

Stručni članak | Professional Paper | UDK 556.06 (497.5 Modro jezero)
 Primljeno (Received): 19. 1. 2012.; Prihvaćeno (Accepted): 28. 3. 2012.

ANALIZA NAJNOVIJIH MJERENJA IZVRŠENIH NA MODROM JEZERU KOD IMOTSKOG

Prof. dr. sc. Ognjen Bonacci,
 dipl. ing. građ.

Fakultet građevinarstva, arhitekture i
 geodezije, Sveučilište u Splitu
 21000 Split, Matice hrvatske 15
 obonacci@gradst.hr

Ivo Andrić dipl. ing. građ.

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

U članku su analizirani rezultati hidroloških mjerenja izvršenih u Modrom jezeru kod Imotskog u razdoblju od 6. studenog 2009. u 22 h i 26 min do 4. rujna 2010. u 3 sata i 26 min (ukupno 7.230 satnih podataka) ili 302 kompletnih dana. Radi se o kontinuiranim mjerenjima dubine vode jezera, temperature vode i električne vodljivosti. Mjerenja su izvršena instrumentom CTD DIVER (Schlumberger Water Services). Instrument je bio postavljen na dno jezera tako da su mjerenja vršena stalno u jednoj točki. Analizirana mjerenja predstavljaju prvi sustavni, kontinuirani monitoring na ovom fascinantnom krškom fenomenu. U okviru hidroloških obrada korišteni su podaci o dnevnim oborinama i srednjim dnevnim temperaturama zraka mjereni na meteorološkoj stanici Imotski. Definirani su srednji satni i srednji dnevni dotoci i istjecanja u i iz Modrog jezera. Utvrđeno je da se vode jezera glavninom prihranjuju iz krškog vodonosnika čije dimenzije i svojstava nisu dovoljno izučeni.

Ključne riječi: hidrologija krša, hidrološka bilanca, dubina vode, temperatura vode, električna vodljivost, Modro jezero (Blue Lake)

1. UVOD

Modro jezero kod Imotskog predstavlja jedan od najfascinantnijih, vrlo rijetkih, ali i sa stanovišta znanosti nedovoljno objašnjenih fenomena Dinarskog krša Hrvatske. U njegovoj neposrednoj blizini (udaljeno je tek oko 500 m) nalazi se nešto poznatije i u literaturi češće opisivano Crveno jezero. Iako se radi o svjetski poznatim krškim geomorfološkim vodnim objektima činjenica je da su oni u biti znanstveno neistraženi. U malobrojnoj stručno-znan-

stvenoj literaturi uglavnom su iznesene njihove geološke, geografske i geomorfološke karakteristike (Cvijić 1896.; Grund 1903.; Gavazzi 1903./1904.; Daneš 1906.; Cvijić 1926.; Roglić 1938.; Roglić 1954.; Cvijić 1960.; Milanović 1979.; Bögli 1980.; Bahun 1991.; Bonacci i Roje Bonacci 2000.a; Bonacci i Roje Bonacci 2000.b; Gams 2005.; Bonacci 2006.; Bonacci i Roje Bonacci 2008.; Palandačić i sur. 2012.). Hidrološki i hidrogeološki aspekti funkcioniranja ovih jezera slabo su izučeni. Osnovni razlog leži

u nedostatku mjerenja, prije svega razine vode u samim jezerima, a osobito razine podzemne vode u njihovoj široj i užoj okolici.

Kako se radi o teško pristupačnim geomorfološkim krškim fenomenima vršenje mjerenja je složeno, skupo, ali i opasno. Posljednja (u biti i jedina) sustavna mjerenja (prvenstveno hidrografska) izvršena su u razdoblju od 26. travnja 1955. do 6. lipnja 1958. godine. Njihovi su rezultati detaljno izneseni u radu Petrika (1960.). U to doba tehnologije koje su stajale na raspolaganju nisu omogućile organiziranje pouzdanih sustavnih i kontinuiranih motrenja. Danas je situacija znatno drugačija. Suvremena tehnologija mjerenja zasnovana na korištenju instrumenta CTD DIVER (Schlumberger Water Services) omogućila je da se u Modrom jezeru u razdoblju od 6. studenog 2009. u 22 h i 26 min do 4. rujna 2010. u 3 sata i 26 min (ukupno 7.230 satnih podataka ili 302 kompletna dnevna podatka) mjere sljedeći parametri: 1) Dubina vode, H; 2) Temperatura vode, T_{voda} ; 3) Električna vodljivost standardizirana na 25°C, EC25. U neposrednoj blizini jezera postoji meteorološka stanica Imotski (N 43,4459; E 17,2181) na nadmorskoj visini od 382 m n. m. Podaci o oborinama, P, i temperaturama zraka, T_{zrak} , mjereni na njoj korišteni su u ovom radu. Ova sustavna i kontinuirana hidrološka i meteorološka mjerenja omogućila su da se bolje upozna fenomen funkcioniranja Modrog jezera.

2. POSTOJEĆA SAZNAJNA O MODROM JEZERU

Na slici 1 nalazi se situacija područja Modrog jezera. Na slici su ucrtani i ostali krški vodni fenomeni koji bi potencijalno mogli utjecati na vodni režim Modrog jezera. Na slici se nalazi položaj grada Imotskog i meteorološke stanice Imotski.

Dok Gavazzi (1903./1904.) i Cvijić (1926.) smatraju da je Modro jezero nastalo urušavanjem stropa nad golemom podzemnom špiljom, Roglić (1938.; 1954.) smatra da Modro jezero predstavlja „bunarastu ponikvu“ te isključuje mogućnost da je u prošlosti funkcionirala kao

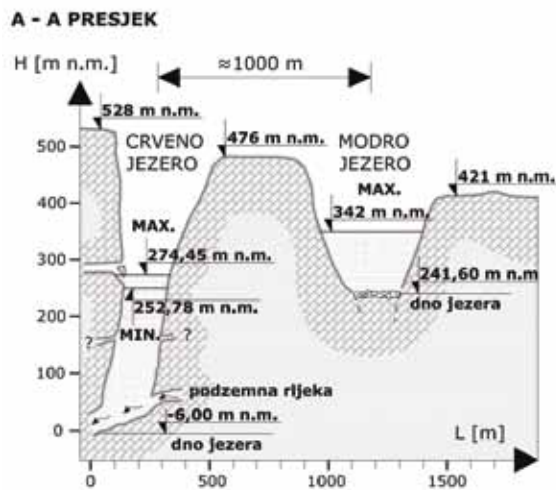


Slika 1: Situacija Modrog jezera

ponor. Smatra da je nastalo spajanjem dvije susjedne ponikve. Bahun (1991.) klasificira Modro jezero kao golemu ponikvu, a Crveno jezero kao duboku jamu. Ujedno tvrdi da su oba jezera nekoć bili ponori. Roglić (1938.; 1954.) pretpostavlja da voda u Modro jezero dotječe i iz njega se gubi isključivo kroz dno koje funkcionira kao estavela. On ujedno smatra da je Modro jezero starije od Crvenog.

