

HIDROLOŠKO-HIDROGEOLOŠKA POVEZANOST MODROG I CRVENOG JEZERA KOD IMOTSKOG (PRVI REZULTATI ISTRAŽIVANJA)

Ognjen Bonacci, Ivo Andrić, Adrijana Vrsalović

1. UVOD

Crveno i Modro jezero kod Imotskog spadaju u dva svjetski poznata krška vodna fenomena o kojima su napisani relativno brojni radovi. Usprkos golemom interesu saznanja o hidrološko-hidrogeološkoj povezanosti između ta dva bliska vodna tijela još uvijek predstavlja veliku i neriješenu tajnu. Kako je tijekom 2022. godine prvi put do sada u razdoblju od nekoliko dana bilo istovremeno vršeno mjerenje razine vode, temperature vode i električne vodljivosti na oba jezera ovdje će se iznijeti prvi rezultati tih mjerenja te će se na osnovu njih pokušati donijeti zaključci o njihovoj hidrološko-hidrogeološkoj povezanosti.

Osi jezera su udaljena samo oko 1000 m. Dok Modro jezero povremeno presuši s Crvenim se to nikada ne dešava. Dno Modrog jezera je na koti od 241,6 m nad morem (mnm) dok je dno Crvenog jezera na koti -6 mnm. Volumen vode uskladištene u ovim jezerima značajno je različit. U Crvenom jezeru pri maksimalnoj do sada izmjerenoj koti od 311 mnm volumen vode iznosi $8,24 \times 10^6 \text{ m}^3$. Pri maksimalno izmjerenoj koti Modrog jezera od 410 mnm volumen vode iznosi $0,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Površine vodnog lica Modrog jezera znatno su veće od onih kod Crvenog jezera. Na koti od 410 mnm Modro jezero ima površinu vodnog lica od oko 110.000 m². Površine vodnog lica Crvenog jezera kreću se u relativno uskim granicama od 25.000 m² do 42.000 m² te pokazuju relativno blag porast s porastom razine vode u njemu. Svi ovi pokazatelji zasigurno utječu na razlike u ponašanju njihovih vodnih tijela.

Rezultati mjerenja razine vode, temperature vode i električne vodljivosti u Modrom jezeru u razdoblju od 6. studenog 2009. u 10 h do 4. rujna 2010. u 03 h (7.230 h ili 302 dana) opisani su detaljno u radovima: (1) Bonacci i Andrić (2012.); (2) Andrić i sur. (2013.); (3) Bonacci i sur. (2014.). Rezultati mjerenja istih parametara u Crvenom jezeru u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015. (17.082 h ili 712 dana) opisana su u radu Andrić i sur. (2017.). Treba naglasiti da je ta serija mjerenja na

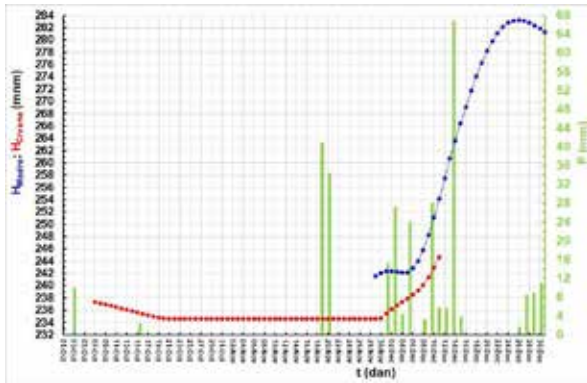
Crvenom jezeru bila nastavljena sve do 20. ožujka 2019. godine, ali rezultati mjerenja poslije 10. rujna 2015. nisu publicirani. Osnovni nedostatak tih mjerenja bio je u činjenici da je senzor bio postavljen previsoko, na koti 245,37 mnm. Zbog toga, u trenucima kad bi razina vode pala ispod te kote, mjerenja nisu mogla biti vršena tijekom sljedećih razdoblja: (1) od 25. rujna do 17. listopada 2015.; (2) od 18. listopada do 21. studenog 2016.; (3) od 17. kolovoza do 26. prosinca 2017.; (4) od 21. rujna do 4. studenog 2018.

U nastavku će se analizirati samo rezultati istovremenih mjerenja spomenuta tri parametra vršena tijekom 2022.

