

ANALIZA ODUZIMANJA VODE IZ IZVORA JADRA U RAZDOBLJU 2010. - 2021.

dr. sc. Ognjen Bonacci, prof. emerit.

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

dr. sc. Tanja Roje-Bonacci, prof. emerit.

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

U članku su analizirani nizovi srednjih dnevnih, mjesečnih i godišnjih protoka Jadra mjereni na tri vodomjerne postaje (Jadro-Majdan, Jadro-Novu kanal, Jadro-Diokelecijanov kanal) u razdoblju od 1. siječnja 1995. do 31. prosinca 2021. Osnovni cilj istraživanja opisanih u ovom radu bio je da se usporede količine odvođenja vode iz izvora Jadra u vodoopskrbni sustav u razdoblju 1995. - 2009. s onima u recentnom razdoblju 2010. - 2021. U posljednjih 12 godina došlo je do pozitivnog pomaka, tj. iz izvora Jadra prosječno se godišnje bespovratno odvodi manje vode nego u razdoblju 1995. - 2009. Bitno je napomenuti da je trend opadanja u recentnom razdoblju statistički značajan. Važno je naglasiti da problemi i dalje postoje prvenstveno stoga jer se tijekom toplog razdoblja godine od lipnja do rujna situacija još uvijek nije bitno poboljšala. Ključan problem javlja se u srpnju i kolovozu tijekom kojih se još uvijek iz izvora odvodi više od 40 % vode. Realno je očekivati da će odvođenje, kao posljedica globalnog zagrijavanja temperature zraka u regiji, rasti u budućnosti. Tijekom ljetnog i beskišnog razdoblja intenzivirat će se pojave suša što bi moglo rezultirati ponovnim povećanjem odvođenja vode iz izvora Jadra. Neophodno je i dalje raditi na smanjivanju bespovratnog odvođenja vode iz izvora i stvaranju pouzdanog i održivog sustava upravljanja ovim neprocjenjivo vrijednim vodnim resursom.

Ključne riječi: izvor Jadra, odvođenje vode iz izvora, analiza trendova, Mann-Kendall test, t-test

1. UVOD

Izvor rijeke Jadro (slika 1) nalazi se na zapadnom obronku Mosora, u naselju Majdan, na koti 35 m nad morem (m n.v.). Iz njega se formira rijeka Jadro koja od izvora do ušća u Jadransko more ima dužinu od 4318 m (Bonacci, 2012.a). Izvor i vodotok Jadro spadaju među najvrjednije vodne fenomene Dinarskog krša u Hrvatskoj. Njegove vode, doslovno tisućljećima služe ljudima i okolišu. Cijeli sliv izvora Jadra kao i istoimena rječica predstavljaju fenomen iznimne morfološke, pejzažne i fizionomske raznolikosti te bogatoga kulturnog, povijesnog i arheološkog nasljeđa (Kapelj i sur., 2012.). O značaju izvora i vodotoka Jadra svjedoče brojni objavljeni radovi u kojima su tretirani vrlo različiti aspekti ova dva krška fenomena (npr. Bonacci i Roje-Bonacci, 1997.; Čikotić, 2002.; Denić-Jukić i Jukić, 2003.; Margeta i Fistanić, 2004.; Štambuk-Giljanović,

2006.; Jukić i Denić-Jukić, 2008., 2009., 2015.; Rađa i Puljas, 2008.; Rađa i Šantić, 2014.; Loborec i sur. 2015.; Bonacci, 2015.; Marasović i Margeta, 2017.; Margeta i Marasović, 2018.; Kadić i sur., 2019.; Divić i sur. 2020.; Jukić i sur., 2022.; Margeta, 2022. itd.).

Krški izvor Jadro u dalekoj je povijesti predstavljao, a i danas predstavlja ključan i pouzdan resurs visoko kvalitetne slake vode. Povoljan geografski položaj na ušću rijeke Jadro (u prošlosti se rijeka nazivala Salon) u Jadransko more i bogati resursi vode omogućili su razvoj naselja. U 3. stoljeću prije nove ere (n.e.) tamo je bilo smješteno obalno uporište i luka ilirskih Delmata. Najpoznatije naselje izgrađeno na prostru izvora Jadra je Salona koja je predstavljala najveći rimski grad na istočnoj obali Jadrana. Salona je 48. godine prije n.e. dobila status



Slika 1: Fotografija izvora Jadra (snimio B. Jukić)

rimske kolonije s punim naslovom Colonia Martia Iulia Salona.

Izvor Jadra nalazi se 3 km istočno od antičke Salone. U 1. stoljeću prije n.e. sagrađen je od izvora Jadra do Salone akvadukt dug 5 km (Marasović i Margeta, 2017.). Rimski car Dioklecijan je oko 5 km jugozapadno od Salone i 7 km od izvora Jadra sagrađio palaču u koju se nastanio nakon abdikacije 1. svibnja 305. godine. Za potrebe opskrbe vodom Dioklecijanove palače na prijelazu iz 3. u 4. stoljeće n.e., izgrađen je 9,5 km dug akvadukt, koji je bio u funkciji do 7. stoljeća n.e. kad je razoren najezdom Avara i Slavena (Marasović i Margeta, 2017.). Stanovnici Salone izbjegli su unutar zidina Dioklecijanove palače i tako utemeljili grad Split koji danas prema popisu iz 2021. godine ima 161.312 stanovnika. U okolici Splita živi oko 340.000 stanovnika od kojih se njih oko 300.000 koristi vodom iz izvora Jadra.