Na slici 2 se nalazi poprečni presjek A-A koji prolazi kroz dva jezera Modro i Crveno. Dno Modrog jezera pokriveno je finim muljem na kojem se jasno uočavaju lijevci kroz koje voda ponire u krško podzemlje (Petrik 1960.). Na slici je upisano da se dno jezera nalazi na koti 241,6 m n. m., što je utvrđeno najnovijim geodetskim mjerenjima 2011. godine. Petrik (1960.) je pred više od pedeset godina (1955. godine) izmjerio kotu dna od 239,0 m n. m., dakle nižu za oko 2,6 m od one koju smo mi utvrdili. Ovu značajnu razliku u kotama dna moguće je objasniti na dva načina. Prvi je da se radi o grešci, a drugi je da je tijekom posljednjih pedesetak godina došlo da zatrpavanja jezera nanosom. Ova druga pretpostavka je vjerojatna i ima potvrdu u činjenici da su sa sjeverne strane zapaženi procesi erozije i zatrpavanja. S južne su se strane isti procesi počeli jače uočavati tek nakon potresa 29. prosinca 1942. godine (6 stupnjeva po Richteru), kada je srušena vidilica i kad su se veliki blokovi kamenja survali u jezero (Ujević, 1991.). Procese erozije i zatrpavanja Modrog jezera nažalost nisu sustavno praćeni. Procese erozije i urušavanja stijena u jezero vidljivi su posebno kad jezero presuši.

Ujević (1991.) pretpostavlja, iako to nije dokazano sustavnim mjerenjima, da je navedeni potres proširio podzemne odvodne pukotine. Kao posljedica toga presušivanja Modrog jezera su postala češća. Nakon spomenutog potresa Modro jezero je bilo bez vode puna dva mjeseca. I prije potresa, za sušnih godina, jezero je znalo presušiti, npr. 1935. godine. Najduže presušivanje je zabilježeno u 2011. i 2012. godini. Započelo je 8. listopada 2011., a trajalo je do 25. veljače 2012. kad je u 5 sati dotjecanja voda u jezeru porasla za oko 0,5 m. Vode u Modrom jezeru nije bilo punih 143 dana.

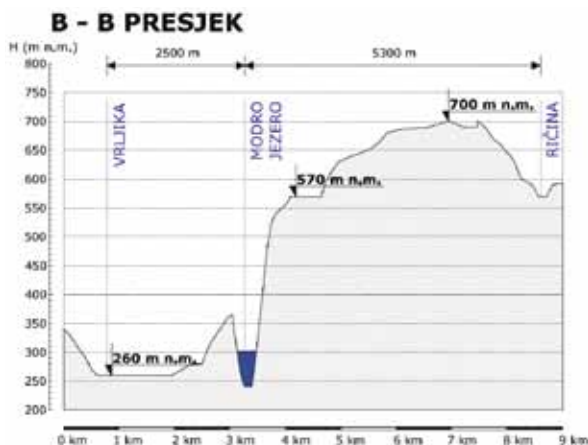


Slika 2: Poprečni presjek A-A sa slike 1

Na osnovi prethodno iznesenog treba zaključiti da Modro jezero spada u povremena krška jezera. Povremena krška jezera, tj. jezera koja povremeno presuše relativno su česta pojava u Dinarskom kršu (Ravbar i Šebela 2004.; Mulec i sur. 2005.). Najčešći razlog njihovog presušivanja je spuštanje razine podzemne vode, koja ih prihranjuje, ispod nivoa dna jezera.

Na slici 2 upisane su maksimalne i minimalne kote razine vode opažene u oba jezera. Radi se o spoju povijesnih podataka i najnovijih mjerenja. Napominje se da su podaci o Crvenom jezeru preuzeti iz radova Garašića (1999.; 2000.; 2001.). Pri korištenju ovih podataka treba biti oprezan jer se radi o procjenama čija točnost nije definitivno potvrđena pouzdanim mjerenjima. Petrik (1960.) navodi da je prema predaji maksimalna dubina Modrog jezera dosegla kotu 386 m n. m., što znači da je premašila dubinu vode od 145 m. Ovaj podatak nije potvrđen, iako ga prvi spominje Gavazzi (1903./1904.), a poslije njega ga citiraju brojni drugi autori. Petrik (1960.) navodi da su amplitude oscilacija razine vode Modrog jezera dva do pet puta veće od amplituda oscilacija Crvenog jezera. Prema istom autoru minimalna razina vode u Crvenom jezeru viša je za oko 14 m od dna Modrog jezera. Ova tvrdnja definitivno je demantirana tijekom sušnog razdoblja od sredine 2011. veljače 2012. Minimalna razina vode Crvenog jezera izmjerena krajem prosinca 2011. iznosila je 230,80 m n. m., što znači da je bila oko 11 m niža od dna Modrog jezera. S hidrogeološko-hidrološkog stanovišta bitno je uočiti da vodostaji u Modrom jezeru mogu biti znatno viši od onih istovremenih u Crvenom jezeru, ali su povremeno i niži. Kako ne postoje istovremena mjerenja razine vode u oba jezera nemoguće je detaljnije analizirati ovaj proces.

Na slici 3 prikazan je presjek B-B označen na slici 1. Iz njega se može jasno uočiti morfološka složenost analiziranog prostora na osnovi koje se mogu donijeti zaključci o mogućim smjerovima kretanja podzemnih voda u ovom složenom prostoru dubokog krša. Petrik (1960.) iznosi pretpostavku da Modro jezero barem dio svojih voda dobiva iz ponora koji se nalaze duž toka Ričine.



Slika 3: Poprečni presjek B-B sa slike 1

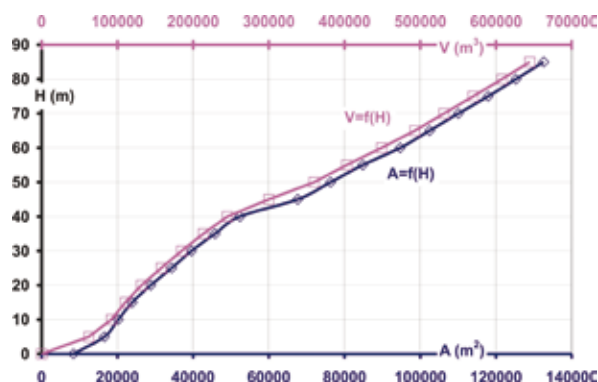
Ujedno iznosi mišljenje da su Crveno i Modro jezero kao i brojna druga jezera u okolici prihranjivana vodom iz istog krškog vodonosnika smještenog sjevernije. Činjenica je da nema dovoljno trasiranja koja bi potvrdila ili opovrgnula tu hipotezu. Važno je uočiti da tijekom sušnog razdoblja razina vode u oba jezera može pasti ispod kote površine Imotskog polja koja se od sjeverozapada prema jugoistoku kreće između 270 m n. m. i 253 m n. m. Bojanić i sur. (1981.) tvrde da voda iz oba jezera konačno završava u Jadranskom moru u izdašnim vruljama udaljenim oko 23 km zračne linije koje se nalaze i do 38 m ispod morske razine.

