Prethodno priopćenje | *Preliminary report* | UDK: 556.5(497.5 Ombla) 556.5(497.5 Jadro)
Primljeno (Received): 14.04.2026.; Prihvaćeno (Accepted): 10.06.2026.

USPOREDBA TEMPERATURNIH REŽIMA KRŠKIH IZVORA JADRA I OMBLE: IMPLIKACIJE ZA DINAMIKU PODZEMNIH VODA I STRUKTURU VODONOSNIKA

dr. sc. Ognjen Bonacci, prof. emerit.
Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
Matice hrvatske 15, Split, Hrvatska
e-pošta: obonacci@gradst.hr

dr. sc. Tanja Roje-Bonacci, prof. emerit.
Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
Matice hrvatske 15, Split, Hrvatska

Rad se bavi usporednom analizom varijacija temperature vode dvaju najizdašnijih krških izvora u Hrvatskoj, Jadra i Omble. Cilj je utvrđivanje njihovih sličnosti i razlika te objašnjenja uzroka tih pojava. Analiza se temelji na kontinuiranim mjerenjima temperatura vode u razdoblju 2013. – 2021. Korištene su metode statistike poput linearne regresije i autokorelacije. Rezultati pokazuju da su prosječne višegodišnje temperature vode na oba izvora gotovo identične, što upućuje na slične osnovne klimatske uvjete u širem području Dinarskog krša. Međutim, utvrđene su značajne razlike u rasponu i varijabilnosti temperatura vode. Ombla pokazuje veće oscilacije i jači utjecaj temperature zraka, dok su kod Jadra amplitude manje. Uočen je sezonski karakter promjena temperature vode kod oba izvora, ali s vremenskim pomakom u odnosu na temperature zraka, osobito u pojavi maksimalnih i minimalnih vrijednosti. Sličnosti između izvora proizlaze iz njihove pripadnosti istom krškom sustavu i sličnom klimatskom režimu, dok su razlike posljedica različite strukture krških vodonosnika, dubine cirkulacije podzemne vode i intenziteta miješanja voda različitog podrijetla. Pritom je posebno naglašeno da temperatura vode djeluje kao prirodni traser koji integrira složene utjecaje površinskih i podzemnih procesa.

Ključne riječi: temperatura vode, temperatura zraka, izvor Omble, izvor Jadra

1. UVOD

Dinarski krš predstavlja jedinstveni i specifični okoliš. Njegovo područje i granice nisu precizno utvrđeni pa je stoga u literaturi moguće naići na različite podatke. Radi se o prostoru od oko 60.000 km^2. Dinarsko gorje je zapadni dio najvećeg niza krških lanaca na Zemlji ukupne dužine 6400 km (Bakalowicz 2015; Xanke i sur. 2024). Oko pedeset posto površine Hrvatske je krško područje. Dinarski krš ima veliku znanstvenu vrijednost u svjetskim razmjerima jer predstavlja klasični tip krša (lat. *locus tipicus*). Prvi je istraživani sustav tog tipa u svijetu i idealan primjer krša jer se odlikuje čitavim rasponom površinskih i podzemnih krških reljefnih oblika. Ujedno je i prostor gdje su razvijene prve teorije o cirkulaciji vode u krškim prostorima. Dinarski krš je prepoznata i u svijetu priznata priroda vrijednost bogata iznimnom geološko-hidrogeološkom i biološkom raznolikošću (Roglić 1976; Kranjc 2004).

Krški izvori koji na području Dinarskog krša predstavljaju izlaz bogatih krških vodonosnika na površinu, već tisućljećima pružaju neprocjenjivu korist ljudima i ekosustavima u tom, na prvi pogled, negostoljubivom prostoru. Razvoj bogate civilizacije na tim je prostorima izravno i duboko povezan s postojanjem i funkcioniranjem krških izvora. To se prije svega odnosi na priobalni dio Dinarskog krša koji

se prostire duž cijele istočne obale Jadranskog mora. U tom smislu osobito značajnu ulogu odigralo je i još uvijek igra nekoliko velikih krških izvora. Dva od njih, Jadro i Ombla, analizirana su u ovom radu. Ti izvori spadaju među vodom najbogatije u Dinarskom kršu, a ujedno su i najizdašniji u Hrvatskoj.

Izdašan krški izvor predstavlja izlaznu točku podzemne vode iz kompleksnoga integriranog krškog vodnog sustava (Kresic 2023). Taj sustav obuhvaća površinske i podzemne krške oblike koji snažno utječu na njegove hidrološke karakteristike. Dok su površinski oblici uglavnom uočljivi, oni podzemni su najčešće nepoznati.

Kontinuirana mjerenja i analize temperature vode u kršu omogućuju odgovore na brojna pitanja u vezi sa složenim procesima cirkulacije i skladištenja vode kako u krškome vodonosniku, tako i u površinskom dijelu sliva. Temperatura vode koja istječe iz krških izvora integrira utjecaje površinskih i podzemnih okoliša kroz koje se kreće i u kojima se zadržava. Zbog toga je analizom njenih varijacija u prostoru i vremenu moguće procijeniti odakle voda potječe te koliko se zadržava u podzemlju. Temperatura podzemne vode je interaktivni traser čija se vrijednost brzo mijenja u situacijama kada voda i okolni vodonosnik imaju različite temperature. Temperatura vode u kršu može se mjeriti u piezometrima i/ili bunarima, ali i na samim izvorima, odnosno na izlazu iz krškog vodonosnika. Fizički i geokemijski parametri podzemne vode koja na površinu izbija na krškim izvorima predstavljaju važan prirodni traser te služe kao pouzdani pokazatelji procesa koji se odvijaju na površini i u podzemlju svakog pojedinog sliva.

Na temperaturu vode izvora utječu brojni procesi, počevši od infiltracije s površine u podzemlje pa sve do njezina transportiranja kroz vodonosnik. Na temperaturu podzemne vode utječu temperatura punjenja, miješanje različitih voda koje proizlaze iz dotoka površinske i podzemne vode te utjecaj Zemljina geotermalnog gradijenta (Long i Gilcrease 2009). Kada voda s površine terena uđe u sustav vodonosnika i teče silaznom putanjom kroz matricu i krške provodnike različitih dimenzija, početna se temperaturna razlika smanjuje zbog izmjene topline na granici vode i stijene. Stupanj izmjene topline kontroliran je toplinskim svojstvima stijena i karakteristikama provodnika, kao što su njihova duljina, površina poprečnog presjeka i brzina protoka (Renner i Sauter 1997; Kaufmann i sur. 2014). Voda nastoji uspostaviti ravnotežnu temperaturu s okolnim stijenama i sedimentima putem konduktivnih i advektivnih procesa (Dogwiler i Wicks 2005). U kompleksnim krškim vodonosnicima, znatne promjene temperature vode pod različitim hidrološkim uvjetima posljedica su dotoka vode različitih karakteristika iz različitih dijelova područja prihranjivanja. Bundschuh (1997) je detaljno proučavao različite načine prijenosa topline koji se javljaju u krškom vodonosniku.

Cilj istraživanja provedenih u ovome radu bio je utvrditi sličnosti, ali i razlike u varijacijama temperature vode tih dvaju naših najizdašnijih krških izvora. Na temelju toga bit će moguće donijeti i zaključke o uzrocima utvrđenih sličnosti i razlika koje proizlaze iz položaja u prostoru, strukture krškog podzemlja te klimatskih i drugih svojstava lokacija na kojima su smješteni njihovi slivovi.

2. MATERIJALI I METODE

2.1. Izvor Jadra

Izvor rijeke Jadro (slika 1) nalazi se na zapadnom obronku Mosora, u naselju Majdan, na koti od 35 metara nadmorske visine (m n. v.). Iz njega se formira rijeka Jadro, koja do ušća u Jadransko more ima duljinu od 4318 m. Cijeli sliv izvora Jadra, kao i istoimena rječica predstavlja fenomen iznimne morfološke, pejzažne i fizionomske raznolikosti te bogatoga kulturnog, povijesnog i arheološkog nasljeđa (Kapelj i sur. 2012). Njegove vode već dulje od dva tisućljeća omogućuju razvoj civilizacije na širem prostoru, opskrbljujući visokokvalitetnom vodom brojna važna povijesna naselja (Marasović i Margeta 2017).