U vodoopskrbni sustav grada Splita i šire okolice, voda se doprema kroz dva cjevovoda nazvana Dioklecijanov kanal i Novi kanal. Svrha analiza iznesenih u ovom radu je detaljno hidrološki izučiti količine voda koje se iz izvora odvođe u razdoblju 2010. - 2021. te ih usporediti s onima koje su se oduzimale u prethodnom razdoblju od 1995. do 2009. (Bonacci, 2012.a). U članku objavljenom 2012. godine u časopisu Hrvatske Vode pod naslovom „Hidrološka analiza odvođenja vode iz krškog izvora rijeke Jadro“ analizirani su podaci opaženi u razdoblju 1995. - 2009. (Bonacci, 2012.a). Cilj tog prethodnog rada bio je ukazati na zabrinjavajuće trendove u razdoblju od 15 godina (1995. - 2009.). Zanimljivo je, ali i izrazito važno utvrditi kako se s vodom iz izvora upravlja 12 godina kasnije u razdoblju od 2010. do 2021. Problemu učinkovitijeg i sigurnijeg upravljanja vodnim resursima izvora Jadra neophodno je posvetiti mnogo ozbiljniju pažnju od one današnje, osobito u uvjetima klimatskih promjena (npr. Bonacci, 2012.b; Norrant i Douguédroit, 2006.; Giorgi i

Lionello 2008.; Margeta, 2022. itd.), ali i sve većih potreba za vodom. Hidrološka analiza oduzimanja vode iz izvora prvi je i ključni element za postizanje tog cilja.

2. MATERIJALI I METODE

2.1. Korišteni materijali

Hidrološki režim izvora Jadro kontrolira se na tri vodomjerne postaje: (1) Jadro Majdan („O“= 13,456 m n.v.); (2) Jadro Dioklecijanov kanal („O“= 32,772 m n.v.); (3) Jadro Novi kanal („O“= 32,664 m n.v.). Na postajama Dioklecijanov kanal i Novi kanal mjere se količine vode koje se iz izvora odvođe u vodoopskrbni sustav. Vodomjerna postaja Majdan locirana je na otvorenom vodotoku Jadra. Zračnom linijom udaljena je od izvora 1100 m. Na njoj se kontroliraju količine vode koje su preostale nakon odvođenja vode iz izvora. U ovom radu su korišteni srednji dnevni protoci dobiveni od Državnog Hidrometeorološkog Zavoda iz Zagreba, a odnose se na razdoblje od 1. siječnja 1995. do 31. prosinca 2021., dakle punih 27 godina. U izvršenim analizama naglasak će biti stavljen na izučavanje podataka u posljednjih 12 godina od 1. siječnja 2010. do 31. prosinca 2021. pošto su podaci u prethodnih 15 godina (1. siječanj 1995. - 31. prosinac 2009.) detaljno obrađeni u prethodno spominjanom članku (Bonacci, 2012.a).

Ukupni protok iz izvora Jadra, Q_{IZ} , računa se izrazom:

$$Q_{IZ} = Q_{OD} + Q_{MA} \quad (1)$$

pri čemu se odvedeni protok, Q_{OD} , računa izrazom:

$$Q_{OD} = Q_{DK} + Q_{NK} \quad (2)$$

kod kojeg je protok kroz Dioklecijanov kanal označen s, Q_{DK} , a protok kroz Novi kanal s, Q_{NK} .

2.2. Korištene metode

Linearni trendovi analiziranih vremenskih nizova protoka, Q , mjerenih na tri postaje na izvoru Jadra, izračunati su primjenom teorije najmanjih kvadrata. Jednadžba pravca regresije koji prezentira linearni trend analiziranog vremenskog niza glasi:

$$Q = (a \times t) + b \quad (3)$$

kod čega, Q , označava protok u određenom vremenskom intervalu (mjesec ili godina), t , dok su, a , b , koeficijenti linearne regresije, koji se proračunavaju primjenom metode najmanjih kvadrata. Koeficijent, a , predstavlja nagib pravca regresije čija je dimenzija izražena u $^{\circ}\text{C}/\text{god}$. On je pokazatelj prosječnog intenziteta porasta ili opadanja analiziranog parametra vremenske serije. Za sve vremenske serije izračunate su kvadratne vrijednosti koeficijenata determinacije (koeficijenta linearne korelacije), R^2 .

Korišteni su i F-test te t-test (McGhee, 1985.) za računanje statističke značajnosti razlika varijanci (F-test) i prosječnih vrijednosti (t-test) dva vremenska niza: (1) 1995. - 2009.; (2) 2010. - 2021. Nulta hipoteza testa je da nema statistički značajne razlike varijanci i prosječnih vrijednosti nizova. Alternativna hipoteza je da postoji statistički značajna razlika. Kao kriteriji za prihvaćanje alternativne hipoteze korištene su razine značajnosti, $p < 0,01$, i $p < 0,05$.

Statističke značajnosti trenda ispitivane su neparametarskim Mann-Kendall testom (Mann, 1945.; Kendall, 1975.), korištenjem paketa pyMannKendall package for Python (Hussain Shourov i Mahmud, 2019.). Nulta hipoteza testa glasi da nema monotonog trenda u analiziranom vremenskom nizu. Alternativna hipoteza je da monotoni trend postoji. U ovom radu su kao kriteriji za prihvaćanje alternativne hipoteze korištene razine značajnosti, $p < 0,01$.

3. REZULTATI I RASPRAVA

S ciljem da se što detaljnije izuči problematika odvođenja vode iz izvora Jadra, analize će se vršiti u vremenskim skalama godine, mjesecima tijekom godine i

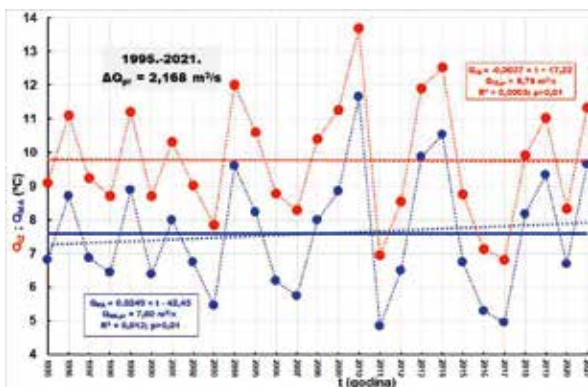
danima. Takav pristup omogućava preciznije objašnjavanje problematike i na osnovu toga, donošenje pouzdanijih zaključaka o mjerama koje bi se mogle i trebale poduzeti. Bitno je shvatiti da protoci izmjereni na profilu Majdan predstavljaju one količine vode koje su preostale iz izvora nakon odvođenja vode u dva kanala i kasnije u opskrbnu mrežu. Nizvodno od vodomjernog profila Majdan Jadro prima još nešto pritoka. Većinom se radi o bujičnim tokovima koji su vrlo rijetko aktivni tijekom toplog razdoblja godine kritičnog za pružanje podrške okolišu.

