

HIDROLOŠKA MJERENJA NA CRVENOM JEZERU U RAZDOBLJU OD 28. RUJNA 2013. DO 10. RUJNA 2015.

doc. dr. sc. Ivo Andrić, dipl. ing. građ.

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
Sveučilišta u Splitu
Matice hrvatske 15, 21000 Split
ivo.andric@gradst.hr

prof. emeritus Ognjen Bonacci, dipl. ing. građ.

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
Sveučilišta u Splitu
Matice hrvatske 15, 21000 Split

Branimir Jukić, mag. ing. aedif.

PD Imotski
Blajburška 26/B, 21260 Imotski

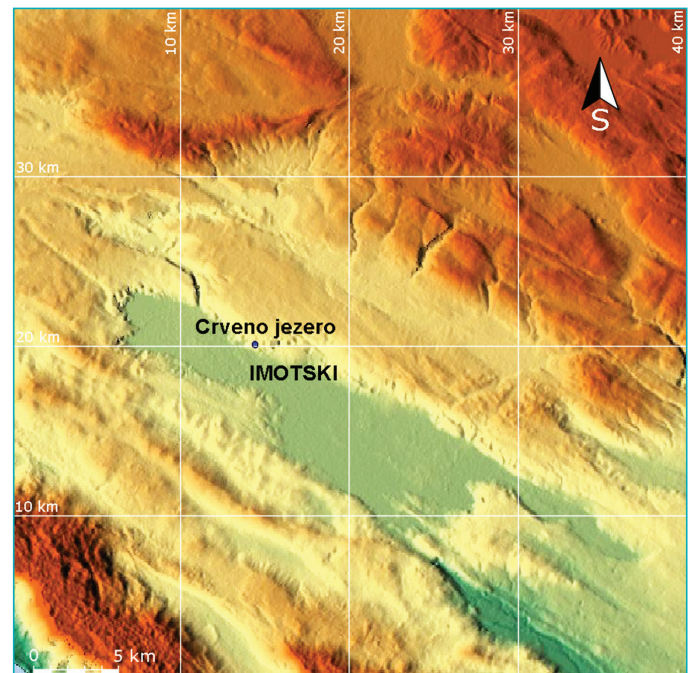
U članku su analizirani rezultati hidroloških mjerenja izvršenih na Crvenom jezeru kod Imotskog u razdoblju od 28. rujna 2013. u 23 sata do 10. rujna 2015. u 16 sati. U tom su razdoblju kontinuirano (svaki sat) mjereni: (1) vodostaj; (2) temperatura vode; (3) električna vodljivost. Mjerenja su izvršena instrumentom CTD DIVER (Schlumberger Water Services). Instrument je bio postavljen na nadmorskoj visini 212,60 m n.m. tako da su mjerenja vršena stalno u jednoj točki. Tako izvršena i u ovom radu prikazana mjerenja predstavljaju prvi sustavni, kontinuirani monitoring izvršen na ovom svjetski poznatom krškom fenomenu. U radu su definirane vrijednosti promjene zapremine vode u Crvenom jezeru. Izvršene su usporedbe s mjerenjima istih parametara u Modrom jezeru.

Ključne riječi: hidrologija krša, vodostaj, temperatura vode, električna vodljivost, Crveno jezero (Imotski-Hrvatska)