Na slici 4 ucrtane su krivulje zapremine jezera (modra boja), V , i površine vodnog lica (ljubičasta boja), A , u funkciji dubine vode u Modrom jezeru, H . Kad dubina vode u jezeru dosegne 85 m, tj. pri nadmorskoj visini od oko 327 m n. m., zapremina Modrog jezera iznosi oko 645.000 m³ vode, dok površina vodnog lica iznosi oko 133.000 m².

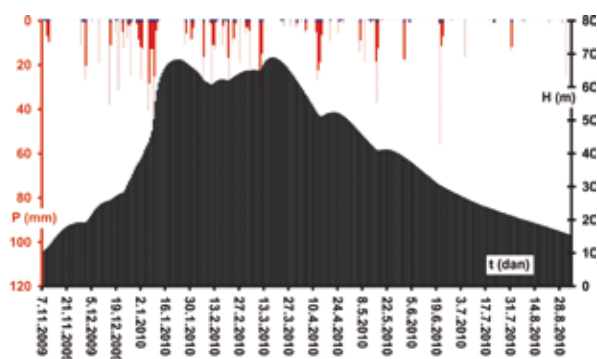
3. ANALIZA IZVRŠENIH MJERENJA

Korištenjem instrumenta CTD DIVER (Schlumberger Water Services) u Modrom jezeru u razdoblju od 6. studenog 2009. u 22 h i 26 min do 4. rujna 2010. u 3 sata i 26 min (ukupno 7.230 satnih podataka ili 302 kompletna dana) mjereni su u razmaku od jedan sat sljedeći parametri: 1) Dubina vode iznad instrumenta, H ; 2) Temperatura vode, T_{voda} ; 3) Električna vodljivost, EC25. Instrument je bio lociran 20 cm iznad dna jezera. Instrument je bio postavljen na uvjetno govoreći sredini dna jezera. Bitno je naglasiti da je njegov položaj u prostoru bio fiksiran tako da se sva mjerenja odnose na jednu točku.

Na slici 5 je dat grafički prikaz srednjih dnevnih dubina vode Modrog jezera, H , i 24-satnih oborina, P , izmjerenih na meteorološkoj stanici Imotski u razdoblju 7. studeni 2009. – 3. rujna 2010. Uočava se snažan utjecaj oborina na porast razine vode u jezeru. Pri tome treba imati na umu da oborine izmjerene na stanici Imotski reprezentiraju i režim oborina šire regije u kojoj se nalazi sliv Modrog jezera. Oborine pale u hladnijem dijelu



Slika 4: Krivulje zapremine jezera, V , i površine vodnog lica, A , u funkciji dubine vode u Modrom jezeru, H



Slika 5: Grafički prikaz srednjih dnevnih dubina vode Modrog jezera, H, i 24-satnih oborina, P, izmjerenih na meteorološkoj stanici Imotski u razdoblju 7. studeni 2009. - 3. rujan 2010.

Tablica 1: Karakteristične (minimalne, srednje i maksimalne) satne i dnevne vrijednosti pet analiziranih parametara izmjerenih u Modrom jezeru i na meteorološkoj stanici Imotski

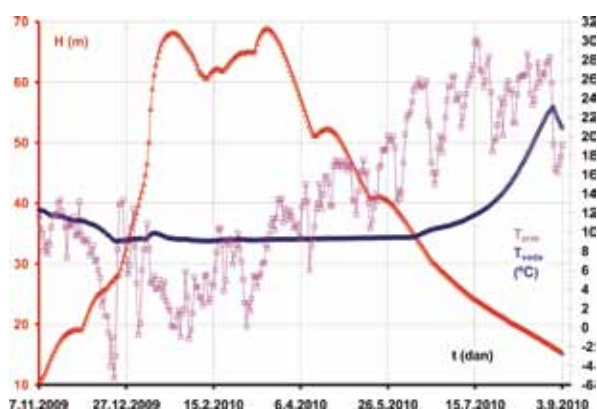
	H (cm)	EC25 (mS/cm)	T_{voda} (°C)	T_{zrak} (°C)	P (mm)
MINIMUM	1032	0,301	8,95	-5,30	0
SREDNJAK	4027	0,411	10,99	13,52	9,84
MAKSIMUM	6896	0,438	23,27	30,20	107,8

Italic modre su dnevne vrijednosti

godine od početka mjerenja do kraja svibnja uzrokovale su manje ili više podizanje razine vode. Treba uočiti da oborine pale u lipnju, posebno one značajne od 77,9 mm, pale u razdoblju od 20. do 23. lipnja 2010., nisu uzrokovala podizanje nivoa vode u jezeru.

U tablici 1 upisane su karakteristične (minimalne, srednje i maksimalne) satne i dnevne vrijednosti pet analiziranih parametara izmjerenih u Modrom jezeru i na meteorološkoj stanici Imotski. Modrom bojom i italic slovima označene su karakteristične dnevne vrijednosti oborina i temperatura zraka izmjerene na stanici Imotski.

Na slici 6 se nalazi grafički prikaz srednjih dnevnih dubina vode Modrog jezera, H, temperatura vode Modrog jezera (modra boja), T_{voda} , i temperatura zraka (ljubičasta boja), T_{zrak} , izmjerenih na meteorološkoj stanici Imotski u razdoblju 7. studeni 2009. - 3. rujan 2010. Srednje dnev-



Slika 6: Grafički prikaz srednjih dnevnih dubina vode Modrog jezera, H, temperatura vode Modrog jezera, T_{voda} , i temperatura zraka, T_{zrak} , izmjerenih na meteorološkoj stanici Imotski u razdoblju 7. studeni 2009. - 3. rujan 2010.

ne temperature vode variraju u uskim rasponima, dok srednje dnevne temperature zraka imaju velike oscilacije tijekom vremena opažanja.

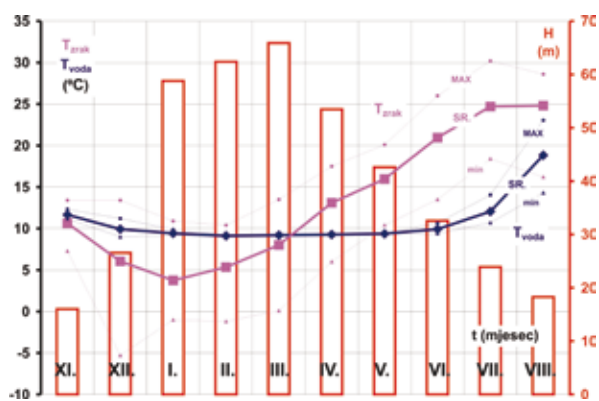
U tablici 2 upisane su vrijednosti dvadeset najintenzivnijih izmjerenih porasta i opadanja razine vode u Modrom jezeru izraženi u cm/h. Uočava se da su intenziteti porasta veći od intenziteta opadanja, što se može objasniti činjenicom da je kontrola razine vode u jezeru glavninom pod utjecajem prihranjivanja od strane podzemnih voda čiji su intenziteti porasta znatno veći od intenziteta opadanja (Bonacci 1995.).