Slika 1: Karta s označenim položajima izvora Jadra i Omble

Na slici 2 prikazan je istraženi dio špiljskoga sustava izvora Jadra. Kao posljedica ekstremno složene krške geološko-hidrogeološke strukture analiziranog prostora i nedovoljnih istraživanja do sada nisu pouzdano definirane granice pa time ni površina sliva izvora Jadra. U literaturi je moguće naići na različite vrijednosti površine sliva koje su utvrđene različitim metodama, primjerice: (1) 450 km^2 (Denić-Jukić i Jukić 2003); (2) 396 km^2 (Jukić i Denić-Jukić 2009); (3) 502,5 km^2 (Kresic i Bonacci 2010).



Slika 2: Istraženi dio špiljskoga sustava izvora Jadra (Kapelj i sur. 2012)

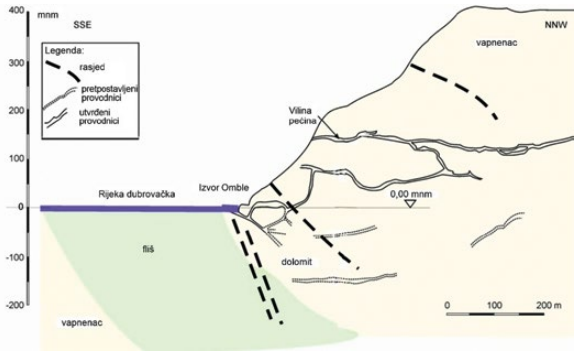
Prosječni protok izvora u razdoblju od 1995. do 2021.godine iznosio je 9,80 m^3/s. Kretao se u rasponu od minimalnih 6,8 m^3/s (2017. godine) do maksimalnih 13,7 m^3/s (2010. godine). Minimalni opaženi srednji dnevni protok iznosio je 3,65 m^3/s (2018. godine), dok je maksimalni iznosio 70,1 m^3/s (2004. godine). Niti jedan od tri niza karakterističnih godišnjih protoka (minimalnih, srednjih i maksimalnih) u razdoblju od 1995. do 2021. godine nije pokazao trend porasta ni opadanja (Bonacci i Roje-Bonacci 2023).

Bonacci i Roje-Bonacci (2023) analizirali su odnos temperature vode, električne vodljivosti i protoka izvora Jadra u razdoblju od 1. siječnja 2010. do 31. prosinca 2021. godine na tri vremenske skale (dan, mjesec, godina). Utvrdili su da je odnos između temperature vode i električne vodljivosti izravno proporcionalan, dok je odnos između temperature vode i protoka izvora obrnuto proporcionalan. Kako se protok izvora povećava, temperatura vode i električna vodljivost opadaju. Uzak raspon temperature vode i električne vodljivosti ukazuje na to da krški vodonosnik iz kojeg se napaja izvor nije pod izravnim utjecajem temperatura zraka te da se strujanje ne odvija kroz velike krške provodnike sa slobodnom vodenom površinom. Razina podzemne vode nalazi se duboko ispod površine terena, više od 200 m (Bonacci i sur. 2023a).

Bonacci i sur. (2023a) analizirali su razine podzemne vode, temperature podzemne vode i električne vodljivosti u tri duboke bušotine u slivu izvora Jadra, koje su praćene u razdoblju od listopada 2010. do prosinca 2021. godine. Maksimalna brzina porasta i opadanja razina podzemne vode pokazala je da se bušotine nalaze u vrlo različitim krškim okruženjima. Srednji godišnji protoci izvora Jadro izravno ovise o srednjim godišnjim razinama podzemne vode. Oko 99 % vremena razina podzemne vode u sve tri bušotine bila je dublje od 210 m ispod površine terena. Temperatura vode razlikuje se u sve tri bušotine. U dvije bušotine bliže izvoru ona se kreće u vrlo uskom rasponu, između 12,4 °C i 12,5 °C, dok u udaljenoj bušotini u središtu sliva varira između 13,2 °C i 13,4 °C. Srednja godišnja temperatura vode izvora varira u rasponu od 12,65 °C (2015. godine) i 12,99 °C (2013. godine), s prosječnom vrijednošću od 12,87 °C u razdoblju 2013. - 2021. Hod temperature vode izvora tijekom godine ima sezonski karakter.

2.2. Izvor Omble

Krški izvor Omble lociran je 5 km sjeverozapadno od središta grada Dubrovnika u mjestu Komolcu. Iz njega se grad Dubrovnik snabdijeva kvalitetnom pitkom vodom. Na slici 3 prikazan je presjek kroz mrežu utvrđenih, istraženih kao i nekoliko pretpostavljenih prostranih krških provodnika te špilja povezanih s izvorom Omble (Paviša 1998; Ravnik i Rajver 1998; Sever 2003; Roje-Bonacci i Bonacci 2013). Izvorsku zonu tvore tri duboka sifonska kanala s tri koncentrirana mjesta istjecanja koja su nazvana: (1) Glavni izvor; (2) Babe; (3) Crkvice. Procijenjeno je da iz Glavnog izvora istječe oko 80 % ukupne izdašnosti (Milanović, 2021). Hidrološka postaja započela je s radom 11. studenoga 1952. godine. Geografske koordinate vodokaza su: 42° 40′ 31″ N; 18° 08′ 14″ E. Kota nule vodokaza je 2377 m n. v.



Slika 3: Presjek kroz mrežu utvrđenih, istraženih i nekoliko pretpostavljenih prostranih krških provodnika i špilja povezanih s izvorom Omble (Paviša 1998; Sever 2003; Roje-Bonacci i Bonacci 2013)

Sam izvor se nalazi u Hrvatskoj, a najveći je dio sliva u Bosni i Hercegovini. Geološko-hidrogeološkim analizama Milanović (1996) je procijenio da površina sliva Omble iznosi oko 600 km^2. Koristeći hidrološku metodu bilance voda, Roje-Bonacci i Bonacci (2013) su utvrdili da je površina sliva Omble znatno veća te da se kreće između 900 km^2 i 1000 km^2. Oko 90 % sliva izgrađeno je od vrlo propusnih vapnenaca. Brojni krški površinski oblici i pretežno goli teren omogućavaju brzu infiltraciju vode s površine u podzemlje (Buljan i sur., 2000).

Ombla je izdašno uzlazno krško vrelo s prosječnim protokom od 26,2 m^3/s. Minimalni opaženi protok iznosio je 3,9 m^3/s, a maksimalni 117 m^3/s. U njegovoj se blizini nalaze tri značajnija krška izvora. Dva stalna izvora su Zaton i Zavrelje dok izvor Slavljan presušuje. Analize su pokazale da su sva tri izvora povezana s izvorom Omble. Pri visokim vodostajima podzemnih voda, kada protok Omble prijeđe vrijednost od 70 m^3/s dolazi do prelijevanja vode iz sliva Omble u slivove spomenutih izvora (Bonacci 1995). Izvor Omble predstavlja tipičan primjer krškog izvora s ograničenim kapacitetom maksimalnog istjecanja.

Bonacci i sur. (2023b) analizirali su satne podatke mjerenja temperature vode izvora Omble mjerene u razdoblju od 1. siječnja 2007. u 0:00 sati do 31. prosinca 2021. u 23:00 sata. Utvrđeno je da unutar ovog razdoblja postoje dva podrazdoblja s različitim karakterističnim (minimalnim, prosječnim i maksimalnim) temperaturama vode. U prvom podrazdoblju, koje je trajalo od 1. siječnja 2007. u 0:00 sati do 24. siječnja 2012. u 8:00 sati, vrijednosti minimalne, prosječne i maksimalne temperature vode bile su: 12,5 °C; 13,8 °C i 15,0 °C. U drugom podrazdoblju, od 24. siječnja 2012. u 9:00 sati do 31. prosinca 2021. u 23:00 sata, došlo je do naglog pada karakterističnih temperatura čije su vrijednosti sada iznosile: 10,9 °C; 12,9 °C i 14,0 °C. Uzrok ovako naglog pada temperature vode nije utvrđen.

2.3. Korišteni podaci

U radu su analizirani nizovi satnih, srednjih dnevnih, mjesečnih i godišnjih temperatura vode izvora Jadra i Omble u razdoblju od 1. siječnja 2013. u 0:00 sati do 31. prosinca 2021. u 24:00 sata. Mjerenja su vršena instrumentom THALIMEDES tvrtke OTT, digitalnim senzorom za mjerenje temperature vode te dojavnim sustavom ADOS.

