

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.19>

IDENTIFIKACIJA HIDROGEOLOŠKOGA REŽIMA CRVENOGA JEZERA ANALIZOM GLAVNE RECESIJSKE KRIVULJE

IDENTIFICATION OF THE HYDROGEOLOGICAL REGIME OF RED LAKE BY MASTER RECESSIION CURVE ANALYSIS

Adrijana Vrsalović¹, Ivo Andrić¹, Ognjen Bonacci¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, avrsalovic@gradst.hr; ivo.andric@gradst.hr; obonacci@gradst.hr

Sažetak

U ovome radu analizirani su postojeći podatci količine oborina te razina voda u Crvenome jezeru, jednomu od krških jezera pokraj Imotskoga. Radi boljega razumijevanja hidrogeološkoga funkcioniranja jezera analizirane su kvazirecesijske krivulje dobivene na temelju postojećih podataka mjerenih vodostaja u razdoblju od 28. rujna 2013. do 20. ožujka 2019. godine. Glavna recesijska krivulja (MRC) izdvojena je korištenjem *Adapted matching strip* metode, *Tabulation* metode i metode po Petrašu. Dominantni hidrogeološki mehanizam identificiran je pomoću kvazikoeficijentata recesije koji definiraju odnos komponenata izravnoga i podzemnoga otjecanja.

Ključne riječi: Crveno jezero, glavna recesijska krivulja, kvazikoeficijent recesije

Abstract

In this paper, the existing data on precipitation and water level in Red Lake, one of the karst lakes near the town of Imotski, were analyzed. Therefore, to better understand the hydrogeological functioning of the lake, an analysis of the obtained quasi recession curves (QRC), based on the available data of the measured water levels during the period from 28 September 2013 to 20 March 2019, was carried out. The master recession curve (MRC) was obtained using the Adapted matching strip method, the Tabulation method and the Petras method. The dominant hydrogeological mechanism was identified using quasi recession coefficients, which define the ratio between recharge components of groundwater and direct runoff.