Slika 7 predstavlja grafički prikaz karakterističnih (maksimalnih, srednjih i minimalnih) mjesečnih temperatura vode, T_{voda} Modrog jezera i temperatura zraka, T_{zrak} Imotskog te srednjih mjesečnih dubina vode Modrog jezera, H. U tablici 3 navedene su srednje mjesečne vrijednosti tri parametra izmjerenih u Modrom jezeru (H, EC25, T_{voda}) i dva parametra izmjerena na meteorološkoj stanici Imotski (P, T_{zrak}) u razdoblju od 10 kompletnih mjeseci od XI. 2009. - VIII. 2010. Na ovoj se slici još jasnije nego na prethodnoj slici 6 uočavaju razlike u hodu temperature zraka i vode. Kad je dubina vode viša od oko 35 m temperatura vode mjerena pri dnu varira u vrlo uskom rasponu od 9,05 °C do 9,50 °C. Kod dubina nižih od 20 m osjeća se utjecaj temperature zraka na temperaturu vode. On je to veći što je dubina manja. U hladnom dijelu godine temperature zraka su niže od temperature vode. U ožujku su izjednačene, a od travnja su temperature zraka više od temperature vode mjerene pri dnu Modrog jezera.

Detaljnija analiza odnosa između ove temperature zraka i vode tijekom godine izvršena je na slici 8

Tablica 2: Dvadeset najintenzivnijih izmjerenih vrijednosti porasta i opadanja razine vode i u Modrom jezeru izraženih u cm/h

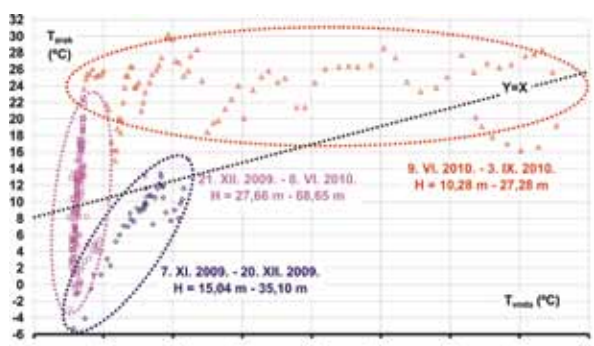
R. br.	i (cm/h)	
	porast	opadanje
1	35	-19
2	34	-19
3	34	-18
4	33	-17
5	32	-17
6	32	-16
7	31	-16
8	30	-16
9	28	-15
10	28	-15
11	28	-15
12	26	-15
13	26	-15
14	25	-14
15	24	-14
16	24	-14
17	24	-14
18	24	-14
19	23	-14
20	23	-14



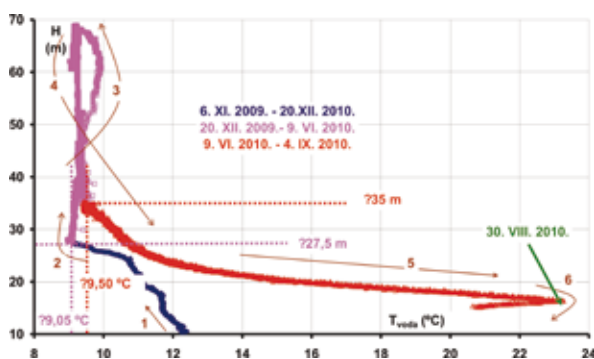
Slika 7: Grafički prikaz karakterističnih (maksimalnih, srednjih i minimalnih) mjesečnih temperatura vode, T_{voda} , Modrog jezera i temperatura zraka, T_{zrak} , Imotskog te srednjih mjesečnih dubina vode Modrog jezera, H

Tablica 3: Srednje mjesečne vrijednosti parametara izmjerenih u Modrom jezeru i na meteorološkoj stanici Imotski u razdoblju XI. 2009.-VIII. 2010.

Mjesec & godina	H (m)	EC25 (mS/cm)	T_{voda} (°C)	T_{zrak} (°C)	P (mm)
XI. 2009.	16,00	0,346	11,7	10,6	62,3
XII. 2009.	26,76	0,377	9,93	6,06	223,8
I. 2010.	58,99	0,423	9,42	3,75	310,7
II. 2010.	62,60	0,422	9,12	5,35	227,3
III. 2010.	66,09	0,424	9,19	8,02	153,2
IV. 2010.	53,64	0,424	9,28	13,1	115,1
V. 2010.	42,79	0,424	9,37	16,0	134,4
VI. 2010.	32,76	0,429	9,93	20,9	100,6
VII. 2010.	24,11	0,432	12,0	24,7	34,7
VIII. 2010.	18,48	0,404	18,8	24,8	44,3



Slika 8: Odnos između srednjih dnevnih temperatura vode Modrog jezera, T_{voda} , i temperature zraka Imotskog, T_{zrak} , u razdoblju 7. studeni 2009. - 3. rujna 2010.



Slika 9: Odnos između satnih dubina vode, H, i temperature vode, T_{voda} , Modrog jezera u razdoblju 6. studeni 2009. - 4. rujna 2010.

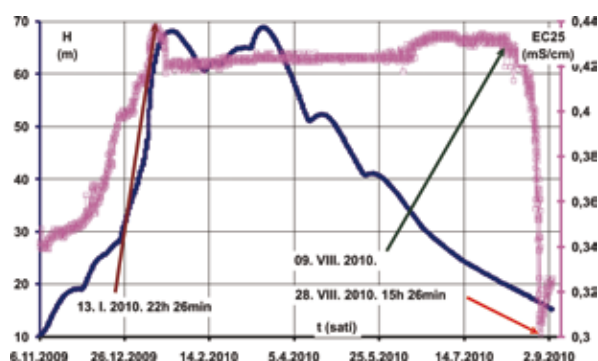
na kojoj je ucrtan odnos između istovremenih srednjih dnevnih temperatura vode Modrog jezera, T_{voda} , i temperature zraka Imotskog, T_{zrak} , u razdoblju 7. studeni 2009. - 3. rujna 2010. Uočava se postojanje tri različita vremenska podrazdoblja s različitim odnosom među temperaturama zraka i vode. U prvom podrazdoblju od 7. studenog 2009. do 20. prosinca 2009. kada su dubine vode varirale u rasponu od 15,04 m do 35,10 m temperature vode su pratile opadanje temperatura zraka. Od 21. prosinca 2009. do 8. lipnja 2010. uz dubine vode koje variraju između 27,66 m i 68,65 m temperature vode na dnu Modrog jezera praktično su stabilne. Od 9. lipnja 2010. do zadnjeg dana za koji se raspolaže s mjeranjima, s dubinama nižim od 27,28 m, temperatura vode na dnu jezera varira u rasponu od 9,43 °C do 23,06 °C. Istovremeno temperatura zraka varira u rasponu od 15,07 °C do 35,09 °C.