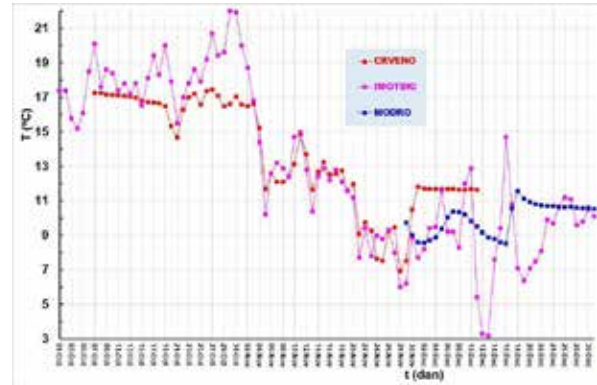
2. ANALIZA REZULTATA ZAJEDNIČKOG MJERENJA TIJEKOM 2022.

Tijekom 2022. na Modrom jezeru su mjerene srednje satne razine vode u razdoblju od 28. studenog u 14h do 31. prosinca u 24h. Tijekom 2022. na Crvenom jezeru su mjerene srednje satne razine vode u razdoblju od 6. listopada u 16h do 12. prosinca u 15h. Iz toga se vidi da se istovremenim mjerenjima razine podzemne vode na oba jezera raspolaže samo u razdoblju od 338 sati (od 28. studenog u 14h do 12. prosinca u 15h). Daljnje analize kako razine vode tako i temperatura vode, električne vodljivosti te dotoka i istjecanja iz oba jezera izvršene u ovom stručnom prikazu odnosit će se samo na to razdoblje.

Na **slici 1** ucrtni su nivogrami srednjih dnevnih vodostaja Modrog i Crvenog jezera te histogram dnevnih oborina opaženih na meteorološkoj postaji Ričice u razdoblju od 1. listopada do 31. prosinca 2022. Jasno se uočava da je u tom razdoblju došlo do padanja obilnih oborina koje su utjecale na podizanje razine vode u oba jezera. Bitno je uočiti da je porast vode započeo tek 1. prosinca dakle nekoliko dana poslije padanja velikih oborina dana 11. i 12. studenog u iznosu od 40,8 mm i 34,4 mm. Radi se o prvim obilnim jesenskim oborinama koje su se pojavile poslije višemjesečnog



Slika 1: Nivogrami srednjih dnevnih vodostaja Modrog i Crvenog jezera te histogram dnevnih oborina opaženih na meteorološkoj postaji Ričice u razdoblju od 1. listopada do 31. prosinca 2022.

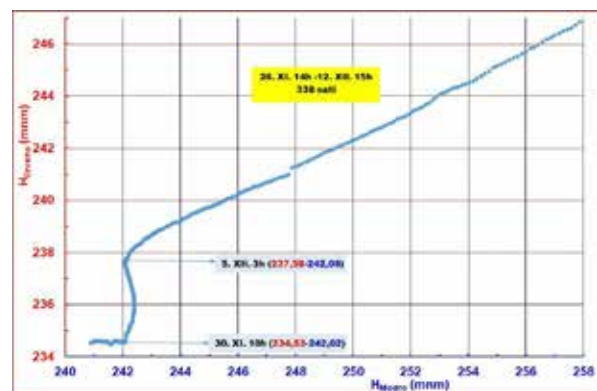


Slika 2: Srednje dnevne temperature vode Modrog i Crvenog jezera i temperature zraka opaženih na meteorološkoj postaji Imotski u razdoblju od 1. listopada do 31. prosinca 2022.

sušnog razdoblja. Vrlo vjerojatno je to vrijeme bilo potrebno da se napuni prazno krško podzemlje i formiraju hidrostatski pritisci u krškom vodonosniku dovoljni da snažno utječu na porast vode u oba jezera. Čini se da se dosta pouzdano može zaključiti da porast vodostaja u oba jezera započinju gotovo istovremeno što upućuje na zaključak da su prihranjivana iz istog krškog vodonosnika.