3.1. Godina kao jedinica analize

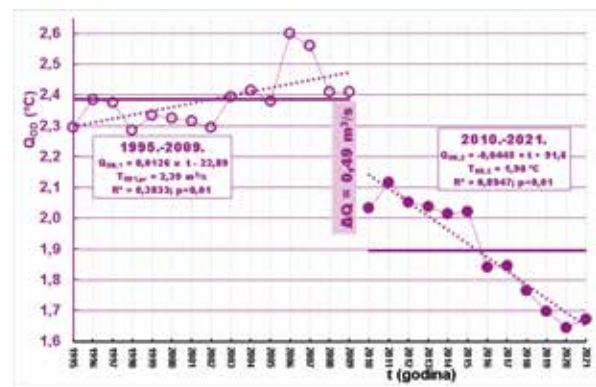
Na slici 2 prikazani su nizovi srednjih godišnjih protoka izvora Jadra, Q_{IZ} , i protoka izmjenjenih na vodomjernoj postaji Majdan, Q_{MA} , u razdoblju od 1995. do 2021. godine. Protoci izvora Jadra, Q_{IZ} , izračunati su zbrajanjem srednjih dnevnih protoka izmjenjenih na tri postaje korištenjem izraza (1). U crtane su i linije trendova te su upisani i pravci linearne regresije. Važno je uočiti da ni u jednom od dva izučavana niza nisu uočeni statistički značajni linearni trendovi ni porasta niti opadanja. Osim toga, bitno je uočiti da kod niza srednjih godišnjih protoka izvora, Q_{IZ} , postoji vrlo blagi trend opadanja, dok kod niza protoka izmjenjenih na vodomjernoj postaji Majdan postoji statistički neznačajni trend porasta.

Srednji godišnji protoci izvora Jadra variraju u vrlo širokim vrijednostima od minimalnih $6,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (2017.) do maksimalnih $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (2010.) uz prosječnu višegodišnju vrijednost od $9,76 \text{ m}^3/\text{s}$. Očito je da hidrološki režim izvora ima bujični karakter. Kako se raspolagalo s relativno kratkim nizom pouzdanih mjerenja od samo 27 godina za očekivati je da ekstremni protoci mogu biti mnogo snažnije izraženi. Nas mnogo više brinu minimalni protoci, kad se mogu pojaviti ozbiljni problemi s upravljanjem vodnim resursima i pružanjem podrške ekosustavima. Svjedoci smo sve dugotrajnijih i sve snažnijih suša, a kao posljedicu globalnog zagrijavanja realno je očekivati da će to stanje u bliskoj budućnosti biti mnogo rizičnije.

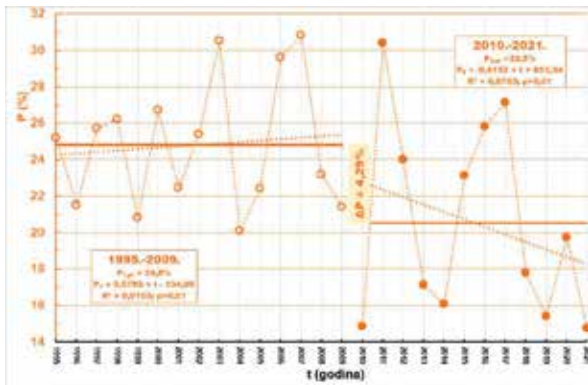
Na slici 3 u crtana su dva niza srednjih godišnjih protoka koje se iz izvora odvođe u sustav, Q_{OD} . Prvi niz se odnosi na razdoblje 1995. - 2009., a drugi na recentno razdoblje 2010. - 2021. Uočavaju se velike razlike ne samo između prosječnih vrijednosti nego i u ponašanju trendova



Slika 2: Nizovi srednjih godišnjih protoka izvora, Q_{IZ} , i protoka na vodomjernoj postaji Majdan, Q_{MA} , u razdoblju 1995. - 2021.



Slika 3: Dva niza srednjih godišnjih protoka koje se iz izvora odvođe u sustav, Q_{OD} . Prvi niz se odnosi na razdoblje 1995. - 2009., a drugi na recentno razdoblje 2010. - 2021.



Slika 4: Dva niza godišnjih postotaka bespovratno odvedene vode, P. Prvi niz se odnosi na razdoblje 1995. - 2009., a drugi na recentno razdoblje 2010. - 2021.

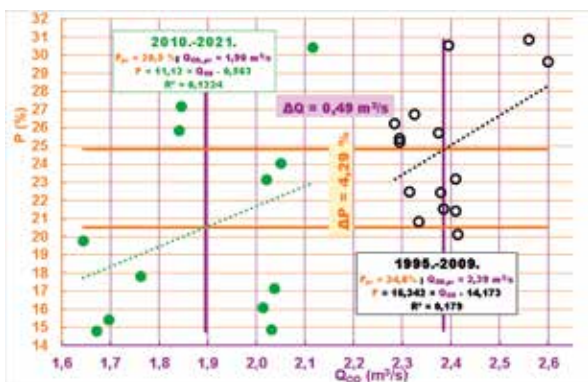
unutar dva relativno kratka razdoblja. Tijekom razdoblja 1995. - 2009. prosječno se iz izvora odvodilo 2,39 m³/s. Maksimalno je odvedeno 2,60 m³/s, 2006. godine. U tom razdoblju, čije su karakteristike detaljno opisane u radu Bonacci (2012.a), javio se statistički značajan trend porasta odvođenja koji je prosječno godišnje iznosio 12,6 litara. U recentnom razdoblju od 2010. do 2021. trend opadanja je statistički značajan i iznosi prosječno 44,5 litara godišnje. U recentnom razdoblju (2010. - 2021.) prosječno se godišnje odvodilo 1,90 m³/s što je prosječno za 0,49 m³/s manje nego tijekom prethodnog 15 godišnjeg razdoblja. Minimalna vrijednost dosegnuta je 2020. godine kada je iz izvora odvedeno 1,64 m³/s.