Osim toga, u radu su korišteni i podaci o mjesečnim oborinama mjerenima u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021. na tri postaje u Hrvatskoj (Sinj, Imotski i Ričice) koje se nalaze u širem prostoru regije izvora Jadra kao i na postaji Trebinje koja se nalazi u slivu izvora Omble. Podaci o mjesečnim oborinama s tri postaje (Sinj, Imotski i Ričice) osrednjeni su za svaki pojedini mjesec u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021. Oni predstavljaju oborinski režim šire regije sliva Jadra i u ovom su članku označeni kao *TZ1*, dok se podaci iz Trebinja odnose na sliv Omble i označeni su kao *TZ2*.

2.4. Korištene metode

Metoda linearne regresije korištena je sa svrhom da se kvantitativno izrazi povezanost između zavisne i nezavisne varijable i odredi trend analiziranog vremenskog niza. Jednadžba pravca regresije (linearnog trenda) glasi:

$$Y = (A \times t) + B$$

Pri čemu Y predstavlja vrijednost analiziranog parametra u godini t, dok su A i B koeficijenti linearne regresije koji se izračunavaju metodom najmanjih kvadrata. Koeficijent A predstavlja nagib pravca regresije. U slučaju analize trenda vremenske serije njegova je dimenzija izražena u °C tijekom analiziranog vremena. On predstavlja indikator prosječnog intenziteta trenda podizanja ili opadanja vrijednosti analiziranog vremenskog niza.

Metodom linearne regresije analizirani su odnosi između prosječnih mjesečnih temperatura vode izvora Jadra i Omble u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021. Za sve su analizirane odnose izračunate i u radu navedene vrijednosti koeficijenata determinacije R^2.

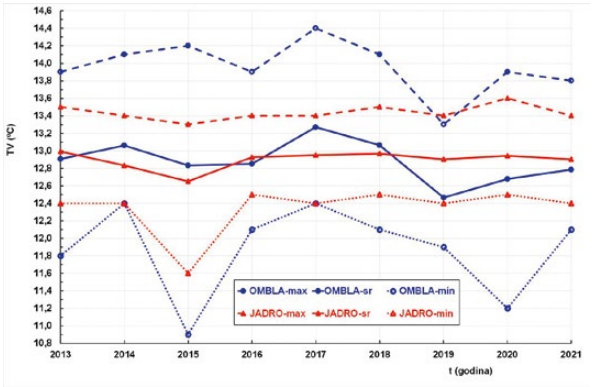
Za razliku od korelacije, koja predstavlja matematički postupak za objašnjavanje povezanosti između dvije slučajne varijable, autokorelacijom se izučava međusobna povezanost analizirane slučajne varijable sa zaostalim vrijednostima same sebe. Autokorelacija analizira zavisnost tekuće vrijednosti neke veličine o njezinim ranijim vrijednostima. Riječ je o matematičkoj funkciji koja omogućuje ustanoviti koliko podaci određenog razdoblja ovise o istim podacima iz prethodnih razdoblja (ΔT). U ovom su radu izračunati nizovi autokorelacije za mjesečne vrijednosti temperatura vode oba analizirana izvora te za mjesečne temperature zraka tri postaje na širem području sliva Jadra u Hrvatskoj (*TZ1*) i temperature zraka u Trebinju, (*TZ2*).

Pri analizi trendova vremenskih nizova kao i pri računanju pravaca regresije između dva parametra, izračunate su i vrijednosti koeficijenata determinacije R^2. Koeficijent determinacije predstavlja kvadrat koeficijenta korelacije R. Koeficijent determinacije smatra se sumarnom mjerom koja pokazuje koliko dobro u regresiji jedna varijabla objašnjava varijaciju druge varijable, odnosno, koliko se dobro pravac regresije prilagođava podacima. Vrijednost koeficijenta determinacije izražava postotak mjerenih podataka koji su najbliže podešenoj liniji. Na primjer, koeficijent determinacije R^2=0,70 ukazuje na to da 70 % podataka odgovara regresijskom modelu. Općenito, više vrijednosti koeficijenata korelacije i koeficijenata determinacije označavaju bolju prilagodbu modela. Treba napomenuti da ni koeficijent determinacije ni koeficijent korelacije sami po sebi ne govore ništa o uzročnosti između analiziranih parametara.

Izračunate su krivulje trajanja satnih temperatura vode izmjerenih na izvorima Jadro i Ombla u razdoblju od 1. siječnja 2013. u 0:00 sati do 31. prosinca 2021. u 24:00 sata. Krivulja trajanja predstavlja način organiziranja podataka analiziranog parametra u grafički prikaz koji daje procjenu dijela vremena u kojem je protok jednak nekoj vrijednosti od interesa ili je premašuje. Krivulja trajanja kumulativna je krivulja koja pokazuje postotak vremena u razmatranom razdoblju, tijekom kojega je analizirani parametar bio jednak određenoj vrijednosti ili veći od nje, bez obzira na kronološki slijed (Vogel i Fennessey 1995).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 4 prikazani su nizovi karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) godišnjih vrijednosti temperatura vode izvora Jadra (crvena boja) i izvora Omble (modra boja), u razdoblju devetogodišnjega zajedničkog rada od 2013. do 2021. godine.



Slika 4: Nizovi karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) godišnjih vrijednosti temperatura vode izvora Jadra i Omble u razdoblju od 2013.do 2021.

Analiza nizova karakterističnih godišnjih temperatura vode izvora Jadra i Omble pokazuje da oba izvora imaju vrlo slične srednje godišnje temperature, što ukazuje

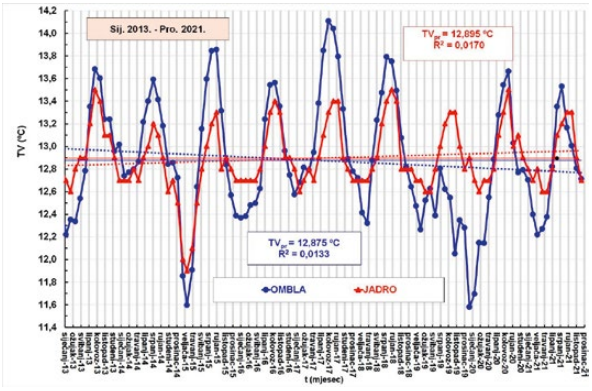
na usporedive osnovne hidrogeološke i klimatske uvjete njihovih slivova. Međutim, Ombla pokazuje veći raspon između minimalnih i maksimalnih vrijednosti te izraženiju varijabilnost u odnosu na Jadro. To upućuje na jači utjecaj površinskih i klimatskih čimbenika te na bržu izmjenu voda u sustavu Omble, dok Jadro karakterizira stabilniji režim s dominantnim utjecajem dubljih i termički uravnoteženijih podzemnih tokova.

U tablici 1 navedene su karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) vrijednosti temperatura vode izvora Jadra i Omble izmjerene u razdoblju od 1. siječnja 2013. u 0:00 sati do 31. prosinca 2021. u 24:00 sata. Vidljivo je da su prosječne temperature vode u analiziranom razdoblju na oba izvora bile gotovo identične. Raspon temperatura vode Jadra iznosio je 2,0 °C te je bio znatno manji od raspona temperatura vode Omble, koji je iznosio 3,4 °C. Vrijednost standardne devijacije za izvor Jadra iznosi 0,306 °C i znatno je niža od one za izvor Omble, koja iznosi 0,565 °C.

Tablica 1: Karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) vrijednosti temperatura vode izvora Jadra i Omble izmjerene u razdoblju od 1. siječnja 2013. u 0:00 sati do 31. prosinca 2021. u 24:00 sata

TV (°C)	Jadro	Ombla
minimum	11,6	10,9
prosjek	12,9	12,9
maksimum	13,6	14,4
St. devijacija	0,306	0,565

Na slici 5 prikazani su nizovi srednjih mjesečnih vrijednosti temperatura vode izvora Jadra i Omble, tijekom 108 mjeseci zajedničkog rada u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021.



Slika 5: Nizovi srednjih mjesečnih vrijednosti temperatura vode izvora Jadra i izvora Omble, tijekom 108 mjeseci zajedničkog rada u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021.

Analiza nizova srednjih mjesečnih temperatura vode izvora Jadra i Omble pokazuje da oba izvora imaju izražen sezonski režim, ali bez statistički značajnog dugoročnog trenda. Temperatura vode izvora Jadra pokazuje blagu, ali neznačajnu tendenciju porasta, dok Ombla pokazuje neznačajan trend opadanja. Uočena su i kratkotrajna odstupanja, osobito na izvoru Omble, gdje se javljaju epizode značajno nižih temperatura u odnosu na uobičajene vrijednosti. Takvo ponašanje upućuje na veću osjetljivost sustava Omble na promjene u uvjetima prihranjivanja i na klimatske anomalije, dok Jadro pokazuje stabilniji temperaturni režim, vjerojatno zbog većeg udjela dubokih i termički homogeniziranih podzemnih tokova.

