na iste veličine (od 0 do 1) olakšava se proces poređenja i kvantifikacije dobijenih rezultata (Slika 2 – B, D). Na normalizovanim dijagramima uočava se usklađenost podataka u odnosu na referentnu liniju dijagrama, što jasno ukazuje na uslove laminarne cirkulacije na području istraživanja. Međutim, na dijagramima se takođe uočavaju i zakrivljeni oblici histerezisa (konkavni i konveksni) sa istom orijentacijom petlji – u smeru obrnutom od kazaljke na satu. Konkavni oblik dijagrama je posledica hidrauličkog otpora stenske mase odnosno protivfiltracione barijere, dok konveksni oblik sa smerom obrnutim od kazaljke na satu može biti posledica neke druge varijable, kao što je podzemna voda priordno prisutna u izdani.



Slika 2. Dijagrami histerezisa na osnovu sirovih - merenih podataka (A, C) i normalizovanih podataka (B, D)

Figure 2. Scatterplots of characteristic hysteresis loops of the raw - measured data (A, C) and normalized variables (B, D)

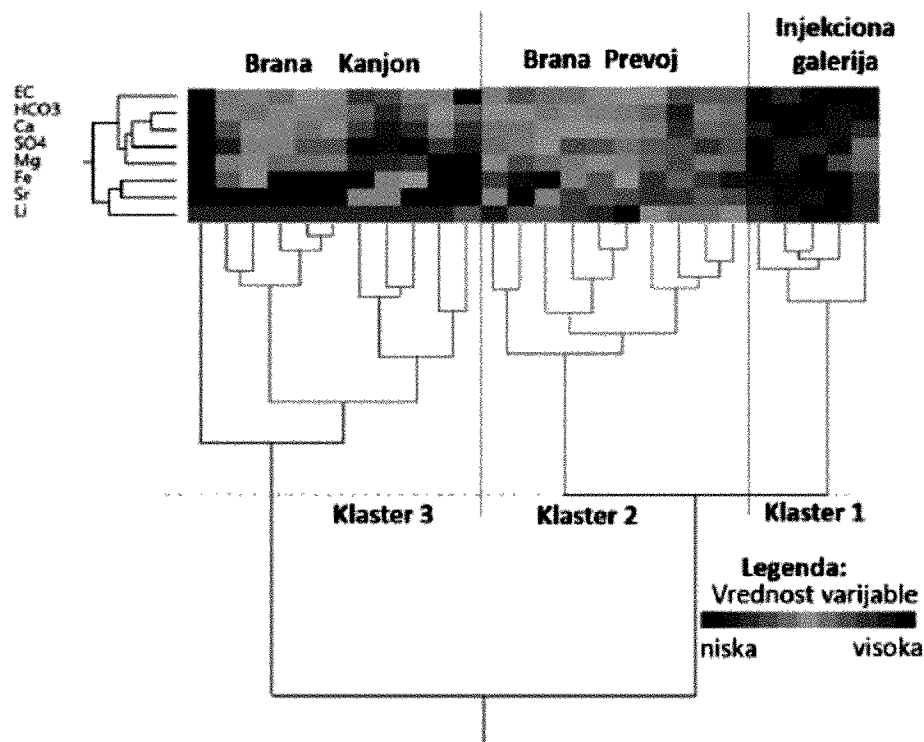
Rezultat dvosmerne HCA analize prikazan je na slici 3, gde se uočava da je 25 uzoraka voda svrstano u 3 klastera. Uzorci podzemnih voda su prikupljeni iz pijezometara ispred i iza inekcione zavese u jednoj kampanji kada je KGV dostigla značajno visoku kotu. Primena multivarijantne analize, kao što je HCA, pokazala se relevantnom metodom za prostornu interpretaciju, pri čemu su se izdvojile grupe voda sa sličnim hidrohemijskim uslovima u izdani. Izdvojena 3 glavna klastera su pravila jasne celine u odnosu na pregradno mesto:

Klaster 1 (pijezometri iz inekcione galerije) – Odlikuje se najvišim koncentracijama svih analiziranih parametara, ukazujući na duži period boravka podzemnih voda u ovom delu terena. Takođe, korelacione analize hidrohemijskih parametara ukazale su na mogućnost razgradnje inekcione mase u galeriji (visoke korelacije Ca, Mg i SO_4 - Lee et al. 2009). Zajedno sa analizom histerezisa, pokazano je da se u ovom delu terena nalaze prirodno prisutne podzemne vode koje se odlikuju mineralizacijama višim u odnosu na akumulaciono jezero i znatno višim nivoima podzemnih voda.