Keywords: Red Lake, master recession curve, quasi recession coefficient

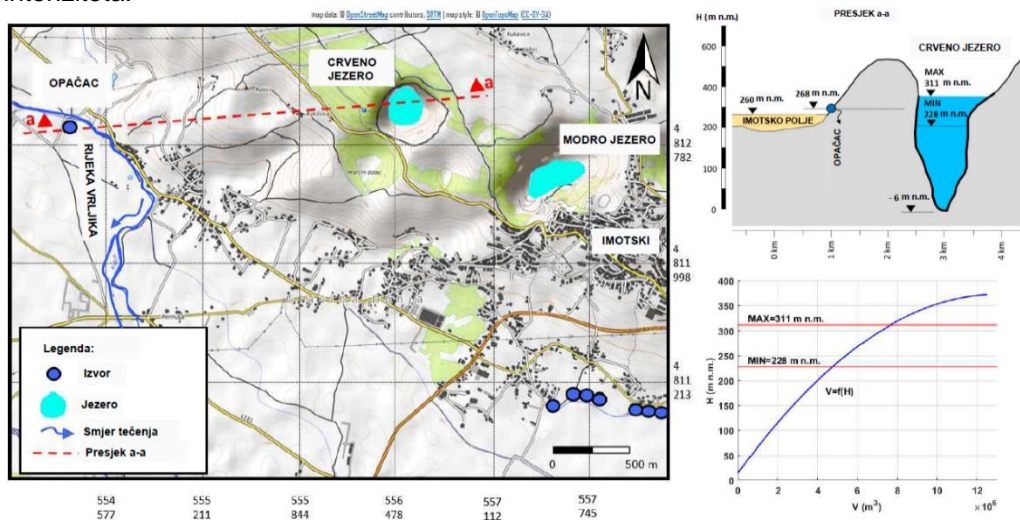
1. Uvod

Crveno jezero jedno je od najdubljih potopljenih krških fenomena Dinarskoga krša [1]. Nalazi se u neposrednoj blizini Imotskoga i okruženo je strmim padinama što otežava pristup jezeru, ali i istraživanja i mjerenja koja tada zahtijevaju veća financijska sredstva. Upravo je zbog toga očit nedostatak mjerenja kao i znanstvenih radova o istome [1,2]. Geološku građu razmatranoga područja većinom čine karbonatne stijene, pretežito vapnenci te djelomično dolomiti tercijara i krede, dok pojedine dijelove Imotskoga polja prekrivaju i naslage aluvija, lapora, pijeska i gline [2,3]. Područje Imotskoga polja bogato je vodom s velikim brojem jezera, stalnih i povremenih izvora, a glavninu količine voda donosi stalni vodotok Vrljike. Granice sliva još su uvijek neodređene. Nepoznato je i hidrogeološko funkcioniranje područja kao i kretanje vode u podzemlju zbog iznimne kompleksnosti područja koje proizlazi iz različite geološke građe i različitih kapaciteta podzemnih vodnih tokova [2-5].

U ovome radu analizirat će se postojeći podatci mjerenih vodostaja Crvenoga jezera u razdoblju od 28. rujna 2013. do 20. ožujka 2019. godine. S obzirom na to da Crveno jezero u usporedbi s Modrim jezerom nikad ne presušuje, ključno je identificirati dominantan hidrogeološki mehanizam.

2. Materijali i metode

Analiza hidrogeološkoga funkcioniranja jezera napravljena je na temelju raspoloživih podataka mjerenih vodostaja. Vrijednosti količina padalina s mjerne postaje *Imotski* poslužile su za bolje razumijevanje odgovora jezera na padaline različita trajanja i intenziteta.



Slika 1. Karta Imotskoga polja, prikaz geometrije Crvenoga jezera i krivulje zapremnine jezera (V) u funkciji razine vode (H) s pripadnim povijesnim maksimumom i minimumom

Batimetriju i geometriju jezera ustvrdili su Bonacci i Andrić [1,2] na temelju opsežnih istraživanja koristeći optički uređaj LIDAR i robotnu ronilicu (ROV) s ugrađenim sonarom. Na temelju provedenih istraživanja definirali su i krivulju zapremnine jezera u funkciji razine vode koja je u ovome radu korištena kao osnova za izračun vrijednosti volumena jezera. Na Slici 1, osim krivulje zapremnine, prikazana je i geometrija jezera s

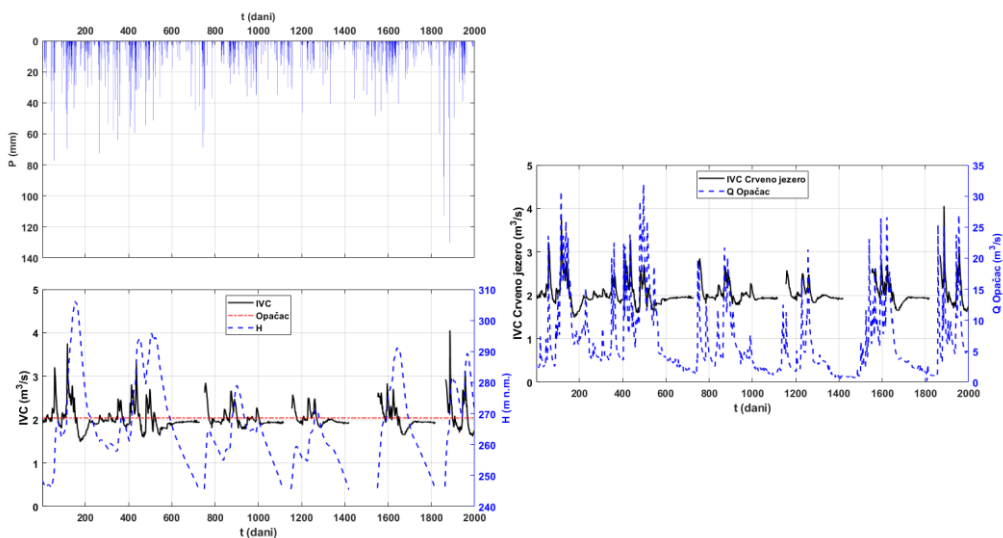
povijesnim minimumom od 228 m n. m., maksimumom od 311 m n. m. te pretpostavljenim položajem dna na - 6 m n. m.