Tablica 2 prikazuje matricu koeficijenata determinacije R^2 između nizova mjesečnih temperatura vode Jadra (*TVJ*), temperatura vode Omble (*TVO*), temperatura zraka tri postaje (*TZ1*), temperatura zraka u Trebinju (*TZ2*) i protoka Jadra (*QJ*) u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021. Što se tiče protoka izvora Omble on nije analiziran budući da od 2015.godine nadalje Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) više ne obavlja mjerenja na tom izvoru.

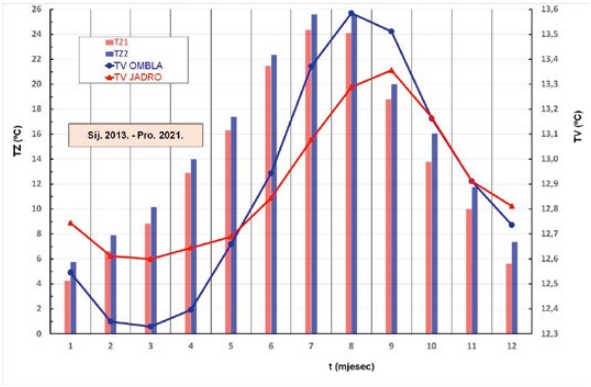
Crvenom su bojom označene vrijednosti u slučajevima kada su parametri obrnuto proporcionalni.

Rezultati prikazani u Tablici 2 ukazuju na umjerenu povezanost između temperatura vode izvora Jadra i Omble (R^2 = 0,562), što potvrđuje utjecaj zajedničkih klimatskih čimbenika, ali i prisutnost lokalnih hidrogeoloških razlika. Korelacije između temperatura vode i temperatura zraka (R^2 = 0,325–0,428) su relativno slabe do umjerene, što upućuje na ograničen izravan utjecaj atmosferskih uvjeta na temperaturni režim izvora, posebno kod Jadra. Niska povezanost između protoka i temperature vode ($R^2 \leq 0,22$) sugerira da promjene protoka ne predstavljaju dominantan kontrolni faktor za temperaturne varijacije, već su one primarno uvjetovane unutarnjom strukturom i dinamikom krškog vodonosnika.

Slika 6 prikazuje nizove prosječnih mjesečnih temperatura vode izvora Jadra (crvena boja) i izvora Omble (modra boja) u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021. (108 mjeseci). U obliku histograma prikazane su prosječne mjesečne temperature zraka u regiji u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021. (108 mjeseci) izmjerene na tri postaje (*TZ1*) i na postaji Trebinje (*TZ2*). Minimalne vrijednosti se javljaju u ožujku na oba izvora dok se maksimalne vrijednosti na izvoru

Tablica 2: Matrica koeficijenata determinacije *R2* između nizova mjesečnih temperatura vode Jadra *(TVJ)*, temperatura vode Omble (*TVO*), temperatura zraka tri postaje (*TZ1*), temperatura zraka u Trebinju (*TZ2*) i protoka Jadra (*QJ*) u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021.

R^2	TVJ	TVO	TZ1	TZ2	Q
TVJ	1	0,562	0,382	0,325	0,224
TVO		1	0,428	0,371	0,161
TZ1			1	0,985	0,387
TZ2				1	0,370
Q					1



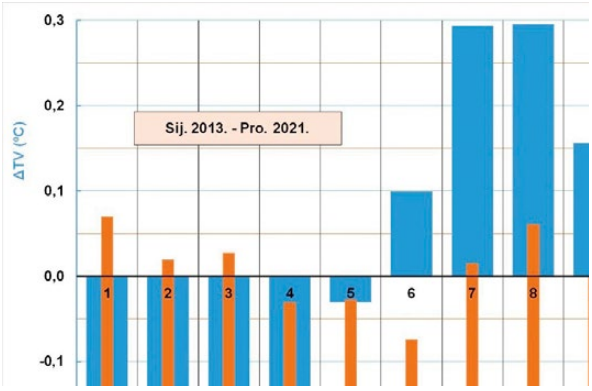
Slika 6: Nizovi prosječnih mjesečnih temperatura vode izvora Jadra i izvora Omble te zraka na tri postaje u slivu Jadra (*TZ1*) i na postaji Trebinje u slivu Omble (*TZ2*) u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021.

Omble javljaju mjesec dana ranije, u kolovozu, nego na Jadru kod kojeg se javljaju u rujnu.

Analiza odnosa srednjih mjesečnih temperatura vode izvora Jadra i Omble te temperatura zraka pokazuje da oba izvora imaju jasno izražen sezonski temperaturni režim koji prati godišnji hod temperature zraka. Minimalne vrijednosti temperature vode javljaju se u kasnu zimu, dok se maksimalne javljaju u ljetno-jesenskom razdoblju, uz uočljiv vremenski pomak između ova dva izvora.

Utjecaj temperature zraka izraženiji je na izvoru Omble, što upućuje na bržu i izravniju vezu između površinskih i podzemnih voda, dok Jadro pokazuje prigušeniji odgovor i veću termičku stabilnost. To ukazuje na razlike u strukturi i dubini cirkulacije unutar krških vodonosnika, pri čemu Jadro karakterizira veći udio dubokog toka, a Omblu veći udio brzih i plićih dotoka.

Histogrami prosječnih razlika srednjih mjesečnih temperatura vode između dva analizirana izvora (ΔTV) i srednjih mjesečnih temperatura zraka (ΔTZ=TZ2-TZ1) prikazani su na slici 7. Važno je uočiti da su prosječne mjesečne temperature zraka u Trebinju uvijek nešto više nego na tri postaje koje su smještene sjevernije, bliže izvoru Jadra. Najveća je razlika u listopadu, a najmanja u lipnju. Prosječne mjesečne temperature vode Jadra bile su više od temperatura vode Omble u razdoblju od prosinca do travnja. U razdoblju od lipnja do rujna



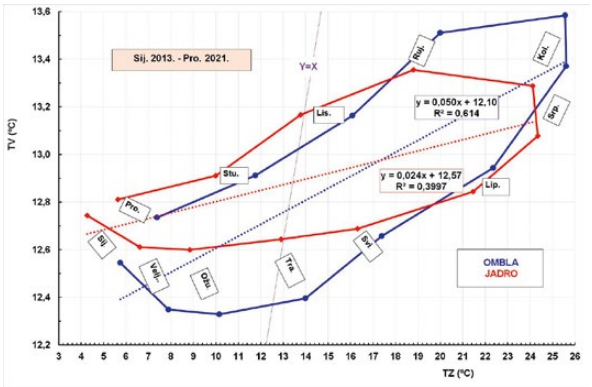
Slika 7: Histogrami prosječnih razlika srednjih mjesečnih temperatura vode između dva analizirana izvora ΔTV i srednjih mjesečnih temperatura zraka ΔTZ=TZ2-TZ1

temperature vode Jadra bile su niže od temperatura vode Omble. U svibnju, listopadu i studenome bile su gotovo identične. Prikazi na slikama 6 i 7 ukazuju na to da su temperature vode oba izvora pod utjecajem temperatura zraka. Taj se utjecaj izravnije odnosi na temperaturu vode Omble nego Jadra.

Analiza histograma razlika srednjih mjesečnih temperatura vode između izvora Jadra i Omble te razlika temperatura zraka, prikazanih na slici 7, pokazuje jasan sezonski obrazac u međusobnom odnosu ova dva sustava. U hladnijem dijelu godine temperature vode Jadra više su od temperatura Omble, dok je u toplijem dijelu godine odnos obrnut. Takva izmjena odražava različitu dinamiku reakcije izvora na sezonske promjene temperature zraka.

Istodobno, razlike u temperaturama zraka između slivova pokazuju da je područje Omble toplije, što dodatno pojačava sezonske kontraste u temperaturi vode. Dobiveni rezultati potvrđuju da je utjecaj atmosferskih uvjeta izraženiji na izvoru Omble, dok Jadro pokazuje veću termičku inerciju. To ukazuje na jaču povezanost Omble s površinskim procesima i plićim tokovima, nasuprot stabilnijem i dubljem režimu cirkulacije u slivu Jadra.