Klaster 2 (pijezometri locirani ispred i iza brane Prevoj) - Pokazuje najveće hemijske sličnosti sa uzorcima vode iz rezervoara. Na ovaj način, leva i desna zona brane Prevoj okarakterisale su se kao potencijalne zone procurivanja vode iz rezervoara, što je naknadno analizirano u sprezi sa hidrauličkim metodama. Ustanovljeni

laminarni režim cirkulacije i hemijske sličnosti sa vodom iz rezervoara ukazale su na mogućnost procurivanja voda ispod pregradnog mesta.

Klaster 3 (pijezometri locirani ispred i iza brane Kanjon) – Ovaj klaster karakteriše se najnižim pojedinačnim koncentracijama skoro svih analiziranih elemenata i niskom ukupnom mineralizacijom voda, što se vidi na mozaik-dijagramu varijabli na slici 3. U sprezi sa analizom histereziisa, pokazano je da u ovom delu terena padavine imaju snažan uticaj na pojavu podzemnih voda sa izuzetno niskim EC vrednostima (EC vrednosti niže od akumulacionog jezera) i da se u ovom delu brane ne pojavljuju značajna procurivanja voda iz akumulacionog jezera.



Slika 3. Šematizovani dvosmerni dendrogram
Figure 3. Schematized two-way dendrogram with heat plot.

Heterogenost podine i stanje hidrauličke barijere imali su važan uticaj na hidrauličke i hidrohemijske uslove na terenu, pa su primećene značajne promene ovih uslova na malim rastojanjima. Ove promene su se prevashodno uočavale na osnovu različitih oblika normalizovanih histereziisa (konveksni ili konkavni oblik), odnosno prema veličini mineralizacije ispitivanih podzemnih voda.

Zaključak

Integrisanim pristupom interpretacije obrazaca histereziisa i rezultata hidrohemijskih multivarijantnih statističkih metoda postignuto je detaljno razumevanje funkcionisanja hidrauličke barijere i karstne izdani. Normalizovani dijagrami histereziisa pokazali su se kao pouzdana metoda za ocenu uticaja KGV na pijezometre iz osmatračke mreže. Dvosmerna HCA pokazala se relevantnom metodom za prostornu analizu, uz interpretaciju histereziisa pružajući značajne pokazatelje pravca cirkulacije voda. Metodologija prikazana u ovom radu može da se implementira na različitim problemima vezanih za razumevanje hidrauličkog režima karstnih izdani.

Literatura:

- Bertrand C., Guglielmi Y., Denimal S., Mudry J., 2015: Hydrochemical response of a fractured carbonate aquifer to stress variations: application to leakage detection of the Vouglans arch dam lake (Jura, France). *Environ. Earth Sci.* 74: 7671–7683, doi 10.1007/s12665-015-4671-5.
- Holland S.M., 2006: *Cluster Analysis*. Department of Geology, University of Georgia, Athens, GA 30602-2501, 45p.
- Jemcov I., 2019: Impact assesment of trout courtain on the hydraulic behavior in karst, based on time a series analysis. *Environmental Earth Science* 78, 415, doi 10.1007/s12665-019-8412-z.
- Jemcov I., Mladenović A., 2017: Uticaj strukturnog sklopa na cirkulaciju podzemnih voda i gubitke iz površinske akumulacije na primeru levog boka brane „Laziš“ na Tari. *Tehnika – Rudarstvo, geologija i metalurgija* 68, 3, 357-363.
- Lawler D.M., Petts G.E., Foster I.D., Harper S., 2006: Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: The Upper Tame, West Midlands, UK. *Sci. Total Environ.* 360: 109–126, doi DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.08.032.
- Lee J.Y., Kim H.S., Yun S.T., Kwon J.S., 2009: Factor and Cluster Analyses of Water Chemistry in and around a Large Rockfill Dam: Implications for Water Leakage. *J Geotech Geoenviron.* doi 10.1061/_ASCE_GT.1943-5606.0000039.
- Lloyd C.E.M., Freer J.E., Johns P.J., Collins A.L., 2016: Technical Note: Testing an improved index for analysing storm discharge–concentration hysteresis. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 20, 625-632, doi.org/10.5194/hess-20-625-2016.
- Milanović P.T., 2000: *Geological engineering in karst*. Monograph. Zebra publishing Ltd, Belgrade, p 83-88.
- Milanović S., Vasić L., 2016: 3D Conduit modelling of leakage below a dam situated in highly karstified rocks. In: Stevanović Z, Krešić N, Kukučić N (eds) *Karst without boundaries*. International association of hydrogeologists selected papers, ISBN: 978-1-138-02968-2. CRC Press/Balkema, Taylor & Francis group, p. 321–336.
- Roje-Bonacci T., Bonacci O., 2013: The possible negative consequences of underground dam and reservoir construction and operation in costal karst areas: an example of the hydro-electric power plant (HEPP) Ombia near Dubrovnik (Croatia). *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13:2041–2052, doi.org/10.5194/nhess-13-2041-2013.