Na slici 2 prikazani su nizovi srednjih dnevnih temperatura vode Modrog i Crvenog jezera i temperature zraka opaženih na meteorološkoj postaji Imotski u razdoblju od 1. listopada do 31. prosinca 2022. Uočava se velika sličnost hoda temperatura zraka i temperatura vode Crvenog jezera dok je niz podataka za Modro jezero prekratak da bi se moglo donijeti iole pouzdane zaključke.

Nivogrami srednjih satnih vodostaja Modrog i Crvenog jezera u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h prikazani su na slici 3. Ljubičastom bojom prikazan je nivogram njihovih razlika. Uočava se sličnost ponašanja nivograma, ali tek kad je razina vode 5. prosinca u 3h u Crvenom jezeru dostigla kotu od 237,58 mnm. To se jasno vidi iz grafičkog prikaza na slici 4 u kojem se nalazi odnos istovremenih vodostaja oba jezera. Razlike u ponašanju prije toga vrlo vjerojatno je uvjetovana činjenicom što se Crveno

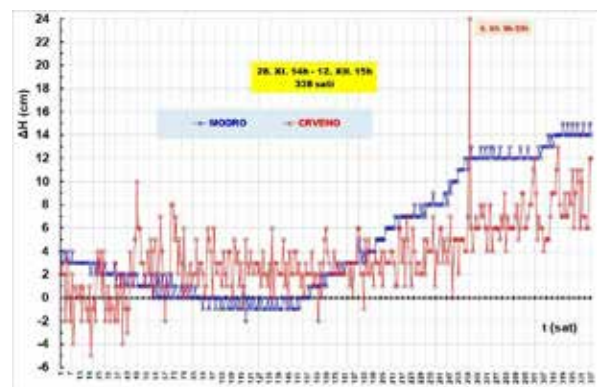


Slika 4: Odnosi između istovremenih srednjih satnih nivoa vode Modrog i Crvenog jezera u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h

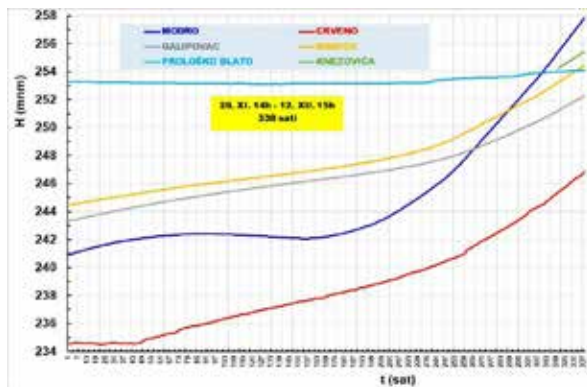
jezero glavninom prihranjuje brzim turbulentnim dotocima iz velikih krških provodnika dok se Modro jezero vrlo vjerojatno prihranjuje iz matrice sporim difuznim dotokom. Taj zaključak donekle se potvrđuje i prikazom na slici 5 na kojem su ucrtani vremenski nizovi satnih porasta i opadanja vodostaja u oba jezera. Dok je taj proces na Modrom jezeru dosta uravnotežen, na Crvenom jezeru postoje snažne oscilacije tipične za prihranjivanje iz velikih krških provodnika. Osobito je karakterističan porast od čak 24 cm u razdoblju od



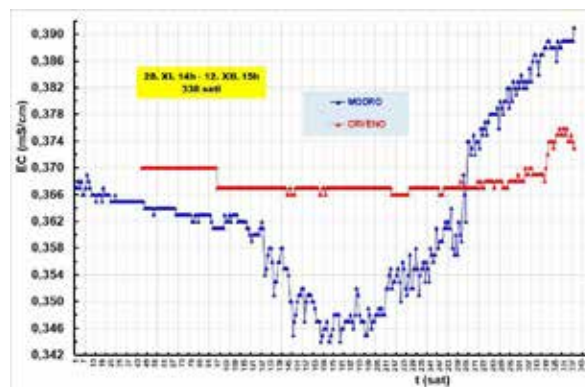
Slika 3: Nivogrami srednjih satnih vodostaja Modrog i Crvenog jezera u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h. Ljubičastom bojom prikazan je nivogram njihovih razlika



Slika 5: Vremenski nizovi razlika između uzastopnih srednjih satnih razina vode u Crvenom i Modrom jezeru u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h



Slika 6: Nivogrami srednjih satnih vodostaja Modrog, Crvenog jezera, jezera Galipovca, Mamića, Knezovića i Prološkog Blata u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h.