Ponašanje odnosa prosječnih temperatura vode i temperatura zraka tijekom 12 mjeseci u godini unutar razmatranog razdoblja (siječanj 2013. – prosinac 2021.) moguće je jasnije uočiti iz grafičkog odnosa koji je prikazan na slici 8. Na njoj je crvenom bojom prikazan odnos između prosječnih mjesečnih temperatura vode izvora Jadra (os ordinate) i prosječne mjesečne temperature zraka u regiji *TZ1* (os apscise) u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021. Modrom bojom je ucrtan odnos prosječnih mjesečnih temperatura vode izvora Omble (os ordinate) i prosječne mjesečne temperature zraka u Trebinju *TZ2* (os apscise) u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021.



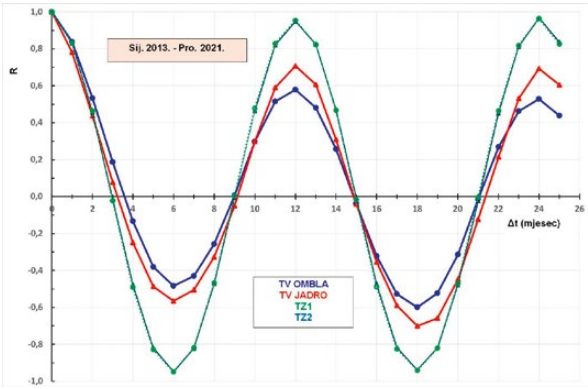
Slika 8: Odnosi između prosječnih mjesečnih temperatura vode i temperatura zraka dva analizirana izvora u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021.

Analiza odnosa između srednjih mjesečnih temperatura vode izvora i temperatura zraka pokazuje da između ovih varijabli postoji pozitivna povezanost u oba analizirana sustava, ali s različitim intenzitetom. Veća raspršenost i nagib regresijskog odnosa kod izvora

Omble ukazuju na snažniji i izravniji utjecaj temperature zraka na temperaturu vode, dok je kod Jadra taj odnos slabiji i prigušeniji.

Ovakva razlika potvrđuje da Ombla brže reagira na promjene atmosferskih uvjeta zbog većeg udjela brzih i plićih tokova, dok Jadro pokazuje veću termičku stabilnost i inerciju, što je posljedica dominantnog utjecaja dublje cirkulacije i intenzivnije izmjene topline s okolnim stijenama.

Autokorelogrami nizova srednjih mjesečnih temperatura vode izvora Jadra (modra boja) i Omble (crvena boja) te temperatura zraka tri postaje (*TZ1*) i temperature zraka u Trebinju (*TZ2*) u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021. prikazani su na slici 9.



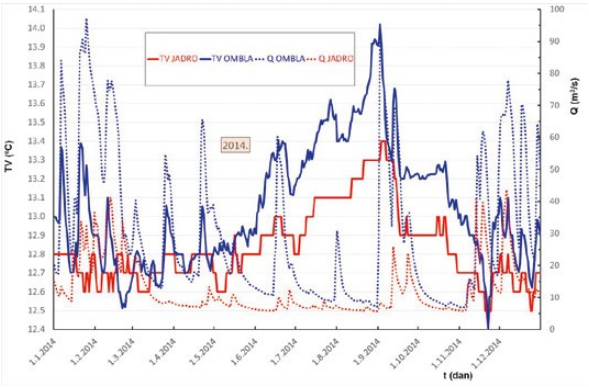
Slika 9: Autokorelogrami nizova srednjih mjesečnih temperatura vode izvora Jadra i Omble te temperatura zraka tri postaje (*TZ1*) i temperature zraka u Trebinju (*TZ2*), u razdoblju od siječnja 2013. do prosinca 2021.

Analiza autokorelograma nizova srednjih mjesečnih temperatura vode i zraka pokazuje izražen sezonski signal kod svih analiziranih varijabli, što potvrđuje dominantan utjecaj godišnjeg ciklusa. Autokorelacija je veća kod temperatura zraka nego kod temperatura vode, što ukazuje na veću unutarnju konzistentnost i periodičnost atmosferskog sustava.

Uočeno je da su autokorelogrami temperatura zraka gotovo identični za oba područja, što potvrđuje sličnost klimatskih uvjeta, dok se razlike između izvora očituju u jačini autokorelacije temperatura vode. Izvor Jadro pokazuje veću unutarnju povezanost i stabilnost temperaturnog režima, dok je kod Omble ta povezanost slabija, što upućuje na složeniji i dinamičniji sustav, s izraženijim utjecajem promjenjivih uvjeta prihranjivanja.

Na slici 10 su ucrtani nizovi srednjih dnevnih temperatura vode izvora Jadra (puna crvena linija, TVJ) izvora Omble (puna modra linija, TVO), protoka izvora Jadra (točkasta crvena linija, QJ) i izvora Omble (točkasta modra linija, QO) u razdoblju od 1. siječnja do 31. prosinca 2013. Uočava se sličnost ponašanja nizova temperatura zraka na oba analizirana izvora.

Analiza srednjih dnevnih temperatura vode izvora Jadra i Omble u 2013. godini pokazuje da Jadro ima znatno uži raspon temperatura i strmiju krivulju, što upućuje na stabilan i termički homogen sustav s ograničenim varijacijama. Nasuprot tome, Ombla

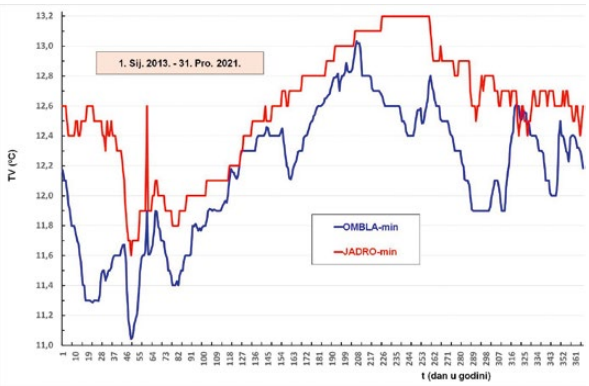


Slika 10: Nizovi srednjih dnevnih temperatura vode i protoka izvora Jadra i Omble u razdoblju od 1. siječnja do 31. prosinca 2013.

pokazuje širi raspon temperatura i blažu krivulju trajanja, što odražava veću varijabilnost i učestaliju pojavu ekstremnijih temperaturnih vrijednosti. Ovakve razlike potvrđuju da je Jadro dominantno pod utjecajem dublje cirkulacije i intenzivne izmjene topline sa stijenama, dok je Ombla pod većim utjecajem brzih i heterogenih dotoka vode različitih temperaturnih karakteristika.

Ponašanje srednjih dnevnih protoka izvora Jadra i Omble pokazuje izrazite razlike u dinamici hidrološkog odziva. Protok Omble karakterizira naglašena varijabilnost s čestim i brzim porastima i padovima, što upućuje na dominantan utjecaj brzih i plitkih tokova te izravnu povezanost s epizodama prihranjivanja. Nasuprot tome, protok Jadra pokazuje znatno ujednačeniji i zaglađeniji hod, s manjim amplitudama oscilacija, što ukazuje na veći utjecaj sporijih i dubljih podzemnih tokova te izraženu hidrološku inerciju sustava. Usporedba jasno pokazuje da Ombla funkcionira kao hidraulički "brži" i reaktivniji sustav, dok Jadro predstavlja stabilniji i reguliraniji vodonosnik u kojem se ekstremni događaji ublažavaju tijekom podzemnog toka.

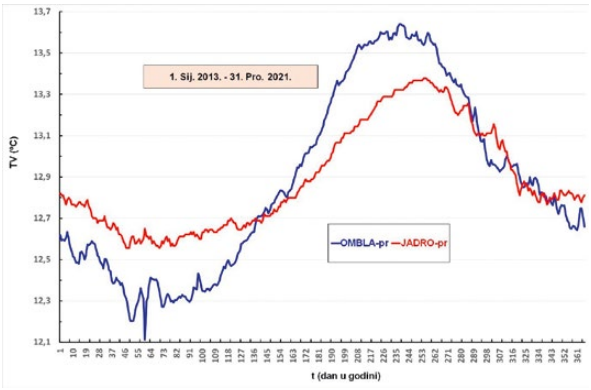
Nizovi minimalnih, prosječnih i maksimalnih dnevnih temperatura vode izvora Jadra (crvena boja) i izvora Omble (modra boja) izmjereni u razdoblju od 1. siječnja 2013. do 31. prosinca 2021. prikazani su na slikama 11 (minimalni), 12 (prosječni srednje dnevni) i 13 (maksimalni). Minimalne dnevne temperature vode Jadra gotovo su u svim danima godine bile više od onih na izvoru Omble. Samo tijekom sedam dana su



Slika 11: Niz minimalnih dnevnih temperatura vode izvora Jadra i Omble u razdoblju od 1. siječnja 2013. do 31. prosinca 2021.

minimalne dnevne temperature Omble bile više od onih na Jadru. Prosječne dnevne temperature vode Omble bile su više od prosječnih temperatura Jadra 181 dan, a niže 185 dana u godini. Maksimalne dnevne temperature vode Omble bile su više ili jednake od onih na Jadru 324 dana, a niže samo 42 dana.