Slika 4 predstavlja prikaz dva vremenska niza godišnjih postotaka odvedene vode iz izvora Jadra, P, u razdobljima: (1) 1995. - 2009.; (2) 2010. - 2021. Izraz za računanje postotka odvedene vode, P, glasi:

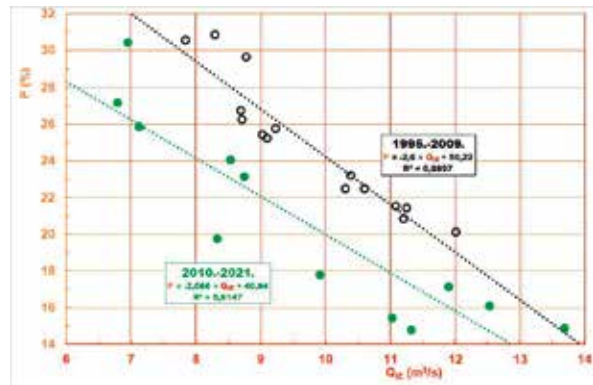
$$P = 100 \times Q_{00} / Q_{IZ} \quad (4)$$

U recentnom razdoblju (2010. - 2021.) prosječno se godišnje iz izvora odvodilo u sustav 20,5 % vode, što je 4,29 % manje nego tijekom prethodnih 15 godina u razdoblju 1995. - 2009. kad se iz sustava prosječno odvodilo 24,8 % vode. Pri tome treba uočiti da je npr. 2011. odvedeno više od 30 % vode.

Kad se u međuodnos stave postotak odvedene vode, P, i srednji godišnji protok izvora, Q_{IZ}, uočava se čvrsta



Slika 6: Međuodnosi godišnjih postotaka odvedene vode, P, i srednjih godišnjih protoka vode odvedene iz izvora, Q₀₀, u dva analizirana razdoblja: (1) 1995. - 2009.; (2) 2010. - 2021.

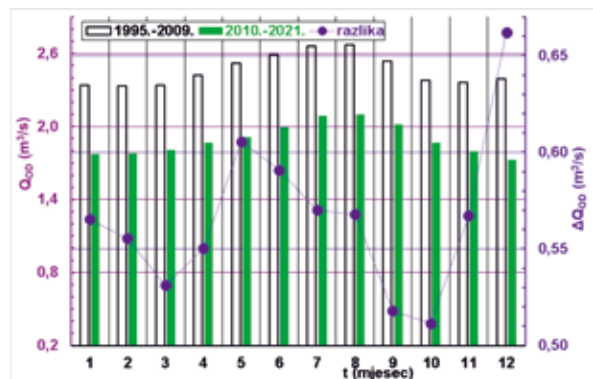


Slika 5: Međuodnosi godišnjih postotaka odvedene vode, P, i srednjih godišnjih protoka izvora, Q_{IZ}, u dva analizirana razdoblja: (1) 1995. - 2009.; (2) 2010. - 2021.

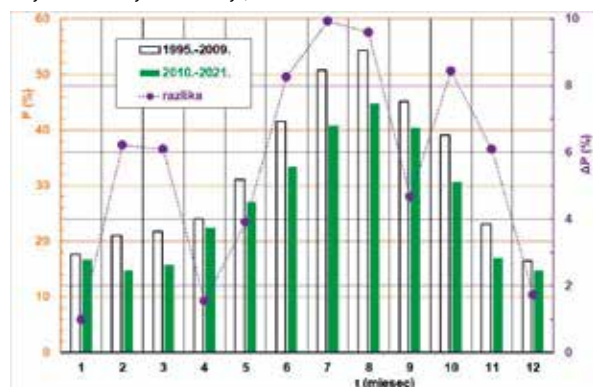
međuzavisnost između ove dvije varijable. Na slici 5 ucertani su odvojeno međuodnosi za dva razdoblja: (1) 1995. - 2009.; (2) 2010. - 2021. Međuodnos je obrnuto proporcionalan. Povećanjem protoke izvora, Q_{IZ}, smanjuje se postotak odvedene vode u sustav. Na slici 6 ucertani su međuodnosi između postotka odvedene vode, P, i srednjih godišnji protoka odvedene vode iz izvora, Q₀₀, za dva analizirana razdoblja.

3.2. Mjesec kao jedinica analize

Potrebe za vodom variraju tijekom godine što se odražava i na količinama vode koje se odvođe iz izvora. Na slici 7 prikazane su kao histogrami prosječni mjesečni



Slika 7: Histogrami prosječnih mjesečnih odvođenja vode iz izvora, Q₀₀, u dva analizirana razdoblja i njihovih razlika, ΔQ₀₀, (ucrtana točkama i spojena linijama tamno ljubičaste boje)



Slika 8: Histogrami prosječnih mjesečnih postotaka odvođenja vode iz izvora, P, u dva analizirana razdoblja i njihovih razlika, ΔP, (ucrtana točkama i spojena linijama tamno ljubičaste boje)

Tablica 1: Matrica vrijednosti prosječnih mjesečnih protoka odvođenja vode iz izvora Jadra, Q_{OD} , i postotaka odvođenja, P, u dva analizirana razdoblja, njihovih razlika i rezultata t-testa, p

mjesec	Q_{OD} (m ³ /s)				P (%)			
	1995.-2009.	2010.-2021.	razlika	p	1995.-2009.	2010.-2021.	razlika	p
[1]	[2]	[3]	[4]=[2]-[3]	[5]	[6]	[7]	[8]=[6]-[7]	[9]
siječanj	2,34	1,77	0,57	< 0,01	17,6	16,7	0,99	> 0,05
veljača	2,34	1,78	0,56	< 0,01	21,0	14,7	6,2	> 0,05
ožujak	2,34	1,81	0,53	< 0,01	21,8	15,7	6,1	> 0,05
travanj	2,42	1,87	0,55	< 0,01	24,0	22,5	1,5	> 0,05
svibanj	2,52	1,91	0,61	< 0,01	31,0	27,1	3,9	> 0,05
lipanj	2,59	2,00	0,59	< 0,01	41,6	33,3	8,3	< 0,05
srpanj	2,66	2,09	0,57	< 0,01	50,8	40,8	9,9	< 0,01
kolovoz	2,67	2,10	0,57	< 0,01	54,4	44,8	9,6	< 0,01
rujan	2,54	2,01	0,52	< 0,01	45,2	40,5	4,7	> 0,05
listopad	2,38	1,87	0,51	< 0,01	39,1	30,7	8,4	> 0,05
studen	2,36	1,79	0,57	< 0,01	23,1	17,0	6,1	> 0,05
prosina	2,39	1,73	0,66	< 0,01	16,4	14,7	1,7	> 0,05