Za svaku vrijednost vodostaja primjenom prethodno opisane funkcije dobivene su pripadne vrijednosti volumena jezera. Dnevni podatci promjene razine vode u jezeru impliciraju i dnevnu promjenu zapremnine jezera. Promjena zapremnine jezera na razini dana izražena je kao promjena integralnih količina ulaza i izlaza (IVC_i). Kako bi se izbjegle negativne vrijednosti integralnih količina voda, izvršena je transformacija podataka dodavanjem maksimuma izračunatih količina svakoj od vrijednosti (IVC_i).

$$IVC_i = (V_{i+1} - V_i) / \Delta t \quad (1)$$

$$IVC_r = IVC_i + \max(IVC_i) \quad (2)$$

Raspoloživi podatci vodostaja jezera s pripadnim količinama oborina s mjerne postaje *Imotski* kao i izračunate promjene integralnih količina voda u jezeru prikazani su na Slici 2. Promjene integralnih količina voda u Crvenome jezeru uspoređene su i s protocima na izvoru Opačac.



Slika 2. Hijetogram; Prikaz integralnih promjena količina voda (IVC) u vremenu (t), mjenjenih vodostaja (H) s naznačenom kotom izvora Opačac (268,5 m n. m.); Usporedba integralnih promjena količina voda u Crvenome jezeru (IVC) i protoka na izvoru Opačac (Q)

Identifikacija vodonosnoga sustava izvršena je izdvajanjem recesijskih razdoblja iz promjena integralnih količina voda u vremenu. Svako je recesijsko razdoblje kratkoročan događaj specifičnih karakteristika ovisan o načinu skladištenja vode, brzini pražnjenja podzemnih zalih, gubitcima, ali i o značajkama vodonosnika [6]. S obzirom na izrazitu varijabilnost pojedinačnih recesijskih segmenata kreirana je anvelopa individualnih recesijskih segmenata koja daje uvid u prosječne karakteristike komponenata otjecanja, odnosno hidrološko funkcioniranje samoga jezera i okolnoga područja. Anvelopa individualnih recesijskih segmenata naziva se glavnom recesijskom krivuljom (engl. *Master recession curve* – MRC). Glavna recesijska krivulja konstruirana

je korištenjem *Adapted matching strip* metode, *Tabulation* metode te metode po Petrašu [6-11].

Tabulation metoda, najjednostavnija od navedenih metoda, sastoji se od sortiranja individualnih recesijskih segmenata od viših prema manjima i razvrstavanja recesijskih segmenata po stupcima dok se horizontalno ne poklope [9,10].

Adapted matching strip metoda uključuje crtanje svih recesijskih segmenata, superponiranje te horizontalno pomicanje do formiranja MRC-a [6]. Ova je metoda nepraktična u velikome broju recesijskih segmenata te se primjenjuje prilagođena inačica *Adapted matching strip* metode [7,8]. Prvi je korak ove metode sortiranje recesijskih segmenata po veličini. Prvi recesijski segment, segment s najvećom početnom vrijednošću, testira se s različitim regresijskim modelima (linearni, eksponencijalni, logaritamski itd.). Model s najvećom vrijednošću koeficijenta determinacije (R^2) jest onaj koji najbolje opisuje promatranu recesiju. Drugi po veličini recesijski segment zatim se translata na odgovarajuću poziciju prve krivulje. Sljedeći je korak testiranje kompozitne krivulje prvoga i drugoga recesijskoga segmenta s regresijskim modelima. Odabire se regresijski model koji najbolje opisuje krivulju te se sljedeći recesijski segment translata na odgovarajuću poziciju prethodno definirane krivulje. Postupak se ponavlja za sve recesijske segmente u razmatranju.

Prema Petrašu [11] svaku krivulju recesije moguće je razdvojiti na više segmenata i modelirati Mailletovom jednadžbom. Tako je svaki segment definiran parametrima jednadžbe – koeficijentom recesije α i početnim protokom Q_0 koji predstavlja ordinatu krivulje za vrijeme $t=0$.

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (3)$$

Prikaz krivulje definirane Mailletovom jednadžbom na polulogaritamskom mjerilu jest pravac, a jednadžba je analitičke krivulje:

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0,4343 \cdot \alpha \cdot t \quad (4)$$

Svaki pojedinačni segment modelira se navedenom eksponencijalnom funkcijom, određuju se parametri jednadžbe te se principom superpozicije krivulje spajaju u jedinstvenu krivulju.