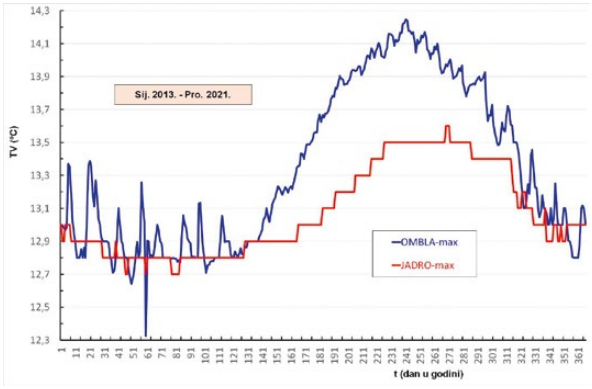
Analiza prikaza na slici 11 potvrđuje da temperaturni režim izvora Jadra i Omble odražava složenu interakciju klimatskih utjecaja i unutarnje strukture krških vodonosnika. Uočene razlike između izvora proizlaze iz različite dubine i organizacije podzemne cirkulacije, pri čemu Jadro pokazuje stabilniji i homogeniji temperaturni odziv, dok Ombla pokazuje izraženiju varijabilnost i veću osjetljivost na promjene u uvjetima prihranjivanja. Rezultati dodatno ukazuju na to da temperatura vode integrira utjecaje različitih komponenti sustava te može poslužiti kao pouzdan indikator dominantnih hidroloških procesa, posebno u pogledu odnosa između brzih površinskih dotoka i sporije, duboke cirkulacije unutar krškog vodonosnika.



Slika 12: Niz srednjih dnevnih temperatura vode izvora Jadro i Ombla u razdoblju od 1. siječnja 2013. do 31. prosinca 2021.

Analiza rezultata prikazanih na slici 12 potvrđuje da su razlike u temperaturnim režimima izvora Jadra i Omble posljedica kombiniranog djelovanja klimatskih uvjeta i unutarnje organizacije krškog vodonosnika. Uočena ponašanja ukazuju na to da Ombla pokazuje izraženiju osjetljivost na promjene u uvjetima prihranjivanja i brže reagira na vanjske utjecaje, dok Jadro zadržava stabilniji i prigušeniji odziv. Dobiveni rezultati dodatno potvrđuju da temperatura vode pouzdano reflektira dominantne procese cirkulacije, pri čemu veća varijabilnost upućuje na značajniji udio brzih i plićih tokova, a stabilniji režim na dominaciju duboke i termički uravnotežene cirkulacije.

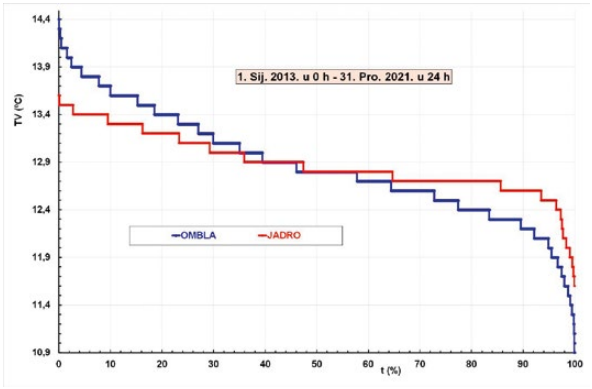
Analiza rezultata prikazanih na slici 13 ukazuje da temperaturni odziv izvora Jadra i Omble dodatno potvrđuje njihovu različitu hidrogeološku organizaciju i dinamiku cirkulacije. Jadro pokazuje ujednačeniji i stabilniji temperaturni režim, dok Ombla iskazuje veću raspršenost i varijabilnost, što upućuje na snažniji utjecaj promjenjivih uvjeta prihranjivanja. Ovakvo ponašanje potvrđuje da Ombla ima veći udio brzih i heterogenih tokova s izraženijom interakcijom s površinskim



Slika 13: Niz maksimalnih dnevnih temperatura vode izvora Jadra i Omble u razdoblju od 1. siječnja 2013. do 31. prosinca 2021.

procesima, dok Jadro karakterizira dominantna duboka cirkulacija i veća termička homogenizacija. Time se dodatno naglašava uloga temperature vode kao integriranog pokazatelja složenih hidroloških procesa u krškim sustavima.

Znatno veći raspon temperature zabilježen na izvoru Omble u odnosu na izvor Jadra odražava temeljne razlike u njihovu hidrogeološkom funkcioniranju. Ombla se odlikuje dominantnim udjelom brze, plitke cirkulacije podzemne vode kroz dobro razvijene krške kanale, što omogućuje brz prijenos temperaturnog signala iz atmosfere u akviferski sustav. Posljedično, temperatura izvorske vode izravnije reagira na kratkoročne i sezonske promjene temperature zraka i uvjeta napajanja. Nasuprot tome, izvor Jadro u većoj je mjeri napajan dubljim i sporijim komponentama podzemnog toka, pri čemu dulje vrijeme zadržavanja omogućuje termičku ravnotežu između vode i okolne stijenske mase. To rezultira stabilnijim toplinskim režimom s manjom varijabilnošću. Osim toga, veći kapacitet pohrane i izraženija toplinska inercija sliva Jadra dodatno prigušuju temperaturne oscilacije, dok Ombla, kao dinamičniji sustav s dominacijom kanalskog toka, pokazuje izraženije i brže toplinske promjene. Stoga uočene razlike u varijabilnosti temperature prvenstveno odražavaju relativni udio brzih i sporih komponenti toka te dubinu cirkulacije podzemne vode u odgovarajućim krškim sustavima.



Slika 14: Krivulje trajanja satnih vrijednosti temperatura vode izvora Jadra i Omble u razdoblju od 0:00 sati 1. siječnja 2013. do 24:00 sata 31. prosinca 2021.

Na slici 14 nalaze se krivulje trajanja satnih vrijednosti temperatura vode izvora Jadra (crvena boja) i izvora Omble (modra boja) izmjerenih u razdoblju od 0:00 sati 1. siječnja 2013. do 24:00 sata 31. prosinca 2021. (78.888 podataka).

Analiza prikaza na slici 14 potvrđuje da temperaturne karakteristike izvora Jadra i Omble odražavaju različite stupnjeve povezanosti između površinskih i podzemnih procesa unutar njihovih slivova. Jadro pokazuje stabilniji i konzistentniji temperaturni režim, što upućuje na dominantan utjecaj duboke i spore cirkulacije te učinkovitu termičku homogenizaciju u vodonosniku. Nasuprot tome, Ombla iskazuje veću varijabilnost i širi raspon temperatura, što ukazuje na značajniji doprinos brzih i heterogenih dotoka te jači utjecaj promjenjivih klimatskih uvjeta.

Ovi rezultati dodatno potvrđuju da se razlike u temperaturnom ponašanju mogu koristiti kao pouzdan indikator strukture i dinamike krških vodonosnika te stupnja njihove osjetljivosti na vanjske utjecaje.

4. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJE ANALIZE

Prethodno opisane analize ukazale su na sličnosti, ali i na određene razlike u ponašanju temperatura vode na dva najizdašnija priobalna krška izvora u Dinarskom kršu Hrvatske. Rezultati nedvojbeno pokazuju da na varijacije temperatura vode na oba izvora, međusobno udaljena zračnom linijom 167,2 km, značajnu ulogu igra temperatura zraka. Na različite raspone temperatura vode na oba izvoru ključan utjecaj imaju položaj, veličina slivova i njihove prirodne karakteristike (površina terena, geološka struktura, hidrogeološka svojstva itd.) te položaj razine vode u odnosu na površinu terena. Iako površine slivova nisu točno definirane, procijenjena površina sliva izvora Omble vjerojatno je duplo veća što bi također moglo utjecati na veće varijacije temperatura vode Omble.