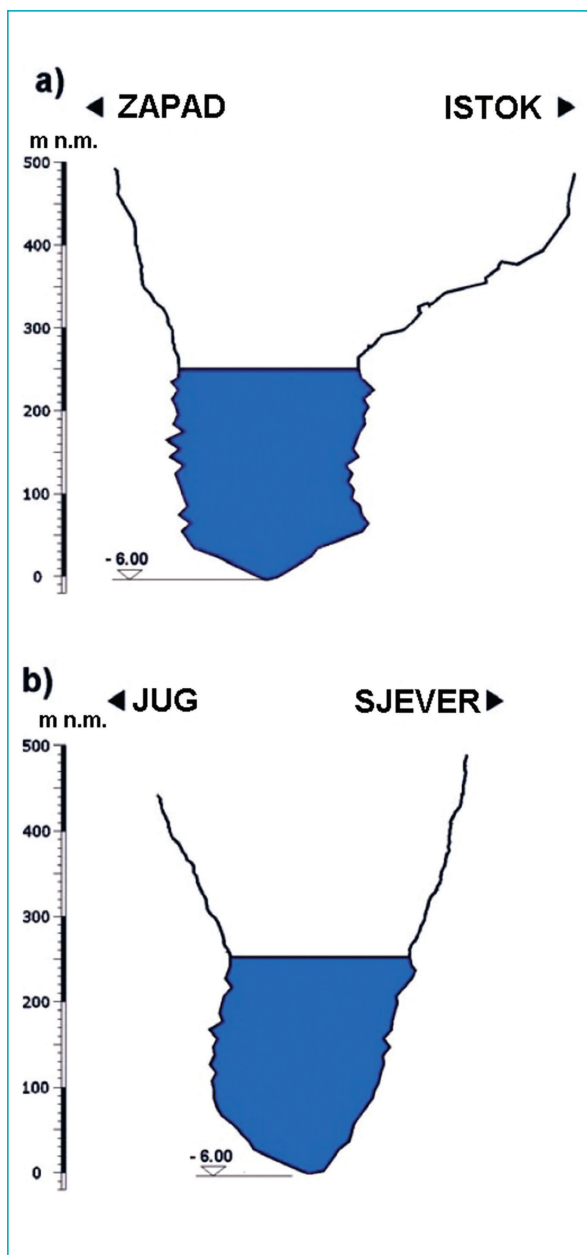
1. UVOD

U ovom će radu biti izneseni rezultati hidroloških mjerenja izvršenih u Crvenom jezeru u razdoblju od 28. rujna 2013. u 23 sata do 10. rujna 2015. u 16 sati. Mjerenja su izvršena instrumentom CT DIVER (Schlumberger Water Services). Instrument je bio postavljen na nadmorskoj visini 212,60 m n. m. Mjerenja obuhvaćaju dvije hidrološke godine (2013./2014. i 2014./2015.), što je za donošenje pouzdanih hidroloških zaključaka od velike važnosti. U tom su razdoblju kontinuirano (svaki sat) mjereni: (1) vodostaj; (2) temperatura vode; (3) električna vodljivost. Izmjereno je ukupno 17.082 satna podatka obuhvaćenih u 711 dana plus 18 sati.

U članku ćemo se isključivo baviti interpretacijom hidroloških mjerenja obavljenih tijekom tog razdoblja. Crveno jezero u neposrednoj blizini grada Imotskog (slika 1) predstavlja jedan od najdubljih potopljenih krških fenomena na svijetu i kao takvo pobuđuje konstantno interes znanstvene zajednice. Istraživanja Crvenog jezera iz 2013. (Andrić i Bonacci, 2014.) su rezultirala preciznom geometrijom jezera (slika 2) koja se i u ovom radu koristi u svrhu procjene promjene zapremine vode u jezeru. Vezano



Slika 1: Karta šireg područja Imotskog s naznačenom lokacijom Crvenog jezera



Slika 2: Karakteristični poprečni presjeci Crvenog jezera

s Crvenim jezerom zainteresirane čitatelje upućuje se na literaturu objavljenu na hrvatskom i engleskom jeziku (Bonacci, 2006.; Andrić et al., 2013.; Andrić i Bonacci, 2014.) kao i na brojnu drugu literaturu čiji je cjeloviti popis moguće naći u tri prethodno spomenuta rada.