Na slici 9 je grafički prikazan odnos između satnih dubina vode, H, i temperature vode, T_{voda} , Modrog jezera u razdoblju 6. studeni 2009. - 4. rujna 2010. I u ovom slučaju moguće je odrediti ista tri podrazdoblja različitih ponašanja odnosa ispitivanih parametara kao i na slici 8. U prvom podrazdoblju od 6. studenog 2009. do 20. prosinca 2009. s porastom dubine opadala je temperatura vode na dnu jezera. U drugom podrazdoblju od 20. prosinca 2009. do 9. lipnja 2010. s porastom dubine temperatura vode na dnu jezera praktično se nije mijenjala. U trećem podrazdoblju od 9. lipnja 2010. do 4. rujna 2010. s opadanjem dubine vode rasla je temperatura vode na dnu jezera. Njezino opadanje započelo je dana 30. kolovoza 2010. kada je i temperatura zraka naglo pala za više od 10 °C.

Na osnovi analiza izvedenih s prikaza danih na slikama 6, 7, 8 i 9 moguće je zaključiti da se temperatura vode na dnu jezera mijenja u zavisnosti od temperature zraka i dubine vode u jezeru. U jesenskom razdoblju kada temperature zraka opadaju i kada je voda u Modrom jezeru bila dugo vremena izložena visokim temperaturama, opadanje temperatura vode započinje na nižim dubinama (oko 27,5 m). Tijekom zime kada je dubina vode u Modrom jezeru velika, na temperaturu vode na dnu ne utječe temperatura zraka. U kasno proljeće kada temperature zraka rastu i kada je voda u Modrom jezeru u prethodnom razdoblju bila dugo vremena duboka, promjena (porast) temperatura vode na dnu započinje na višim dubinama (oko 35 m). Prethodno navedene zaključke treba potvrditi novim i mjeranjima u raznim uvjetima odnosa dubina vode i temperatura zraka. Za cjelovito razumijevanje ovog procesa od posebne je važnosti izvršiti mjerenja temperature vode po dubini jezera u raznim klimatskim uvjetima pa čak i na raznim položajima u jezeru (blizu obala i u sredini).

Na slici 10 grafički su prikazani vremenski nizovi srednjih satnih dubina vode, H, i električne vodljivosti vode Modrog jezera standardizirane na 25°C, EC25, u razdoblju 6. studeni 2009. - 4. rujna 2010. S grafičkog

prikaza danog na slici 10 moguće je uočiti da se električna vodljivost, a time i kemijski sastav vode koja dolazi u jezero, nekoliko puta mijenja tijekom vremena. Do 13. siječnja 2010. u 22 h 26 min raste, EC25, usporedo s porastom dubine, dakle dotokom nove vode iz krškog vodonosnika. Ta bi se činjenica mogla objasniti time da je voda koja postepeno puni Modro jezero duže vremena boravila u krškom podzemlju. Sve do oko 9. kolovoza 2010., EC25, ima uglavnom konstantnu vrijednost. Od tada počinje opadanje vrijednosti električne vodljivosti sve do 28. kolovoza 2010. 15 h 26 min kada se ponovo javlja porast. Bez dodatnih istraživanja u ovom trenutku nije moguće dati pouzdana objašnjenja za ovakvo ponašanje električne vodljivosti vode na dnu Modrog jezera.



Slika 10: Grafički prikaz srednjih satnih dubina vode, H, i električne vodljivosti vode Modrog jezera standardizirane na 25°C, EC25, u razdoblju 6. studeni 2009. - 4. rujna 2010.

Iz trećeg stupca tablice 1 moguće je uočiti da satne vrijednosti, EC25, variraju u rasponu od 0,301 mS/cm do 0,438 mS/cm sa srednjom vrijednosti od 0,411 mS/cm. Na slici 11 prikazane su čestine izmjerenih satnih vrijednosti električne vodljivosti vode Modrog jezera standardizirane na 25°C, EC25. Uočava se da je čak 70 % vremena vrijednost električne vodljivosti veća od 0,44 mS/cm.



Slika 11: Prikaz čestina izmjerenih satnih vrijednosti električne vodljivosti vode Modrog jezera standardizirane na 25°C, EC25

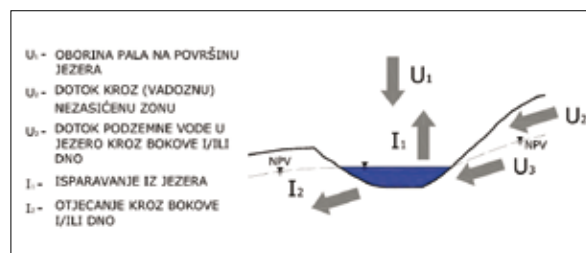
Električna vodljivost je mjera za količinu iona u vodi, odnosno za količinu otopljenih minerala. Koncentracija rastopljenih soli u vodi određuje vodljivost. Što je veća

tvrdća vode, 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. Ford i Williams (2007.) naglašavaju da analiza promjena električne vodljivosti tijekom vremena može pomoći u boljem razumijevanju vodonosnika iz kojeg ta voda dolazi u analizirani vodni fenomen (izvor, jezero itd.). Na osnovi mjerenja električne vodljivosti tijekom vremena moguće je stoga donositi zaključke o tome koliko dugo (u relativnim iznosima) voda boravi u podzemlju krša.

Mjerenja koja su autori ovog rada izvršili na izvoru Jadra tijekom rujna 2011. pokazala su da se vrijednosti električne vodljivosti, EC25, ovog krškog izvora kreće između 0.30 i 0.35 mS/cm. Na osnovi prethodno iznesenih podataka može se zaključiti da vrijednost električne vodljivosti vode na dnu Modrog jezera odgovaraju vrijednostima koje su svojstvene za vode čije je porijeklo iz dubokih krških vodonosnika.

4. ELEMENTI HIDROLOŠKE BILANCE MODROG JEZERA

Na slici 12 shematski je prikazano pet komponenti hidrološke bilance Modrog jezera. Oznakom, I, opisani su izlazi (gubitci ili otjecanje vode) iz jezera, a oznakom, U, ulazi (dotoci vode) u jezero.