Brojevi upisani modrom bojom označavaju da je vjerojatnost t-testa, $0,01 < p < 0,05$

Brojevi upisani crvenom bojom označavaju da je vjerojatnost t-testa, $p < 0,01$

protoci oduzimanja vode iz izvora, Q_{OD} , u dva analizirana razdoblja. Razlike, ΔQ_{OD} , između njih ucrtane su kao spojevi točaka. Najveća razlika pojavila se u prosincu, a najmanja u listopadu. Slika 8 prikazuje histograme prosječnih mjesečnih postotaka odvođenja vode iz izvora, P, u dva analizirana razdoblja i njihovih razlika, ΔP , ucrtanih točkama i spojenih linijama tamno ljubičaste boje. Najveće su se razlike pojavile u srpnju i kolovozu.

U tablici 1 navedene su vrijednosti prosječnih mjesečnih protoka odvođenja vode iz izvora Jadra, Q_{OD} , i postotaka odvođenja, P, u dva analizirana razdoblja, njihovih razlika i rezultata t-testa, p. Uočava se da je tijekom svakog mjeseca godine iz izvora bilo odvedeno više vode tijekom prvog razdoblja 1995. - 2009. nego tijekom recentnog perioda 2010. - 2021. Kad se t-testom testiraju prosječni protoci, Q_{OD} , izraženi u m³/s, razlike su tijekom svakog

pojednog mjeseca u godini statistički značajne na razini, $p < 0,01$. U slučaju analize postotaka odvođenja, statistički su značajne razlike samo tijekom lipnja, $p < 0,05$ te srpnja i kolovoza, $p < 0,01$. Iako se radi o vrlo pozitivnom pomaku što se korištenja vode iz izvora tiče, treba uočiti da se u ta tri mjeseca u toplom dijelu godine odvodi prosječno više od 40 % vode iz izvora Jadra. Osobito treba ukazati na zabrinjavajuću činjenicu da se u mjesecu rujnu odvodi više od 40 % vode iz izvora. Globalno zagrijavanje i porast temperatura zraka u regiji uzrokuju sve dugotrajnije i sve intenzivnije suše koje pokazuju tendenciju da se s ljetnih mjeseci produže i na jesenske mjesece.

U tablici 2 nalaze se vrijednosti broja mjeseci, N_N , kada je odvođenje vode bilo veće ili manje od određenog postotka, P, izračunato za tri razdoblja: (1) 1995. - 2009.; (2) 2010. - 2021.; (3) 1995. - 2021. U tri posljednja

Tablica 2: Matrica broja mjeseci, N_N , kada je odvođenje vode bilo veće ili manje od određenog postotka, P, izračunato za tri razdoblja: (1) 1995. - 2009.; (2) 2010. - 2021.; (3) 1995. - 2021. U donjem dijelu tablice broj mjeseci, N_p , je izražen u postotcima od ukupnog broja mjeseci u analiziranim razdobljima.

razdoblje	P (%)							
	<30	30-34,9	35-35,9	40-44,9	45-49,9	50-54,9	55-59,9	≥60
N_N (broj mjeseci u razdoblju)								
1995. - 2009.	93	19	10	13	10	17	11	7
2010. - 2021.	89	14	12	15	12	2	0	0
1995. - 2021.	182	33	22	28	22	19	11	7
N_p (% mjeseci u razdoblju)								
1995. - 2009.	51,6	10,6	5,6	7,2	5,6	9,4	6,1	3,9
2010. - 2021.	61,8	9,8	8,3	10,4	8,3	1,4	0	0
1995. - 2021.	56,5	10,3	6,8	8,7	6,9	5,9	3,4	2,2

Tablica 3: Matrica broja mjeseci, N_p , u kojima su se tijekom dva analizirana razdoblja oduzimalo više od 30 % vode. U stupcima [4] i [5] upisan je broj mjeseci, N_p , izražen u postocima od ukupnog broja mjeseci u analiziranim razdobljima.

mjesec	N_N (mjeseci)		N_p (%)	
	1995. - 2009.	2010. - 2021.	1995. - 2009.	2010. - 2021.
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
siječanj	1	0	6,7	0
veljača	1	0	6,7	0
ožujak	3	0	20,0	0
travanj	3	3	20,0	25,0
svibanj	9	5	60,0	41,7
lipanj	13	7	86,7	58,3
srpanj	15	12	100	100
kolovoz	15	12	100	100
rujan	12	11	80,0	91,7
listopad	11	5	73,3	41,7
studeni	3	0	20,0	0
prosinac	1	1	6,7	8,3

retka tablice broj mjeseci, N_p , izražen je u postocima od ukupnog broja mjeseci u analiziranim razdobljima. U prvom razdoblju se tijekom čak 35 mjeseci odvodilo više od 50 % vode iz izvora dok se to isto desilo samo tijekom dva mjeseca u recentnom razdoblju (2010. - 2021.).