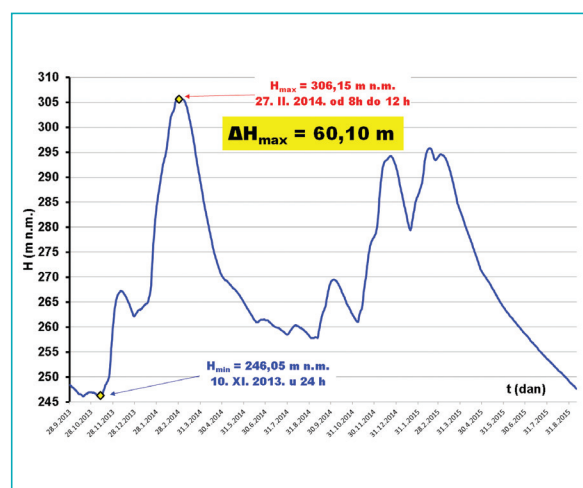
2. ANALIZA VODOSTAJA

Na slici 3 grafički je prikazan niz srednjih dnevnih vodostaja Crvenog jezera izraženih u metrima nad morem (m n. m.), izmjeren u razdoblju od 29. rujna 2013. do 9. rujna 2015. Označeni su položaji i vrijednosti najnižeg (246,05 m n. m.) i najvišeg (306,15

m n. m.) izmjerenog vodostaja. Uz njih su navedena i točna vremena pojave. Maksimalni raspon vodostaja u raspoloživom razdoblju mjerenja iznosio je $\Delta H=60,10$ m. Prosječna vrijednost vodostaja za cijelo razdoblje iznosila je 270,14 m n. m.

Kako su mjerenja izvršena u dvije hidrološke godine na temelju satnih podataka bilo je moguće definirati precizno početak i kraj hidroloških promjena u svakoj pojedinoj godini. Prva hidrološka godina započela je 11. studenog 2013. u 1 h ($H=246,09$ m n. m.), a završila je 5. rujna 2014. u 14 h ($H=257,80$ m n. m.). Druga hidrološka godina započela je 5. rujna 2014. u 15 h ($H=257,81$ m n. m.), a završila je 10. rujna 2015. u 14 h ($H=247,59$ m n. m.). Prva je godina trajala samo 7165 h ili 298, 6 dana, dok je druga trajala znatno duže, 8781 h ili 365,9 dana. U zagradama su navedene vrijednosti vodostaja u tim trenucima početka i kraja pojedine godine. Tijekom druge hidrološke godine raspon vodostaja bio je znatno niži nego tijekom prve hidrološke godine, ali su prosječni vodostaji u oba razdoblja bili gotovo identični, te su iznosili za prvo razdoblje 271,51 m n. m., dok su za drugo bili samo 24 cm viši te su iznosili 271,75 m n. m.

Zanimljivo je analizirati maksimalne vrijednosti porasta i opadanja razine vode jezera. Najveći zabilježen porast tijekom jednog sata iznosio je 42 cm, dok je najveće opadanje iznosilo samo 6 cm tijekom jednog sata. Najveći porast vodostaja jezera opažen je 8. studenog 2014. između 11 i 12 h kad je vodostaj porastao s 261,44 m n. m. na 261,86 m n. m. Najvećem zabilježenom porastu vodostaja prethodila su dva značajna kišna događaja. Naime, 6. i 7. studenog je zabilježena kiša na meteorološkoj postaji Imotski od 26,1 mm i 55,4 mm. Sljedeći značajni porast vodostaja jezera tijekom jednog sata bio je znatno manji te je iznosio samo 26 cm. Tijekom samo 113 sati (0,665 ukupnog vremena mjerenja) porasti vodostaja bili su veći ili jednaki 10 cm. Periodi recesije, kako vodostaja



Slika 3: Niz srednjih dnevnih vodostaja Crvenog jezera izraženih u m n.m., izmjeren u razdoblju od 29. rujna 2013. do 9. rujna 2015.

tako i promjena u zapremini vode jezera, su izravno vezani za sušne periode godine i nedostatak oborina.