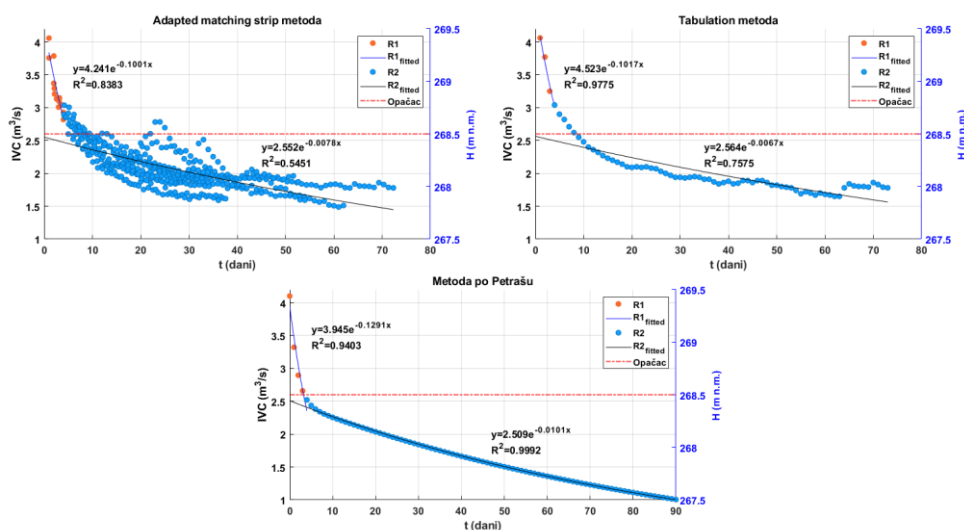
S obzirom na to da je predmet istraživanja jezero, a ne vodotok, prikaz kretanja integralnih količina voda ne može se nazvati hidrogramom jer te količine uključuju ulazne i izlazne količine voda u jezero. Isto vrijedi i za krivulje recesije koje u ovome slučaju odražavaju oscilacije u kretanju količina voda tijekom bezoborinskoga razdoblja na temelju čega se definiraju kao kvazirecesijske krivulje.

3. Rezultati

Kvazirecesijske krivulje izdvojene su iz prikaza integralnih promjena ulaznih i izlaznih količina voda u jezero. Rezultati analize recesijskih razdoblja i pripadne glavne recesijske krivulje prikazani su na Slici 3. Primjena različitih metoda pri analizi kvazirecesijskih krivulja rezultirala je prosječnim koeficijentima brzoga i sporoga odnosno baznoga otjecanja. Koeficijent brzoga otjecanja α_1 podrazumijeva brzo pražnjenje kanala i pukotina u kršu te propusniji vodonosnik, dok koeficijent sporoga otjecanja α_2 ukazuje na sporo pražnjenje podzemnih rezervi. Izračunate vrijednosti prosječnih koeficijenta recesije prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Izračunate vrijednosti koeficijenata recesije

Metoda	α_1	α_2
<i>Tabulation</i>	0,1017	0,0067
<i>Adapted matching strip</i>	0,1001	0,0078
<i>Petraš</i>	0,1291	0,0101
Prosjek:	0,1103	0,0082


Slika 3. Prikaz glavnih recesijskih krivulja po odabranim metodama

Promjena vrijednosti kvazirecesijskih koeficijenata vidljiva je lomom na glavnoj recesijskoj krivulji. Također je vidljiva i na grafu promjena integralnih količina ulaza i izlaza u jezero gdje je promjena nagiba evidentna na razini vode od 268,5 m n. m., nadmorskoj visini izvora Opačac (Slika 2). Uočava se prelijevanje vode iz jezera prema Opačcu pri višim razinama vode. Također se pri višim vodostajima bilježi i iznimno brzo otjecanje, što zapravo ukazuje na postojanje podzemne veze izvora s jezerom u obliku većega podzemnog prolaza.