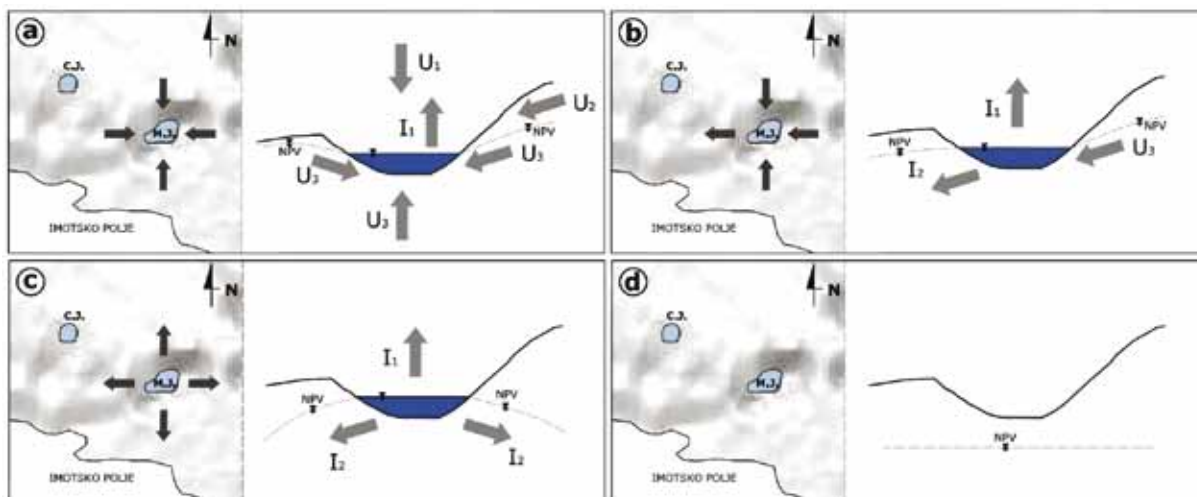


Slika 12: Shematski prikaz komponenti hidrološke bilance Modrog jezera

Isparavanje vode s površine vodnog lica Modrog jezera, I_1 , zavisi o klimatskim uvjetima, prvenstveno temperaturi zraka i vjetru, ali i o dubini vode. Što je razina vode niža to je površina vodnog lica manja, a jezero je dublje u depresiji što sve utječe na smanjivanje količine isparene vode. Iako isparavanje postoji kao stalan proces, količine isparene vode iz jezera vjerojatno su manje značajne od količina vode koje istječu iz jezera kroz njegovo dno i bokove.

Istjecanje vode iz jezera kroz dno i bokove označeno je oznakom, I_2 . Po svemu sudeći radi se o glavnoj komponenti gubitaka vode iz jezera. Količina vode koja se gubi iz jezera zavisi o razini i nagibu podzemne vode u okolnom neistraženom krškom vodonosniku.

Oznaka, U_1 , odnosi se na oborinu palu na površinu jezera. Pošto površina jezera nije velika (posebno u odnosu na nepoznatu površinu sliva) te pošto je trajanje oborina relativno kratko, ova komponenta vjerojatno ne igra značajnu ulogu u prihranjivanju jezera. Za pretpostaviti je da značajniju ulogu igra samo tije-



Slika 13: Četiri moguće sheme dotoka i istjecanja vode iz Modrog jezera

kom kratkog vremena padanja ekstremnih intenzivnih oborina kao što je npr. bila ona koja je pala u nekoliko sati tijekom 9. I. 2010., a čiji je iznos izmjeren na stanici Imotski bio 107,8 mm.

Oznakom U_2 označena je komponenta dotoka vode kroz nezasićenu (vadoznu) zonu, dakle kroz bokove Modrog jezera. Kako su bokovi izgrađeni od jako raspucanih karbonatnih naslaga cirkulacija vode kroz njih je brza. To ujedno znači da ovaj vid prihranjivanja ne traje dugo poslije padanja oborina.

Oznaka U_3 se odnosi na komponentu prihranjivanja jezera podzemnom vodom iz pripadajućeg krškog vodonosnika čije dimenzije nisu poznate. Radi se o dotoku vode kroz bokove i dno jezera. Po svemu sudeći ova komponenta najduže vremena prihranjuje vode jezera, ali i količinski najobimnije utječe na prihranjivanje vode u jezera. Ona izravno zavisi o razini podzemne vode u neistraženom krškom vodonosniku Modrog jezera.

Važno je uočiti da u raznim uvjetima mogu postojati istovremeno razne kombinacije pet navedenih komponenata hidrološke bilance. Na slici 13 ucrtane su četiri moguće sheme vezane s bilancom vode jezera. Na slici 13a ucrtan je slučaj kada je razina podzemne vode oko jezera visoka (viša od nivoa vode u njemu) te u jezero dotječe voda po cijelom obodu i vjerojatno kroz dno, a ujedno i padaju intenzivne oborine. Jedini gubitci koji se javljaju uzrokovani su isparavanjem s površine jezera. Podvarijanta ove sheme je da nema oborina. Na slici 13b je shematski prikazana situacija kad je na jednom djelu oboda jezera (najčešće onom sjeveroistočnom) razina vode viša od razine vode u jezeru te s te strane u jezero dotječe voda iz krškog vodonosnika. Na ostalim dijelovima, dakle prema Crvenom jezeru i Imotskom polju, razina podzemne vode je niža te na tom dijelu (a možda i kroz dno) voda istječe iz jezera. Čini se da se ova situacija relativno često javlja. Na slici 13c ucrtan je slučaj kad je nivo podzemne voda u krškom vodonosniku niži od razine vode u jezeru. U tom slučaju postoje samo istjecanje kroz bokove i dno ili isparavanje vode iz Modrog jezera.

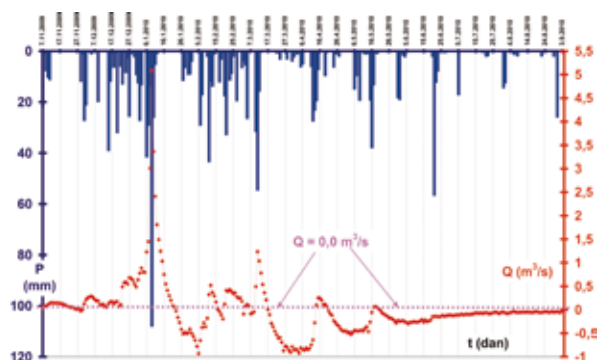
Podvarijanta ovoj shemi je da je razina vode ispod nivoa dna jezera. Slučaj ucrtan na slici 13d prikazuje situaciju kad je Modro jezero presušilo te kada je nivo podzemne vode ispod razine dna jezera.

Koristeći krivulju odnosa dubine vode, H , i volumena vode, V , u Modrom jezeru (vidi sliku 4) te satne (vidi sliku 10) i dnevne (vidi sliku 5) vrijednosti dubine vode, H , u jezeru izračunati su protoci, Q , u i iz Modrog jezera izraženi u m^3/s . Izraz za određivanje protoka glasi:

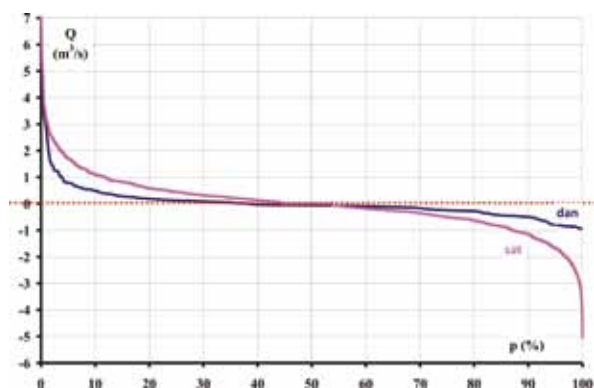
$$Q = (V_t - V_{t-1}) / \Delta t$$

od čega je, V_t zapremina vode u jezeru kod vodostaja u jezeru, H_t , izmjenog u trenutku, t , dok V_{t-1} , predstavlja zapremina vode u jezeru kod vodostaja u jezeru, H_{t-1} , izmjenog u prethodnom trenutku, $t-1$. Oznakom, Δt , obilježen je vremenski inkrement za koji je vršen proračun. U ovom slučaju on je iznosio 3600 sekundi (jedan sat) i 86.400 sekundi (24 sata ili jedan dan).