3. ANALIZA PROMJENE ZAPREMINJE VODE U JEZERU

Na slici 4 prikazana je krivulja zapremine Crvenog jezera (Andrić i Bonacci, 2014), V (10^6 m³) u funkciji razine vode, H (m n. m.). Moguće je uočiti da se volumen vode u jezeru mijenja u rasponu od 5×10^6 m³ do oko 10×10^6 m³. Pouzdanije zaključke nije moguće donijeti zbog toga što se raspolaže s relativno kratkim razdobljem mjerenja. Za pretpostaviti je da je jezero u svojoj dugoj povijesti imalo mnogo više i mnogo niže vodostaje od onih koji su izmjereni tijekom ove dvije godine motrenja, a kretale su se između 246,05 m n. m. i 306,15 m n. m. (Andrić i Bonacci, 2014).

Vrijednosti srednjih dnevnih zapremine vode u jezeru, ΔV , su razlika između dotoka u jezero Q_D i istjecanja iz jezera Q_I ($m^3 s^{-1}$), u danu, t , definirane su izrazom:

$$\Delta V = Q_D - Q_I = \frac{(V_t - V_{t-1})}{\Delta t} \quad (1)$$

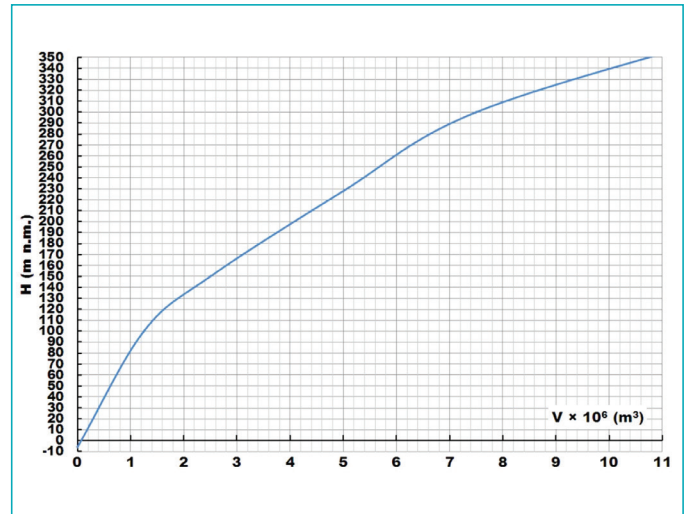
kod čega je, V_t , zapremina vode (m³) u jezeru kod vodostaja, H_t izmjenjenog u danu, t , dok, V_{t-1} označava zapreminu jezera (m³) u prethodnom, $t-1$, danu kada je vodostaj iznosio, H_{t-1} . Određene su iz krivulje date na slici 4. Oznaka, Δt , predstavlja vremenski inkrement za koji je vršeno definiranje dotoka i istjecanja iz jezera, a koji u ovom slučaju iznosi 86.400 s.

Na slici 5 grafički je prikazan niz srednjih dnevnih promjena zapremine vode u Crvenom jezeru definiranih u razdoblju od 29. rujna 2013. do 9. rujna 2015. Maksimalna promjena zapremine vode u fazi dotoka u Crveno jezero, ΔV_{max} , u iznosu od $1,73$ m³ s⁻¹ pojavio se dana 22. siječnja 2014. Najveći pad u zapremini vode jezera ΔV_{min} u iznosu od $-0,54$ m³ s⁻¹ opažen je dana 23. ožujka 2014.