4. Zaključak

Na temelju raspoloživih podataka analizirano je hidrogeološko funkcioniranje Crvenoga jezera. Analizom padalina s mjerne postaje *Imotski* i integralnih količina ulaza i izlaza iz jezera uočeno je kako jezero ne reagira na kiše kratkoga trajanja, neovisno o njihovu intenzitetu. Registriraju se većinom kiše duljega trajanja koje akumuliraju veću količinu vode nakon čega dolazi do aktiviranja brzoga otjecanja. U hidrogeološkome funkcioniranju jezera važnu ulogu imaju i podzemne vode, zbog čega jezero nikada ne presušuje. Na temelju dobivenih rezultata pretpostavlja se postojanje veze jezera i izvora Opačac za vodostaje iznad 268,5 m n. m.

Izračunati kvazirecesijski koeficijenti ukazuju na dominaciju matrice stijena u kršu što uzrokuje sporo ocjeđivanje vode iz manjih pora i pukotina. Navedeno proizlazi iz činjenice kako je Crveno jezero s okolicom područje s izraženim obilježjima krša,

građeno od vapnenca i dolomita iz doba Jure i Krede. Na veličinu kvazikoeficijenta recesije utječu i karakteristike vodonosnika – veličina, oblik, propusnost kao i podzemne veze koje u ovome slučaju nisu dovoljno istražene. Daljnja istraživanja pridonijela bi boljemu razumijevanju hidrogeološkoga funkcioniranja Crvenoga jezera, ali i okolice s ostalim krškim jezerima.

Zahvala

Ovaj rad podržan je projektom KK.05.1.1.02.0024 *VODIME – Vode Imotske krajine*, koji je bio prijavljen na Poziv na dostavu projektnih prijedloga *Shema za jačanje primijenjenih istraživanja za mjere prilagodbe klimatskim promjenama* KK.05.1.1.02., financiran iz Europskoga fonda za regionalni razvoj, Operativni program Konkurentnost i kohezija.

Literatura

- [1] Andrić, I., Bonacci, O., Jukić, B.: Hidrološka mjerenja na Crvenom jezeru u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015., *Hrvatske vode*, 25, 2017, 102, 253–258.
- [2] Andrić, I., Bonacci, O.: Morphological study of Red lake in Dinaric karst based on terrestrial laser scanning and sonar system, *Acta Carsologica / Karsoslovni Zbornik*, 43/2–3, 2014, 229–239, <https://doi.org/10.3986/ac.v43i2.712>
- [3] Bojanić, L.; Ivčić, D.; Batić, V.: Hidrogeologija Imotskog polja s osvrtom na značaj u regionalnom smislu, *Geološki vjesnik*, 34, 127–135, Zagreb 1981.
- [4] Petrik, M.: Hidrografska mjerenja u okolici Imotskog. *Ljetopis JAZU*, vol.64, 266–286, Zagreb, 1960.
- [5] Roglić, J.: Imotsko polje (Fizičko geografske osobine). Posebna izdanja Geografskog društva, vol.21, 1–125, Beograd, 1938.
- [6] Nathan, R.J.; McMahon, T.A.: Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26 (7), 1465–1473, 1990, <https://doi.org/10.1029/wr026i007p01465>
- [7] Posavec, K.; Bačani, A.; Nakić, Z.: A Visual Basic Spreadsheet Macro for Recession Curve Analysis, *Ground Water*, Vol. 44, No. 5, 764–767, 2006, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x>
- [8] Posavec, K.; Parlov, J.; Nakić, Z.: Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation, *Ground Water*, Vol. 48, No. 4, 598–603, 2010, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00669.x>
- [9] Sujono, J.; Shikasho, S.; Hiramatsu, K.: A comparison of techniques for hydrograph recession analysis, *Hydrological Processes*, 18, 403–413, 2004, <https://doi.org/10.1002/hyp.1247>
- [10] Toebes, C.; Morrissey, W.B.; Shorter, R.; Hendy, M.: Base-flow-recession curves, *Handbook of hydrological procedures: Procures No. 8*, Water and Soil Division, Ministry of Works for the National Water and Soil Conservation Organisation, Wellington, New Zealand, 1969.
- [11] Petraš, I.: An approach to the mathematical expression of recession curves, *Water SA*, Vol. 12., No.3., 1986.