Odstupanje od uobičajenog odnosa temperatura vode dva izvora koje se desilo u 2019, godini tek treba pouzdano objasniti. Razlozi mogu biti različiti, od onih prirodnih do onih uzrokovanih ljudskim djelatnostima. Moguće je da su se pojavile lokalne promjene temperature zraka i oborina prije svega na prostranijem slivu Omble. Ne smije se zanemariti ni utjecaj potresa koji su u regiji Omble relativno češći i jači nego u području Jadra (Cvijanović 1971; Herak i sur. 1988; Sović 1999; Herak i sur. 2001). Potresi mogu uzrokovati kratkotrajnu, ali i dugotrajnu promjenu puteva i karakteristika cirkulacije vode u krškom podzemlju (Carro i sur. 2005; Adinolfi i sur. 2012; Gosar i Brenčič 2013; Bonacci 2020; Di Matteo i sur. 2020). Ne treba zanemariti ni činjenicu da su u gornjim horizontima sliva Omble u to vrijeme bili izvođeni brojni veliki površinski i podzemni građevinski radovi, masovna miniranja i iskopi tunela. Oni su mogli uzrokovati ovu naglu i relativno kratkotrajnu promjenu temperature vode izvora Omble. Kako bi se moglo pouzdanije upravljati vrijednim vodnim resursima ova dva izvora, bit će potrebno postaviti stalnu mrežu motrenja raznih parametara.

Provedena usporedna analiza temperaturnih režima dva najizdašnija krška izvora u Hrvatskoj, Jadra i Omble, potvrdila je da temperatura vode predstavlja izuzetno informativan i pouzdan prirodni traser složenih hidroloških procesa u krškim vodonosnicima. Dobiveni rezultati jasno ukazuju na istovremeno postojanje sličnosti i razlika koje proizlaze iz zajedničkog klimatskog okvira, ali i specifične unutarnje organizacije svakog pojedinog sustava.

Utvrđeno je da oba izvora imaju gotovo identične srednje godišnje temperature vode te izražen sezonski karakter, što potvrđuje dominantan utjecaj regionalnih klimatskih uvjeta. Međutim, razlike u amplitudama, varijabilnosti i dinamici odziva ukazuju na bitne razlike u strukturi i funkcioniranju njihovih krških vodonosnika. Izvor Jadra karakterizira stabilniji i termički homogeniji režim, s manjim rasponom temperatura i slabijim utjecajem atmosferskih uvjeta, što upućuje na dominantnu ulogu duboke cirkulacije i intenzivne izmjene topline sa stijenama. Nasuprot tome, izvor Ombla pokazuje veću varijabilnost i osjetljivost na promjene temperature zraka, što ukazuje na značajniji udio brzih i plićih tokova te heterogenije uvjete prihranjivanja.

Analize su također pokazale da temperatura vode Omble reagira brže i izravnije na promjene temperature zraka, dok Jadro pokazuje izraženiju termičku inerciju. Uočene anomalije u temperaturnom režimu Omble dodatno potvrđuju složenost i dinamičnost tog sustava, kao i njegovu potencijalnu osjetljivost na kratkotrajne klimatske i hidrološke promjene. Istodobno, visoka razina stabilnosti Jadra ukazuje na snažnu unutarnju povezanost i reguliranost njegova sustava.

Dobiveni rezultati imaju važne znanstvene i praktične implikacije. S jedne strane, potvrđuju da analiza temperature vode može poslužiti kao učinkovito sredstvo za identifikaciju dominantnih tokova i procjenu dubine cirkulacije u krškim vodonosnicima. S druge strane, ukazuju na različit stupanj ranjivosti analiziranih izvora na klimatske promjene i ekstremne hidrološke događaje.

Budući da obadva u ovom članku analizirana krška izdašna izvora imaju golemu ekološku, ekonomsku i socijalnu vrijednost, neophodno je intenzivirati njihova sveobuhvatna istraživanja. Današnja saznanja još su uvijek zabrinjavajuće nedostatna. Donošenje pouzdanih zaključaka mora biti zasnovano na kvalitetno organiziranim kontinuiranim interdisciplinarnim mjerenjima i analizama raznih klimatoloških, hidroloških, hidrogeoloških, hidrokemijskih, ekoloških i drugih parametara. Suvremena tehnologija pruža realnu mogućnost da se tako ambiciozni i važni zahvati i realno ostvare.

U kontekstu daljnjih istraživanja, nužno je proširiti postojeće analize u nekoliko ključnih smjerova. Prije svega, potrebno je integrirati temperaturne podatke

s drugim fizikalno-kemijskim pokazateljima, poput električne vodljivosti, izotopnog sastava i razina podzemnih voda. Nadalje, preporučuje se primjena numeričkih i konceptualnih modela za kvantitativnu procjenu tokova unutar vodonosnika.

Poseban naglasak treba staviti na istraživanje uzroka naglih promjena temperaturnog režima, poput onih uočenih na izvoru Omble. Također je nužno provoditi dugoročna, visokorezolucijska mjerenja radi pouzdanije detekcije trendova i ekstremnih događaja.

Konačno, dobiveni rezultati naglašavaju potrebu za interdisciplinarnim pristupom u istraživanju krških sustava, kroz sintezu hidrogeologije, klimatologije i geokemije, kako bi se omogućilo učinkovitije upravljanje tim osjetljivim resursima u uvjetima globalnih klimatskih promjena. ■

LITERATURA

Adinolfi, F. R.; Carucci, V.; Falgiani, A.; Manetta, M.; Parisse, B.; Petitta, M.; Rusi, S.; Spizzico, M.; Tallini, M. (2012). Changes on groundwater flow and hydrochemistry of the Gran Sasso carbonate aquifer due to the 2009 L'Aquila earthquake. *Italian Journal of Geosciences*, 131(3), 459-474. https//doi.org/10.3301/IJG.2012.05.

Bakalowicz, M. (2015). Karst and karst groundwater resources in the Mediterranean. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 5-14. https//doi.org/10.1007/s12665-015-4239-4

Bonacci, O. (1995). Ground water behaviour in karst: example of the Ombla Spring (Croatia). *Journal of Hydrology*, 165(1-4), 113-134. https//doi.org/10.1016/0022-1694(94)02577-X.

Bonacci, O. (2020). Potresi u kršu i njihov utjecaj na izvore i otvorene vodotoke. *Hrvatska Vodoprivreda*, XXVIII(231),17-21.

Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. (2023). Water temperature and electrical conductivity as an indicator of karst aquifer: the case of Jadro Spring (Croatia). *Carbonates and Evaporites*, 38, 55. https://doi.org/10.1007/s13146-023-00881-x.

Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T.; Vrsalović, A. (2023a). Different groundwater behaviour in deep karst boreholes: the case of Jadro spring basin (Dinaric karst, Croatia). *Acque Sotterranee*, 12(4), 59-69. https://doi.org/10.7343/as-2023-682.

Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T.; Vrsalović, A.; Kuk, K. (2023b). What happened to the karst spring Ombla water temperature? *Carbonates and Evaporites*, 38, 68. https://doi.org/10.1007/s13146-023-00881-x.

Buljan, R.; Prelogović, E.; Paviša, T. (2000). Izvorište Ombla. *Zbornik radova 2. hrvatskog geološkog kongresa* (ur. Vlahović, I.; Biondić, R.) Institut za Geološka Istraživanja, Zagreb. 555-560.

Bundschuh, J. (1997). Temporal variations of spring water temperatures in relation to the extents of the heat transport modes occurring in the karstified lower Gypsum-Keuper aquifer (Karnian, southern Germany U: *Proceedings of the 6th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media* (ur. Jeannin, P. Y.) La Chaux-de-Fonds, Switzerland, 129–132.

Carro, M.; De amicis, M.; Luzi, L. (2005). Hydrogeological changes related to the Umbria–Marche Earthquake of 26 September 1997 (Central Italy). *Natural Hazards*, 34(3), 315-339. https//doi.org/10.1007/s11069-004-2074-0.

Cvijanović, D. (1971). Seizmičnost dubrovačkog područja (Dubrovnik region seismicity). *Acta Seismologica Iugoslavica*, 31–56.

Denić-Jukić, V.; Jukić, D. (2003). Composite transfer function for karst aquifers. *Journal of Hydrology*, 274(1-4), 80-94. https//doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00393-1.

Di Matteo, L.; Dragoni, W.; Azzaro, S.; Pauselli, C.; Porreca, M.; Bellina, G.; Cardaci, W. (2020). Effects of earthquakes on the discharge of groundwater systems: The case of the 2016 seismic sequence in the Central Apennines, Italy. *Journal of Hydrology*, 583, 124509. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124509.