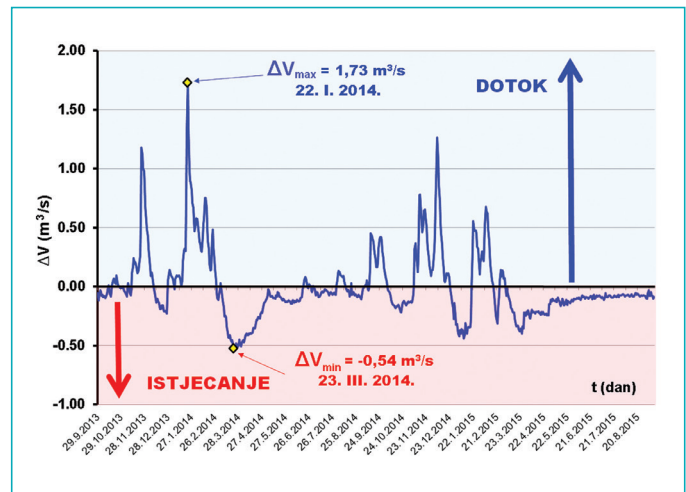
Zanimljivo je usporediti vrijednosti promjene zapremine vode u Crvenom jezeru s vrijednostima izmjenjenim na susjednom Modrom jezeru. Nažalost ne postoje istovremena mjerenja. Na Modrom jezeru mjerenja su izvršena u razdoblju od 6. studenog 2009. u 22 sata do 4. rujna 2010. u 3 h (7230 sati i 302 dana) (Bonacci i Andrić, 2012.; Bonacci et al., 2014.). U tom je razdoblju izračunata maksimalna promjena zapremine vode, ΔV_{max} u iznosu od $5,09$ m³ s⁻¹. Najveći pad u zapremini vode Modrog jezera ΔV_{min} , iznosio je $-0,932$ m³ s⁻¹.

4. ANALIZA TEMPERATURE VODE

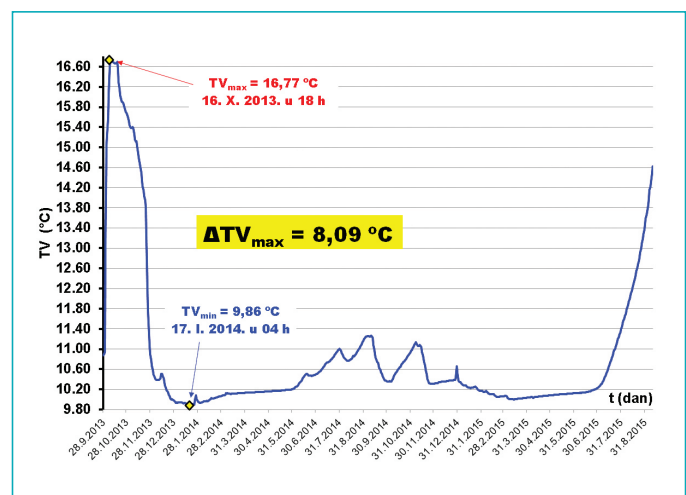
Na slici 6 grafički je prikazan niz srednjih dnevnih temperatura vode Crvenog jezera, TV (°C), izmjenjen u razdoblju od 28. rujna 2013. u 23 h do 10. rujna 2015. u 16 h. Označeni su položaji i vrijednosti najniže (9,86 °C)



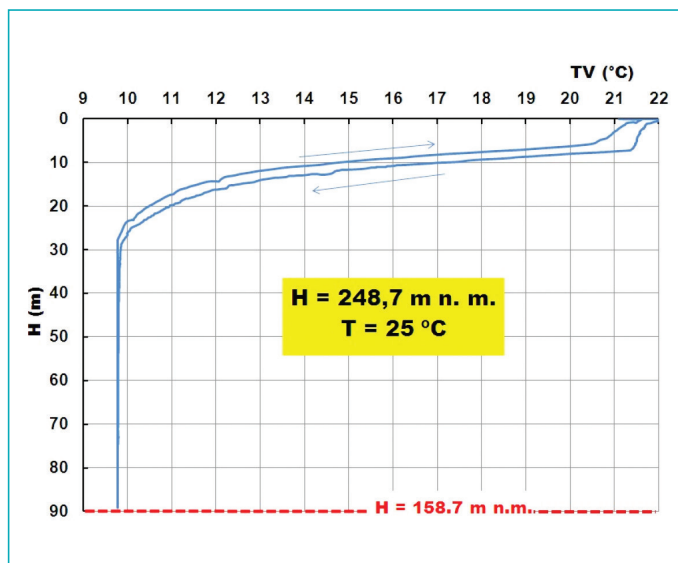
Slika 4: Krivulja zapremine Crvenog jezera, V , izražene u 10^6 m³, u funkciji razine vode, H , izražene u m n.m.