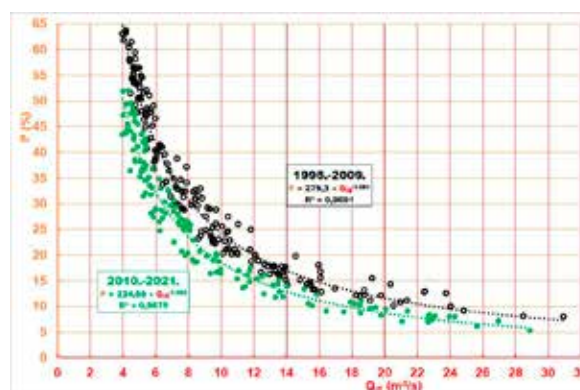
Tablica 3 predstavlja matricu broja mjeseci, N_N , u kojima se tijekom dva analizirana razdoblja iz izvora oduzimalo više od 30 % vode. U dva desna stupca broj mjeseci, N_p , prikazan je u postocima od ukupnog broja mjeseci u analiziranim razdobljima. Treba ukazati na činjenicu da se u srpnju i kolovozu, dakle u kritičnom periodu najtoplijeg dijela godine, u oba analizirana razdoblja uvijek iz izvora oduzimalo više od 30 % vode.

Prikaz odnosa između mjesečnih odvođenja vode iz izvora Jadra, P , izraženih u postocima i srednjih mjesečnih protoka izvora Jadra, Q_{IZ} , izraženih u m^3/s , u dva analizirana razdoblja prikazan je na slici 9. Uočljivo je da se radi o vrlo čvrstim vezama pošto su kvadratne vrijednosti indeksa nelinearne korelacije u oba slučaja gotovo identične te se kreću oko vrijednosti od, $R^2=0,97$. Smanjivanjem prirodnog protoka izvora Jadra, Q_{IZ} , naglo se povećava postotak bespovratno odvedenih voda, P . Kada protok izvora padne ispod $5 m^3/s$ iz njega se u pravilu odvodi više od 50 % vode u prvom razdoblju, ili više od 35 % vode u recentnom periodu.

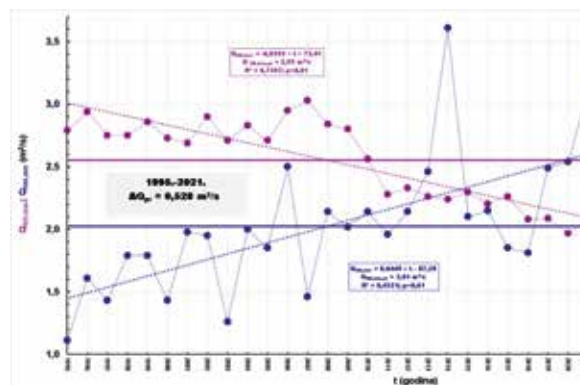
3.3. Dan kao jedinica analize

Nizovi godišnjih minimalnih srednjih dnevnih protoka Jadra izmjenjenih na vodomjernoj postaji Majdan, $Q_{MA,min}$ (modra boja) i godišnjih maksimalnih srednjih dnevnih protoka odvedene vode iz izvora, $Q_{OD,max}$ (ljubičasta boja), u razdoblju 1995. - 2021. prikazani su na slici 10. Dok vremenski niz minimalnih srednjih dnevnih

protoka izmjenjenih na vodomjernoj postaji Majdan, $Q_{MA,min}$, pokazuje statistički značajan trend porasta, niz



Slika 9: Odnosi između srednjih mjesečnih odvođenja vode iz izvora Jadra, P , izraženih u postocima i srednjih mjesečnih protoka izvora Jadra, Q_{IZ} , izraženih u m^3/s , u dva analizirana razdoblja



Slika 10: Nizovi godišnjih minimalnih srednjih dnevnih protoka Jadra izmjenjenih na vodomjernoj postaji Majdan, $Q_{MA,min}$ (modra boja) i godišnjih maksimalnih srednjih dnevnih protoka odvedene vode iz izvora, $Q_{OD,max}$ (ljubičasta boja), u razdoblju 1995. - 2021.

Tablica 4: Prosječan broj dana godišnje, N_{pr} , na vodomjernoj postaji Majdan, Q_{MA} , s srednjim dnevnim protokom koji odgovara određenom rasponu protoka u dva razdoblja te rezultati F-testa i t-testa, p

N_{pr} (dana)	razdoblje	Q_{MA} (m ³ /s)					
		0-1,49	1,5-1,99	2-2,49	2,5-2,99	3-3,49	3,5-3,99
	1995. - 2009.	5	33,5	78,0	107,4	131,3	153,3
2010. - 2021.	0	6,2	41,4	80,8	114,7	145,6	
p (F-test)		<0,01	<0,01	<0,01	>0,10	>0,10	>0,10
p (t-test)		<0,01	<0,05	<0,05	>0,10	>0,10	>0,10

Brojevi upisani modrom bojom označavaju da je vjerojatnost t-testa, $0,01 < p < 0,05$

Brojevi upisani crvenom bojom označavaju da je vjerojatnost t-testa, $p < 0,01$

maksimalnih srednjih dnevnih protoka odvedene vode iz izvora, $Q_{OD,max}$, ima statistički značajan trend opadanja. Testiranje je izvršeno Mann-Kendall testom i kod oba je niza bilo na razini, $p < 0,01$. U razdoblju od svih 27 godina (1995. - 2021.) prosječna vrijednost, $Q_{OD,max}$, bila je veća od prosječne, $Q_{MA,min}$, za 0,528 m³/s. Prve godine analize, 1995., $Q_{OD,max}$ bio je veći od, $Q_{MA,min}$, za, 1,68 m³/s, dok je posljednje godine, 2021., $Q_{OD,max}$ bio manji od, $Q_{MA,min}$, za, 1,04 m³/s. Godine 2013. prvi put je, $Q_{OD,max}$ bio manji od, $Q_{MA,min}$.