Dogwiler, T.; Wicks, M. C. (2005). Thermal variations in the hyporheic zone of karst stream. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers,* 3(1), 1-11. https//doi.org/10.5038/1827-806X.35.2.1.

Gosar, A.; Brenčič, M. (2013). Possible relation between the sudden sinking of river Iška and the sequence of weak earthquakes in September–October 2010 near Iška Vas (Central Slovenia). *Acta Carsolologica*, https://doi.org/10.3986/ac.v41i2-3.563.

Herak, D.; Herak, M.; Prelogović, E.; Cabor, S. (1988). Some characteristics of the Adriatic Sea earthquake sequence (January-February 1986). *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, XXX(119-120), 385-394.

Herak, M.; Orlić, M.; Kunovec-Varga, M. (2001). Did the Makarska earthquake of 1962 generate a tsunami in the central Adriatic archipelago?, *Journal of Geodynamics*, 31(1), 71-86. https//doi.org/10.1016/S0264-3707(00)00018-1.

Jukić, D.; Denić-Jukić, V. (2009). Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 373(3-4), 302-315. https//doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.035.

Kapelj, S.; Kapelj, J.; Švonja, M. (2012). Hidrogeološka obilježja sliva Jadra i Žrnovnice. *Tusculum*, 5(1), 205-216.

Kaufmann, G.; Gabrovšek, F.; Romanov, D. (2014). Deep conduit flow in karst aquifers revisited. *Water Resources Research*, 50(6), 4821–4836. https//doi.org/10.1002/2014WR015314.

Kranjc, A. (2004). Dinaric karst. U: *Encyclopedia of caves and karst science* (ur. Gunn, J.) Fitzroy Dearborn, New York, 591-594.

Kresic, N. (2023). *Hydrogeology 101*. Blue Ridge Press LLC, Warrenton, VA, USA.

Kresic, N.; Bonacci, O. (2010). Spring discharge hydrograph. U: *Groundwater hydrology of springs, engineering, theory, management, and sustainability* (ur.

Kresic, N.; Stevanovic, Z.) Butterwrth-Heinemann/ Elsevier, New York, 129–164.
Long, A. J.; Gilcrease, P. C. (2009). A one-dimensional heat-transport model for conduit flow in karst aquifers. *Journal of Hydrology*, 378(3-4), 230–239. https// doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.024.
Marasović, K.; Margeta, J. (2017). A study of Roman water intake structures at the Jadro River's spring. *Vjesnik za Arheologiju i Historiju Dalmatinsku*, 110(2), 509-532
Milanovic, P. (1996). Ombla Spring, Croatia. *Environmental Geology*, 27(2), 105–107. https//doi.org/ 10.1007/ BF01061679.
Milanović, P. T. (2021). *Karst Istočne Hercegovine i dubrovačkog priobalja*. Bina, Banja Luka, Bosna i Hercegovina.
Paviša, T. (1998). Podzemna akumulacija u krškom terenu, *Hrvatska Vodoprivreda*, VII(66), 14–25.
Ravnik, D.; Rajver, D. (1998). The use of inverse geotherms for determining underground water flow at the Ombla karst spring near Dubrovnik, Croatia. *Journal of Applied Geophysics*, 39(3), 177–190. https// doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00026-3.
Renner, S.; Sauter, M. (1997). Heat as a natural tracer: Characterisation of a conduit network in a karst aquifer using temperature measurements of the spring water. U: *Karst Waters & Environmental Impacts* (ur. Günay, G.; Johnson, I.). Balkema, Rotterdam, 423–431.
Roglić, V. (1976). Socio-geografski aspekt dinarskog krša, dinarskog kulturnog areala i dinarskog brdsko-planinskog prostora. *Hrvatski Geografski Glasnik*, 38(1), 253-268.
Roje-Bonacci, T.; Bonacci, O. (2013). The possible negative consequences of underground dam and reservoir construction and operation in coastal karst areas: an example of the hydro-electric power plant (HEPP) Ombla near Dubrovnik (Croatia). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(8), 2041-2052. https//doi.org/10.5194/nhess-13-2041-2013.
Sever, Z. (2003). The Ombla HPP multipurpose project, *HYDRO 2003 conference proceedings* Cavtat, Hrvatska, 455–462
Sović, I. (1999). Croatian macroseismic database. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 24(6), 501-503. https://doi.org/10.1016/ S1464-1895(99)00061-7.
Vogel, R. N.; Fennessey, N. M. (1995). Flow duration curves ii: a review of applications in water resources planning. *Journal of American Water Association*, 31(6), 1029-1039. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03419.x.
Xanke, J.; Goldscheider, N.; Bakalowicz, M.; Barberá, J. A.; Broda, S.; Chen, Z.; Ghanmi, M.; Günther, A.; Hartmann, A.; Jourde, H.; Liesch, T.; Mudarra, M.; Petitta, M.; Ravbar, N.; Stevanović, Z. (2024). Carbonate rocks and karst water resources in the Mediterranean region. *Hydrogeology Journal*, 32(5), 1397–1418. https://doi.org/10.1007/s10040-024-02810-1.

A COMPARISON OF TEMPERATURE REGIMES OF THE JADRO AND OMBLA SPRINGS: IMPLICATIONS FOR GROUNDWATER AND AQUIFER STRUCTURE DYNAMICS

Abstract. The paper addresses a comparative analysis of water temperature variations of two highest yielding karst springs in Croatia, the Jadro and the Ombla, with the objective to determine their similarities and differences and explain the causes of these phenomena. The analysis is based on continuous measurements of water temperature in the 2013–2021 period. The statistical methods, such as linear regression and autocorrelation have been applied. The results show nearly identical average multiannual water temperatures in both springs, which indicates similar base climate conditions in the greater area of the Dinaric karst. However, a significant difference in the range and variability of water temperatures have been determined. The Ombla shows higher oscillations and a stronger impact of the air temperature, whereas the Jadro has lower amplitudes. A seasonal character of water temperature changes in both springs has been observed, although with a time shift regarding air temperatures, particularly with respect to the occurrences of maximum and minimum values. The similarities between the springs are derived from their association with the same karst system and a similar climate regime, while the differences are consequential to different structures of the karst aquifers, circulation depth of groundwater and mixing intensity of water with different origins. The fact that water temperature acts as a natural tracer that integrates the impacts of surface and subsurface processes is particularly emphasized.

Key words: water temperature, air temperature, Ombla spring, Jadro spring

VERGLEICH DER TEMPERATURVERHÄLTNISSE DER KARSTQUELLEN JADRO UND OMBLA: AUSWIRKUNGEN AUF DIE GRUNDWASSERDYNAMIK UND DIE AQUIFERSTRUKTUR

Zusammenfassung. Die Arbeit befasst sich mit einer vergleichenden Analyse der Wassertemperaturschwankungen in zwei der ergiebigsten Karstquellen Kroatiens, Jadro und Ombla. Das Ziel ist es, ihre Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu ermitteln und die Ursachen dieser Phänomene zu erklären. Die Analyse basiert auf kontinuierlichen Messungen der Wassertemperaturen im Zeitraum 2013–2021. Es wurden statistische Methoden wie lineare Regression und Autokorrelation eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die durchschnittlichen Wassertemperaturen über mehrere Jahre an beiden Quellen nahezu identisch sind, was auf ähnliche klimatische Grundbedingungen im weiteren Gebiet des Dinarischen Karstes hindeutet. Allerdings wurden signifikante Unterschiede im Wertebereich und in der Variabilität der Wassertemperaturen festgestellt. Ombla zeigt größere Schwingungen und einen stärkeren Einfluss der Lufttemperatur, während die Amplituden bei Jadro kleiner sind. In beiden Quellen wurde ein saisonaler Charakter der Wassertemperaturänderungen beobachtet, allerdings mit einer zeitlichen Verzögerung gegenüber den Lufttemperaturen, insbesondere bei den Maximal- und Minimalwerten. Die Ähnlichkeiten zwischen den Quellen ergeben sich aus ihrer Zugehörigkeit zum selben Karstsystem und einem ähnlichen Klimaregime, während die Unterschiede eine Folge der unterschiedlichen Struktur der Karstaquifere, der Tiefe der Grundwasserzirkulation und der Intensität der Vermischung von Wässern unterschiedlicher Herkunft sind. Besonders hervorgehoben wurde, dass die Wassertemperatur als natürlicher Indikator fungiert, der die Einflüsse von Oberflächen- und Untergrundprozessen integriert.

Schlüsselwörter: Wassertemperatur, Lufttemperatur, Ombla-Quelle, Jadro-Quelle