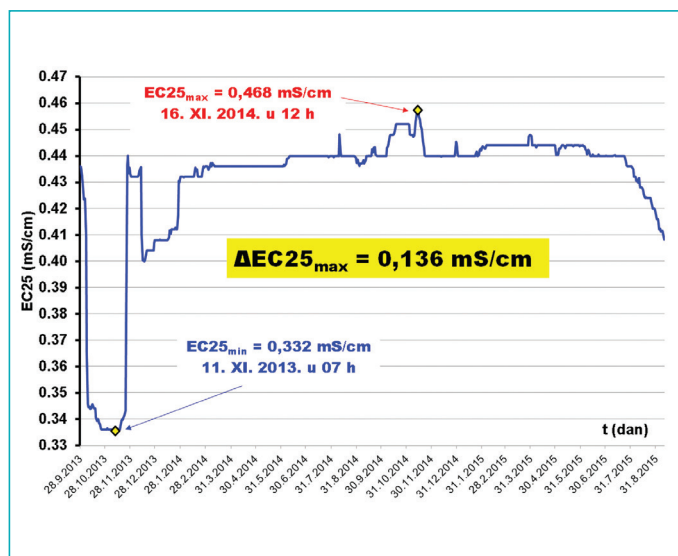
Slika 5: Niz srednjih dnevnih promjena zapremine vode u Crvenom jezeru ΔV u razdoblju od 29. rujna 2013. do 9. rujna 2015.



Slika 6: Niz srednjih dnevnih temperatura vode Crvenog jezera izraženih u °C, izmjenjen u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015.



Slika 7: Profil temperature vode Crvenog jezera izmjerene dana 8. rujna 2013.

Slika 8: Niz srednjih dnevnih vrijednosti električne vodljivosti Crvenog jezera izraženih u mS cm⁻¹, izmjeren u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015.

i najviše (16,77 °C) izmjerene temperature vode. Ako se isključi moguća pogreška instrumenta, pojašnjenje naglog porasta u temperaturi se mora potražiti u mogućem prihranjivanju jezera većom količinom vode koja u zapaženom trenutku značajno mijenja temperaturu pa i električnu vodljivost vode u jezeru. Uz njih je navedeno i točno vrijeme pojave. Maksimalni raspon temperature vode u mjernoj točki u raspoloživom razdoblju mjerenja iznosio je $\Delta TV = 8,09$ °C. Prosječna vrijednost temperature vode za cijelo razdoblje iznosila je 10,88 °C, a medijan 10,31 °C.

Treba naglasiti da se ovi podatci odnose na samo jednu točku u jezeru i to onu u kojoj se nalazio CTD

DIVER, a koja je bila na nadmorskoj visini od 212,60 m n. m. Pri analizi ovih podataka treba uzeti u obzir činjenicu da je nadsloj vode iznad mjernog uređaja varirao tijekom vremena od minimalnih 33,45 m do maksimalnih 93,65 m. Bitno je uočiti da je najmanji nadsloj vode iznad mjernog uređaja bio tijekom niskih vodostaja u jezeru. Oni se općenito javljaju tijekom toplog i sušnog razdoblja godine. Zbog toga su se najviše temperature vode u jezeru i pojavile tijekom tog razdoblja.