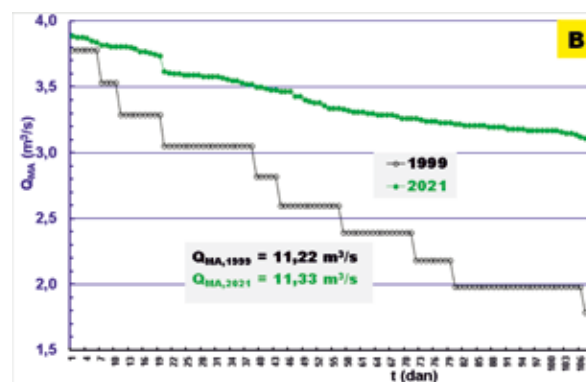
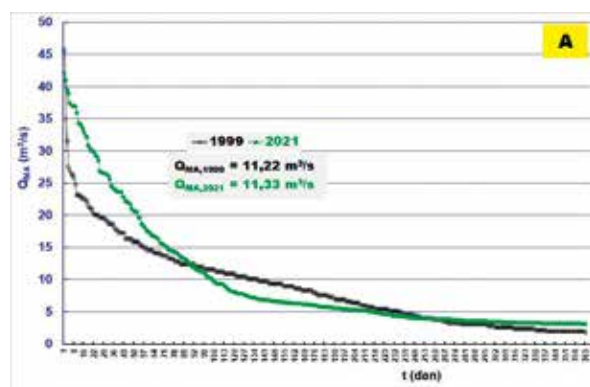
U Tablici 4 navedeni su podaci o prosječnom broju dana godišnje, N_{pr} , na vodomjernoj postaji Majdan, Q_{MA} , sa srednjim dnevnim protokom koji odgovara određenom rasponu protoka u dva razdoblja te rezultati F-testa i t-testa, p. Statistički značajna razlika javlja se samo kod protoka nižih od 2,5 m³/s. Srednji dnevni protok niži od 1,5 m³/s nije se pojavio niti jedan dan u recentnom periodu (2010. - 2021.) dok se u prvom razdoblju javlja u prosjeku 5 dana godišnje.

Na slici 11A ucrtane su krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka Jadra na vodomjernom profilu Majdan, Q_{MA} , određena za sljedeće dvije godine: (1) 1999. (crna boja); (2) 2021. (zeleno boja). Izabrane su dvije godine od kojih 1999. pripada u prvo (1995. - 2009.), a 2021. u recentno (2010. - 2021.) razdoblje. Radi se o godinama kad su srednji godišnji protoci bili gotovo identični u obje analizirane godine i kada je izvor imao iznadprosječne srednje godišnje protoke, veće od 11 m³/s. Vidljivo je različito ponašanje krivulja, što je u biti i bilo za očekivati, jer je to rezultat razlika u hidrološko-klimatološkom režimu koji je vladao u te dvije godine. Sa stanovišta

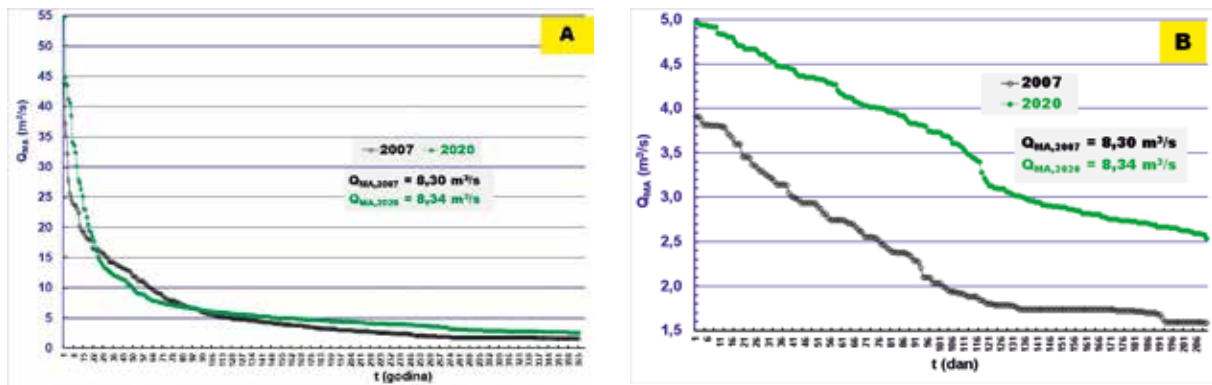
upravljanja vodnim resursima izvora, najinteresantniji je donji dio ovih krivulja kada protok u 1999. godini padne ispod 4 m³/s (slika 11B). Iz ovog prikaza jasno se uočava da je u recentnom razdoblju oduzimanje vode tijekom razdoblja malih voda mnogo manje od onoga u prethodnom razdoblju (1995. - 2009.).

Na slici 12A ucrtane su krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka Jadra na vodomjernom profilu Majdan, Q_{MA} , određena za sljedeće dvije godine: (1) 2007. (crna boja); (2) 2020. (zeleno boja). Izabrane su dvije godine od kojih 2007. pripada u prvo (1995 - 2009.), a 2020. u recentno (2010. - 2021.) razdoblje. Radi se o godinama kad su srednji godišnji protoci bili gotovo identični u obje analizirane godine i kada je izvor imao ispodprosječne srednje godišnje protoke. Vidljivo je različito ponašanje krivulja, što je u biti i bilo za očekivati, jer je to posljedica razlika u hidrološko-klimatološkom režimu koji je vladao u te dvije godine. Sa stanovišta upravljanja vodnim resursima izvora, najinteresantniji je donji dio ovih krivulja kada protok u 2007. godini padne ispod 4 m³/s (slika 12B). Iz ovog prikaza jasno se uočava da je u recentnom razdoblju oduzimanje vode tijekom razdoblja malih voda bitno manje od onoga u prethodnom razdoblju (1995. - 2009.).

U sušnim godinama broj dana godišnje s protokom nižom od 4 m³/s višestruko je veći nego kod vlažnih godina kad je srednji godišnji protok iznadprosječan. Upravo ove sušne godine predstavljaju poseban izazov vezano s upravljanjem vodnim resursima izvora Jadra.



Slika 11: (A) Krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka Jadra na vodomjernom profilu Majdan, Q_{MA} , određena u sljedeće dvije godine: (1) 1999. (crna boja); (2) 2021. (zeleno boja). (B) dio krivulja trajanja kada je protok na profilu Majdan u 1999. godini bio niži od 4 m³/s.