Na slici 14 prikazani su srednji dnevni protoci vode, Q , u i iz Modrog jezera i 24-satne oborina, P , izmjerene na meteorološkoj stanici Imotski u razdoblju 7. studeni 2009. - 3. rujna 2010. Na slici 15 ucrtane su krivulje trajanja satnih (ljubičasta boja) i dnevnih (modra boja) protoka, Q . Neophodno je naglasiti da izračunate i ucrtane vrijednosti protoka, Q , predstavljaju rezultantu



Slika 14: Grafički prikaz srednjih dnevnih protoka vode, Q , u i iz Modrog jezera i oborina, P , izmjerenih na meteorološkoj stanici Imotski u razdoblju 7. studeni 2009. - 3. rujna 2010.



Slika 15: Krivulje trajanja satnih (ljubičasta boja) i dnevnih (modra boja) protoka, Q

pet komponenti hidrološke bilance prikazanih na slici 13.

U tablici 4 upisane su vrijednosti dvadeset najintenzivnijih izmjerenih porasta i opadanja satnih i dnevnih protoka vode, Q , u i iz Modrog jezera. Uočava se da su intenziteti porasta veći od intenziteta opadanja što se i u ovom slučaju može objasniti činjenicom da je kontrola razina vode, a s njom i dotoka ili istjecanja vode u i iz jezera pod ključnim utjecajem razina podzemnih voda čiji su intenziteti porasta znatno veći od intenziteta opadanja (Bonacci 1995.). Najveći intenziteti porast, ali i opadanja protoka, Q , javili su se neposredno po padanju obilne, intenzivne oborine koja se javila 9. I. 2010. u iznosu od 107,8 mm.

5. ZAKLJUČCI

Modro jezero zajedno sa susjednim Crvenim jezerom s aspekta geomorfologije krša predstavlja rijedak,

Tablica 4: Dvadeset najintenzivnijih izmjerenih vrijednosti porasta i opadanja satnih i dnevnih protoka, Q , u i iz Modrog jezera

Q (m ³ /s)	porast		opadanje	
	Satni podaci	Dnevni podaci	Satni podaci	Dnevni podaci
1	7,52	5,09	-5,04	-0,932
2	7,52	3,36	-4,54	-0,923
3	7,14	3,01	-4,39	-0,905
4	6,96	2,41	-4,34	-0,872
5	6,88	1,81	-4,07	-0,862
6	6,79	1,49	-3,97	-0,860
7	6,62	1,45	-3,78	-0,858
8	6,59	1,25	-3,71	-0,855
9	6,29	1,24	-3,69	-0,848
10	6,06	1,23	-3,68	-0,844
11	6,04	1,04	-3,62	-0,836
12	5,91	1,03	-3,58	-0,825
13	5,77	0,885	-3,58	-0,811
14	5,74	0,801	-3,50	-0,810
15	5,45	0,797	-3,43	-0,788
16	5,41	0,781	-3,43	-0,785
17	5,36	0,780	-3,41	-0,778
18	5,27	0,752	-3,35	-0,773
19	5,27	0,681	-3,33	-0,747
20	5,15	0,672	-3,31	-0,690

grandiozan i bizaran oblik. Tajnovitost, tj. nepoznavanje podzemne cirkulacije vode (hidrogeologije) i hidrološke bilance oba jezera kao i njihovog međudnosa posljedica je nepostojanja sustavnih mjerenja. Analize izvršene na mjerenim podacima tijekom jedne nepotpune hidrološke godine bacile su svjetlo na funkcioniranje ovog jezera, a donekle i na procese cirkulacije vode u širem prostoru. Voda u Modrom jezeru uglavnom se prihranjuje iz krškog vodonosnika smještenog na sjeveroistočnom dijelu u području visokih planina u kojima su i oborine veće od oborina Imotskog. Dimenzije ovog vodonosnika, kao i njegova svojstva za sada su nedovoljno istražena.

Činjenica je da najnovija mjerenja i na osnovi njih doneseni zaključci nisu omogućili detaljno i konačno razumijevanje hidrogeološko-hidroloških procesa koji se zbivaju u slivu Modrog jezera, ali su omogućili bolji uvid u složene procese dotoka i istjecanja vode iz jezera. Mjerenja su omogućila uspostavljanje znanstveno zasnovanih i pouzdanih pretpostavki za organiziranje učinkovitog monitoringa bitnog za vršenje bilance voda ovog impresivnog krškog fenomena.

Rezultati dobiveni ovim istraživanjima ukazali su na potrebu dodatnih mjerenja. Prije svega se radi o neophodnosti istovremenog mjerenja hidroloških parametara na oba jezera, a možda i na još nekom od vodnih fenomena u području. Osim toga neophodno je izbušiti nekoliko dubokih piezometara (najmanje 4) u blizini Modrog i Crvenog jezera sa svrhom da se utvrde regionalni smjerovi cirkulacije podzemnih voda te da se ustanovi proces kretanja vode između ova dva vrlo bliska jezera (vidi sliku 2). Od velike bi koristi bila i dobro organizirana trasiranja podzemnih voda tijekom različitih stanja vodnosti u oba jezera. Potrebno je izvršiti mjerenja temperature vode i električne vodljivosti u više vertikalnih stupaca Modrog jezera, u sredini i na bokovima, pri raznim vodostajima i u raznim razdobljima (sezonama) godine. Mjerenja spomenutih parametara treba izvršiti i u piezometrima u kojima treba mjeriti razinu podzemne vode. Za detaljne analize bit će potrebni i podaci o oborinama u planinskom djelu zaleđa sliva Modrog jezera. Činjenica je da ovako grandiozni krški vodni oblici zaslužuju mnogo veću znanstvenu brigu.

ZAHVALA

Ovaj rad predstavlja dio znanstvenog projekta koji je financiralo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske (MZOS) pod nazivom „Proučavanje ekstremnih hidroloških situacija i vodnih rizika u kršu“. Ujedno predstavlja i dio Hrvatsko-japanskog znanstvenog projekta "Risk identification and land-use planning for disaster mitigation of landslides and floods in Croatia" koji financira Japan International Cooperation Agency (JICA). Ovim se putem zahvaljujemo MZOS-u na financijskoj pomoći, a JICA-i na opremi. Posebno zahvaljujemo prof. Yosuke Yamashiki-u sa Sveučilišta u Kyoto-u (Japan) na savjetima koje nam je davao tijekom rada. Osobito smo zahvalni speleolozima HPD Mosor i Imotski na svesrdnoj pomoći pri postavljanju ii demonstriranju mjernog uređaja u Modro jezero. ■