Ponašanje temperature vode u Crvenom jezeru moguće je uočiti na slici 7 koja prikazuje temperaturni profil izmjeren 8. rujna 2013. Vidljivo je kako je temperatura od 30 do 90 m ispod površine vodnog lica konstantna, te je nešto niža od 10 °C, a pri samoj površini 22 °C. Vodostaj jezera bio je nizak te je iznosio 248,7 m n. m., a temperatura zraka tijekom mjerenja je bila visoka i iznosila je 25 °C. Dvije crte su na slici 7 posljedica činjenice što se temperatura vode registrirala pri spuštanju i izvlačenju mjernog uređaja. Razlike u području epiliminija i termokline do dubine oko 30 m ($H = 218,7$ m n.m.) opažene su zbog rashlađivanja samog uređaja tijekom mjerenja.

5. ANALIZA ELEKTRIČNE VODLJIVOSTI

Električna vodljivost predstavlja mjeru za količinu iona u vodi, tj. za količinu otopljenih minerala. Koncentracija stopljenih soli u vodi određuje njenu električnu vodljivost. Što je količina otopljenih minerala u vodi (njena tvrdoća) veća, veća je i njena električna vodljivost. Voda koja duže vremena boravi u podzemlju krša otopi više minerala od one koja kraće vrijeme boravi u istom prostoru. Mjerenja električne vodljivosti tijekom vremena moguće je zaključiti o tome koliko dugo (barem u relativnim iznosima) voda boravi u podzemlju krša (Ford i Williams, 2007.).

Na slici 8 grafički je prikazan niz srednjih dnevnih vrijednosti električne vodljivosti Crvenog jezera, standardizirane na 25 °C, EC_{25} (mS cm⁻¹) izmjeren u razdoblju od 28. rujna 2013. u 23 h do 10. rujna 2015. u 16 h. Označeni su položaji i vrijednosti najniže (0,332 mS cm⁻¹) i najviše (0,468 mS cm⁻¹) izmjerene električne vodljivosti. Uz njih je navedeno i točno vrijeme pojave. Maksimalni raspon električne vodljivosti u mjernoj točki u raspoloživom razdoblju mjerenja iznosio je $\Delta EC_{25} = 0,136$ mS cm⁻¹. Prosječna vrijednost električne vodljivosti za cijelo razdoblje iznosila je 0,430 mS cm⁻¹, a vrijednost medijane 0,440 mS cm⁻¹.

Analizom vremenske serije podataka o električnoj vodljivosti vode u Crvenom jezeru, može se registrirati naglo opadanje vrijednosti električne vodljivosti koje je započelo 5. listopada 2013. u 19 h do 23. studenog 2013. u 14 h. Razlog naglog pada EC vrijednosti vode, analogno analiziranoj vremenskoj seriji podataka o temperaturi vode, treba tražiti u miješanju vode različitih

fizikalno-kemijskih karakteristika, uz pretpostavku o isključivanju pogreške mjernog uređaja. Treba uočiti i postupno smanjivanje vrijednosti električne vodljivosti na kraju vremena opažanja koje je započelo 26. srpnja 2015. te se nastavilo sve do kraja opažanja 10. rujna 2015. U oba slučaja opadanje vrijednosti električne provodljivosti praćeno je porastom temperature vode (vidi sliku 6).

Tijekom mjerenja na Modrom jezeru (Bonacci i Andrić, 2012.; Bonacci et al., 2014.) opažena je maksimalna vrijednost električne vodljivosti, $EC25_{max}$, u iznosu od $0,438 \text{ mS cm}^{-1}$. Minimalna opažena vrijednost električne vodljivosti Modrog jezera, $EC25_{min}$, iznosila je $0,301 \text{ mS cm}^{-1}$. Prosječna vrijednost tijekom cijelog razdoblja motrenja iznosila je $0,411 \text{ mS cm}^{-1}$.