Slika 8: Vremenske serije srednjih satnih električnih vodljivosti Modrog i Crvenog jezera u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h

9h do 10h 9. prosinca 2022. koji jasno ukazuje da je on uzrokovan naglim dotokom veće količine vode kroz neki krški provodnik značajnijih dimenzija.

Na slici 6 su ucrtani nivogrami srednjih satnih vodostaja Modrog, Crvenog jezera, jezera Galipovac, Mamića, Knezovića i Prološkog Blata u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h. Uočljivo je slično ponašanje razina vode u tri rubna jezera (Galipovac, Mamića i Knezovića jezero) i u Modrom i Crvenom jezeru. Ta se jezera nalaze sjeveroistočno od Modrog i Crvenog jezera i udaljena su od 7 km do 8 km zračne linije, te pripadaju istom krškom vodonosniku. Razine vode u njima su više nego u Crvenom i Modrom jezeru i čini se da započinju rasti prije nego vodostaji u njima.

Na slici 7 su prikazane vremenske serije srednjih satnih temperatura vode Modrog i Crvenog jezera u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h. U ovom se slučaju radi o različitom ponašanju vremenskih nizova što je moguće objasniti činjenicom da se Modro jezero tek započelo puniti pa na temperaturu vode jako utječe što je nadsloj vode iznad mjernog uređaja mali te stoga na temperaturu vode značajno utječe temperatura zraka. U slučaju Crvenog jezera uočavaju se snažne oscilacije temperature vode u rasponu od 6,1 °C do 12 °C do kraja 30. studenog

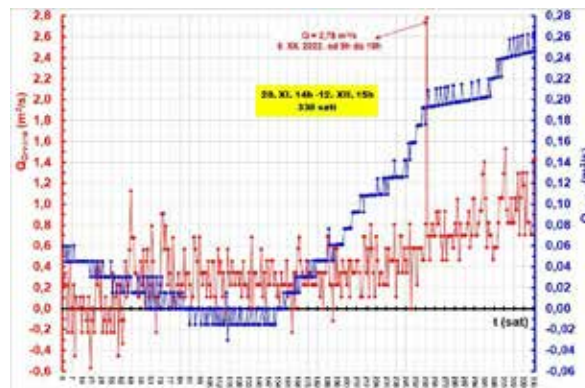
dok se one stabiliziraju na vrijednost od oko 11,7 °C poslije tog vremena. Takvo ponašanje može se objasniti prodorima vode kroz krške provodnike iz raznih dijelova vodonosnika uzrokovanih raznim kišnim epizodama u slivu. Ti se prodori vode javljaju na početku punjenja jezera tj. sa završetkom kraja sušnog razdoblja.

Vremenske serije srednjih satnih vrijednosti električnih vodljivosti Modrog i Crvenog jezera u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h nalaze se na slici 8. Niz satnih vrijednosti električne vodljivosti Crvenog jezera praktično je konstantan i kreće se između vrijednosti 0,366 mS/cm i 0,377 mS/cm. Niz vrijednosti električne vodljivosti kreće se u nešto širem rasponu od 0,344 mS/cm do 0,391 mS/cm. S obzirom na to da se radi o prekratkim nizovima nismo u mogućnosti donijeti pouzdanije zaključke što se tiče ovog parametra, ali treba naglasiti da se radi o sličnom redu veličina ovog parametra u oba jezera.

Na slici 9 su prikazani hidrografi srednjih satnih protoka Modrog i Crvenog jezera u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h. Taj prikaz upućuje na gotovo identične zaključke kao i prikaz vremenskih nizova razlika između uzastopnih srednjih satnih razina vode u Crvenom i Modrom jezeru u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h koji se nalazi na slici 5. Dotok u Crveno



Slika 7: Vremenske serije srednjih satnih temperatura vode Modrog i Crvenog jezera u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h



Slika 9: Hidrografi srednjih satnih protoka Modrog i Crvenog jezera u razdoblju od 28. studenog 2022. u 14h do 12. prosinca u 2022. u 15h

jezero je mnogo intenzivniji (prosječno 5,1 puta više) i jako varira što ukazuje da se Crveno jezero prihranjuje iz krških provodnika. U Modrom jezeru prirast dotoka je blag što potvrđuje pretpostavku da se ovo jezero prihranjuje iz krške matrice kroz dno i bokove. Najveći prosječni satni dotok u Crveno jezero opažen je u razdoblju od 9h do 10h 9. prosinca te je iznosio 2,78 m³/s.

3. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNI RAD

Na osnovi ovog kratkog niza mjerenja dosta se pouzdano može zaključiti da Modro i Crveno jezero dijele isti krški vodonosnik te da se razlike u njihovom ponašanju mogu objasniti različitim hidrogeološkim svojstvima njihovog neposrednog okoliša.

U ovom su radu izneseni rezultati najnovijih istovremenih mjerenja hidroloških parametara (vodostaja, temperatura vode i električne vodljivosti) u jednoj točki Crvenog i Modrog jezera. Smatralo se izrazito važnim našu stručnu javnost upoznati s ovim, nazvali bi ih, preliminarnim rezultatima koji predstavljaju začetak istovremenog, sustavnog i kontinuiranog hidrološko-hidrogeološkog monitoringa na prostoru Imotske krajine gdje se, osim Crvenog i Modrog jezera, nalaze i brojna druga jezera i izvori koji predstavljaju svjetski vrijedne krške vodne fenomene.

Monitoringom organiziranim i financiranim unutar projekta "VODIME-Vode Imotske krajine" obuhvaćena su

sljedeća vodna tijela u širem prostoru Imotske krajine: 1. Modro jezero; 2. Crveno jezero; 3. Prološko blato; 4. Jezero Galipovac; 5. Knezovića jezero; 6. Mamića jezero; 7. Akumulacija Ričice. Na samom kraju ovog stručnog prikaza treba napomenuti da je rad cjelovitog sustava monitoringa započeo sredinom 2023. godine. Kad se sakupe podaci za najmanje dvije kompletne hidrološke godine, dakle najmanje do kraja 2025., bit će moguće ovdje iznesene prve rezultate i zaključke potvrditi i/ili korigirati.

Analizama izvršenim na osnovi relativno kratkog razdoblja zajedničkog monitoringa na oba jezera odškrinuta su vrata cjelovitom razumijevanju složenih interaktivnih procesa koji se odvijaju u ovom prostoru. To predstavlja nezaobilazni preduvjet za mogućnost njihove zaštite i učinkovitog korištenja.

ZAHVALA

Ovaj rad je sufinanciran kroz projekt "VODIME – Vode Imotske krajine" (KK.05.1.1.02.0024), projekt financiran sredstvima Vlade Republike Hrvatske i sredstvima Europske unije kroz Europski strukturni fond, u sklopu poziva "Shema za jačanje primijenjenih istraživanja za mjere prilagodbe klimatskim promjenama".

Ovo istraživanje je djelomično sufinancirano kroz projekt KK.01.1.1.02.0027, koji je sufinanciran od strane Hrvatske Vlade i Europske Unije kroz European Regional Development Fund - the Competitiveness and Cohesion Operational Programme. ■

LITERATURA

Andrić, I.; Bonacci, O.; Jukić, B. (2013.): Rezultati najnovijih hidroloških i geomorfoloških istraživanja Crvenog jezera kod Imotskog. *Hrvatske Vode*, 21(86): 344-348.

Andrić, I.; Bonacci, O. (2014.): Morphological study of Red lake in Dinaric karst based on terrestrial laser scanning and sonar systems. *Acta Carsologica*, 43(2/3): 229-239. DOI: 10.3986/ac.v43i2.712

Andrić, I.; Bonacci, O.; Jukić, B. (2017.): Hidrološka mjerenja na crvenom jezeru u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015. *Hrvatske Vode*, 25(102): 253-258.

Bonacci, O.; Andrić, I. (2012.): Analiza najnovijih mjerenja izvršenih na Modrom jezeru kod Imotskog. *Hrvatske Vode*, 20(79-80): 51-59.

Bonacci, O.; Andrić, I.; Yamashiki, Y. (2014.): The hydrology of Blue Lake in the Dinaric karst. *Hydrological Processes*, 28(4): 1890 - 1898. DOI: 10.1002/hyp.9736