LITERATURA

- Bahun, S. (1991.): O postanku Crvenog i Modrog jezera kod Imotskog. *Geološki Vjesnik* 44:275-280.
- Bögli, A. (1980.): *Karst hydrology and physical speleology*. Springer Verlag, Berlin.
- Bojanić, L., Ivčić, D., Batić, V. (1981.): Hidrogeologija Imotskog polja s osvrtom na značaj u regionalnom smislu. *Geološki Vjesnik* 34: 127-135.
- Bonacci, O. (1995.): Ground water behaviour in karst: Example of the Ombla Spring (Croatia). *Journal of Hydrology* 165: 113-134.
- Bonacci, O. (2006.): Crveno i Modro jezero kod Imotskog. *Hrvatske vode* 14(54): 45-54.
- Bonacci, O., Roje Bonacci, T. (2000.a): Posebnosti krških vodonosnika, *Hrvatske vode* 8(30): 35-42.
- Bonacci, O., Roje Bonacci, T. (2000.b): Interpretation of groundwater level monitoring results in karst aquifers: examples from the Dinaric karst. *Hydrological Processes* 14(14): 2423-2438.
- Bonacci, O., Roje Bonacci, T. (2008.): Water losses from the Ričice reservoir built in the Dinaric karst. *Engineering Geology* 99(3-4): 121-127.
- Cvijić, J. (1896.): Das Karstphänomen. *Geograph. Abh. Wien* 5. H. 3: 215-329.
- Cvijić, J. (1926.): *Geomorfologija II*. Srpska akademija nauka i umetnosti, Beograd.
- Cvijić, J. (1960.): La géographie de terrains calcaires. Naučno Delo, Beograd.
- Daneš, J. V. (1906.): La région de la Neretva inferieure. *La Géographie Paris* 13 : 91-102.
- Ford, D., Williams, P. (2007.): *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley, Chichester.
- Gams, I. (2005.): Tectonics impact on poljes and minor basins (case studies of Dinaric karst). *Acta Carsologica* 34(1): 25-41.
- Gavazzi, A. (1903./1904.): Die Seen des Karstes. 1. Teil: Morphologisclies Material. Wien, *Abh. Geogr. Ges.* 5.
- Grund, A. (1903.): *Die Karsthydrographie. Studien aus Westbosnien*. Geogr. Abhandl. herausgegeben von A. Penck, VII, 3. Leipzig.
- Garašić, M. (1999.): Međunarodna speleoronilačka ekspedicija u Crveno jezero kraj Imotskog. *Hrvatska Vodoprivreda* VIII(78): 40-42.
- Garašić, M. (2000.): Speleološka istraživanja Crvenog jezera kraj Imotskog u Dinarskom kršu (Hrvatska). *Zbornik radova 2. hrvatskog geološkog kongresa. Cavtat /17.-20. 5. 2000.):* 587-590.
- Garašić, M. (2001.): New speleohydrogeological research of Crveno jezero (Red Lake) near Imotski in Dinaric karst area (Croatia, Europe). *Proceedings 13th International Congress of Speleology, Brasilia: 168-171.*
- Milanović, P. T. (1979.): *Hidrogeologija karsta i metode istraživanja*. Hidroelektrane na Trebišnjici Institut za korištenje voda na kršu, Trebinje.
- Mulec, J, Mihevc, A., Pipan, T. (2005.): Presihajoča jezera na Pivškem. *Acta Carsologica* 34(3): 543-565.
- Petrik, M. (1960.): Hidrografska mjerenja u okolici Imotskog. *Ljetopis JAZU* 64: 266-286
- Palandačić, A., Bonacci, O., Snoj, A. (2012.): Molecular data as a possible tool for tracing groundwater flow in karst: Example of *Delminichthys adspersus* in Dinaric karst system. *Ecohydrology* DOI: 10.1002/eco.269.
- Ravbar, N., Šebela, S. (2004.): The karst periodical lakes of Upper Pivka, Slovenia. *Acta Carsologica* 33(1): 159-173.
- Roglić, J. (1938.): Imotsko polje (Fizičko-geografske osobine). *Posebno izdanje geografskog društva* 21, Beograd.
- Roglić, J. (1954.): Polja zapadne Bosne i Hercegovine. *Zbornik radova III. kongresa geografa Jugoslavije*. Geografsko društvo NR BiH, Sarajevo.
- Ujević, A. (1991.): *Imotska krajina*. Matica hrvatska, Imotski

ANALYSIS OF THE NEWEST MEASUREMENTS CARRIED OUT IN MODRO JEZERO (BLUE LAKE) AT IMOTSKI

Abstract. The paper analyzes the results of hydrological measurements carried out in Modro jezero (Blue Lake) at Imotski in the period from 6 November 2009 at 10:26 p.m. to 4 September 2010 at 3:26 a.m. (a total of 7230 hourly data, or 302 full days). These were continuous measurements of the lake's water depth, water temperature and electrical conductivity. The measurements were carried out using the instrument CTD DIVER (Schlumberger Water Services). The instrument was placed on the lake's bottom, thus the measurements were continuously carried out in one point. The analyzed measurements represent the first systematic, continuous monitoring in this fascinating karst phenomenon. As part of hydrological processing, data on daily precipitation and mean daily air temperatures measured at the meteorological station Imotski were used. Mean hourly and mean daily flows into and out of the lake were defined. It was determined that the lake mostly recharges from a karst aquifer whose dimensions and characteristics have not been sufficiently studied.

Key words: karst hydrology, hydrological balance, water depth, water temperature, electrical conductivity, Modro jezero (Blue Lake)

ANALYSE VON LETZTEN MESSUNGEN IM BLAUEN SEE BEI IMOTSKI

Zusammenfassung. Im Artikel werden die Ergebnisse von hydrologischen Messungen analysiert, die im Blauen See (Modro jezero) bei Imotski im Zeitraum zwischen 6. November 2009, 22,26 Uhr und 4. September 2010, 3,26 Uhr (insgesamt 7230 Stundendaten) d.h. in 302 Tagen durchgeführt wurden. Das waren kontinuierliche Messungen des Wasserspiegels, der Wassertemperatur und elektrischer Leitfähigkeit, durchgeführt mit dem Instrument CTD DIVER (Schlumberger Water Services). Da das Instrument auf den Seegrund gelegt wurde, wurden die Messungen immer in einem Punkt durchgeführt. Die analysierten Messungen stellen die erste systematische und kontinuierliche Überwachung dieses faszinierenden Karstphänomens dar. Im Rahmen der hydrologischen Bearbeitung wurden auch die Daten über Tagesniederschlägen und mittleren Tageslufttemperaturen genutzt, die an der meteorologischen Station zu Imotski gemessen wurden. Die mittleren Stundenzuflüsse und die mittleren Tageszuflüsse in den Blauen See sowie die mittleren Stundenabflüsse und die mittleren Tagesabflüsse aus dem Blauen See wurden festgestellt. Es konnte auch festgestellt werden, dass das Wasser meistens aus dem Karstgrundwasserleiter zuströmt, dessen Dimensionen und Eigenschaften noch ungenügend erforscht sind.

Schlüsselwörter: Karsthydrologie, hydrologische Bilanz, Wasserspiegel, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, Blauer See (Modro jezero)