Uspoređujući vrijednosti izmjerene u dva susjedna jezera moguće je zaključiti da je električna vodljivost, dakle i tvrdoća vode u Crvenom jezeru nešto veća nego u Modrom jezeru. Međutim, takve vrste zaključaka bit će moguće potvrditi tek kad se osigura istovremeno mjerenje raznih hidroloških parametara i to na više točaka u oba jezera.

6. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNI RAD

U ovom su radu izneseni rezultati mjerenja hidroloških parametara (vodostaja, temperatura vode i električne vodljivosti) u jednoj točki Crvenog jezera. Smatralo se izrazito važnim da se naša stručna javnost upozna s ovim rezultatima koji predstavljaju prva sustavna i kontinuirana mjerenja u ovom svjetski vrijednom krškom fenomenu.

Činjenica je da su ovim mjerenjima tek otkrivena vrata cjelovitom razumijevanju procesa koji se odvijaju u ovom prostoru. Osnovni nedostatak ovih mjerenja leži u činjenici što su ona izvršena u jednoj točki. Za detaljnije i pouzdanije zaključke bit će potrebno istovremeno montirati najmanje pet mjernih uređaja na različitim mjestima i na različitim dubinama u Crvenom jezeru. Od osobitog je značaja osigurati istovremeno mjerenje i u susjednom Modrom jezeru.

Za detaljnije hidrološke analize bitno bi bilo raspolagati s podacima o oborinama i temperaturama zraka u širem prostoru danas nepoznatog sliva Crvenog jezera. Podatci s meteorološke postaje Imotski nisu u tom smislu dovoljno relevantni. Bez obzira na tu činjenicu, u sljedećem će radu biti izvršene daljnje analize koristeći podatke s navedene postaje. ■

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.

Bonacci, O. (2006.): Crveno i Modro jezero kod Imotskog. *Hrvatske vode*, 14(54): 45-54

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.

Ford, D.; Williams, P. (2007.): *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley, Chichester.

Hydrological measurements in Crveno Jezero (Red Lake) in the period from 28 September 2013 to 10 September 2015

Abstract. The paper analyses the results of hydrological measurements carried out in Crveno Jezero at Imotski in the period from 28 September 2013 (11 pm) to 10 September 2015. In this time period, the following parameters were continuously measured (every hour): (1) water levels, (2) water temperature and (3) electrical conductivity. The measurements were performed by using a CTD DIVER (Schlumberger Water Services). The instrument was positioned at 212.60 m a.s.l. to facilitate continuous measurements in one point. The resulting measurements described in the paper present the first systemic, continuous monitoring conducted in this world-known karst phenomenon. The paper determines the values related to the changes in Crveno Jezero water volumes and compares them with the measurements of the same parameters in Modro Jezero (Blue Lake).

Key words: karst hydrology, water levels, water temperature, electrical conductivity, Crveno Jezero (Red Lake) at Imotski in Croatia

Hydrologische Messungen im Roten See (Crveno jezero) im Zeitraum vom 28. September 2013 bis 10. September 2015

Zusammenfassung. Im Artikel werden die Ergebnisse von hydrologischen Messungen analysiert, die im Roten See (Crveno jezero) bei Imotski im Zeitraum zwischen dem 28. September 2013 und dem 10. September 2015 durchgeführt wurden. Kontinuierlich wurden Wasserspiegel, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit mit dem Instrument CTD DIVER (Schlumberger Water Services) gemessen. Da das Instrument in 212,60 m Meereshöhe lag, wurden die Messungen immer in einem Punkt durchgeführt. Diese Messungen stellen die erste systematische und kontinuierliche Überwachung dieses weltbekannten Karstphänomens dar. Im Artikel werden auch die Änderungswerte des Wasservolumens des Roten Sees festgelegt. Die gemessenen Parameterwerte werden auch mit den entsprechenden Parameterwerten des Blauen Sees (Modro jezero) verglichen.

Schlüsselwörter: Karsthydrologie, Wasserspiegel, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, Roter See (Crveno jezero), Imotski, Kroatien