Slika 12: (A) Krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka Jadra na vodomjernom profilu Majdan, Q_{MAX} , određena u sljedeće dvije godine: (1) 2007. (crna boja); (2) 2020. (zelena boja). (B) dio krivulja trajanja kada je protok na profilu Majdan u 2007. godini bio niži od $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

5. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Analize izvršene u ovom radu definitivno su dokazale da se iz izvora Jadra u razdoblju od posljednjih 12 godina (2010. - 2021.) odvodi manje vode nego u prethodnom razdoblju od 15 godina (1995. - 2009.). Na godišnjoj razini radi se o prosječnom iznosu od $0,49 \text{ m}^3/\text{s}$ što iznosi oko $15,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ prosječno godišnje. Tu činjenicu treba svakako pohvaliti, ali problematiku treba detaljnije sagledati. Bitno je uočiti da se najviše vode iz izvora odvodi u sustav za opskrbu vodom tijekom najtoplijeg dijela godine od lipnja do rujna, od 33,3 % do 44,8 % od ukupne protoke izvora Jadra. Taj topli dio godine najkritičniji je sa stanovišta zaštite okoliša, a posebno ako se u obzir uzme činjenica porasta temperatura zraka u posljednjim dekadama (Bonacci, 2022.; Bonacci i sur., 2023.). Pozitivna je činjenica da se u razdoblju od recentnih 12 godina (2010. - 2021.) smanjilo bespovratno odvođenje voda iz izvora Jadra u odnosu na razdoblje 1995. - 2009. te da se to posebno osjetilo u posljednjih nekoliko godina kad su prosječne odvedene količine pale na oko $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Opći je zaključak da se u posljednjih 12 godina bolje upravljalo s vodom iz izvora Jadra, ali treba biti svjestan činjenice da problemi nisu ni približno niti shvaćeni pa prema tome niti dugoročno otklonjeni. S obzirom na značaj kako izvora tako i cijelog vodotoka Jadra, rješavanju ove problematike treba pristupiti sustavnije i zasnovano na brojnim kontinuiranim motrenjima velikog broja klimatoloških, hidroloških, ekoloških, ali i socio-ekonomskih pokazatelja. Činjenica je da što se krškog izvora i sliva Jadra tiče, postoje još brojna neodgovorena pitanja koja onemogućavaju pouzdano i učinkovito upravljanje njegovim vodnim resursima.

Krške terene karakteriziraju jedinstveni geološki, morfološki i hidrogeološki oblici izrazito heterogeni i anizotropni što kao posljedicu ima nejasnu i teško određivu povezanost između sliva i izvora (Fiorillo i sur., 2022.). Upravo takav slučaj je s izvorom Jadra. Zbog toga, unatoč relativno brojnim istraživanjima, do danas nije pouzdano određena njegova slivna površina niti su jasno definirani procesi koji se odvijaju između površinskih i podzemnih voda u tom prostoru. Takva saznanja bitna su za zaštitu ovog vrijednog krškog fenomena koji se praktično već duže

od dva tisućljeća intenzivno koristi za ljudsku upotrebu i uz kojeg su razvijene brojne značajne ljudske naseobine. Voda se iz njega i danas intenzivno koristi omogućavajući razvoj grada Splita i njegove okolice. Činjenica je da su potrebe regije za vodom sve veće, da se proces globalnog zagrijavanja osjeća sve intenzivnije, da urbanizacija i potencijalna izgradnja odlagališta otpada u njegovom slivu prijete kvaliteti njegovih voda. Sve navedeno imperativno zahtijeva nov holistički pristup upravljanju i korištenju njegovih vodnih resursa.

Ovaj rad u kojem je analizirano odvođenje vode iz izvora za potrebu opskrbe grada i regije u recentnih 12 godina (2010. - 2021.) daje osnovne i bitne pokazatelje koji mogu pomoći u rješavanju ove krucijalne i urgentne problematike. Činjenica je da se i u recentnom razdoblju, bez obzira na u ovom radu utvrđena poboljšanja, iz izvora Jadra uzima previše vode i da se s njom ne upravlja na način dobrog gospodara. Primjera radi navodi se da grad Rijeka, koji je po broju stanovnika, infrastrukturi i cjelokupnoj djelatnosti sličan gradu Splitu, iz svih svojih krških izvora koristi značajno manju količinu vode (Bonacci i sur., 2018.a; 2018.b). U prosjeku se koristi nešto manje od $1 \text{ m}^3/\text{s}$ dok se iz izvora Jadra u posljednjih 12 godina odvodi dvostruko više vode. Situacija postaje posebno kritična tijekom ljetnog razdoblja kada zbog turizma, navodnjavanja i vrućina potreba za vodom naglo naraste. Pojave sve razornijih suša mogu se realno očekivati upravo na ovom slivu i tijekom toplog razdoblja godine (Bonacci i sur., 2023.).

Bogati, ali ranjivi ekosustavi kao i osjetljiva društveno-ekonomska struktura sliva izvora Jadra ugroženi su postojećim klimatskim promjenama čije se posljedice u posljednjim desetljećima osjećaju sve intenzivnije, ali istovremeno i u brojnim nedovoljno kontroliranim ljudskim djelatnostima. Ograničene dimenzije i ograničeni prirodni resursi ovog prostora ugroženi su sve snažnije antropogenim aktivnostima kao npr. turizmom, urbanizacijom, apartmanizacijom te brutalnom promjenom korištenja zemljišta. Sve prethodno navedeno značajno utječe na smanjivanje opcija adaptacije na klimatske promjene i učinkovitije i kontrolirano upravljanje vodnim resursima ovog sliva. Potrebe za vodom u ovom prostoru će rasti, a ujedno će i ugroženost vodnih resursa biti sve veća.

Upravo zbog te činjenice neophodno je intenzivirati istraživanja vezana s učinkovitijim upravljanjem vodnim resursima izvora Jadra, osobito tijekom toplog dijela godine kada su potrebe za vodom najjače izražene. Kako bi istraživanja bila svrsishodna, tj. kako bi mogla dati pouzdane odgovore na mnoga važna pitanja, neophodno je vršiti brojna, kontinuirana mjerenja potrošnje vode, klimatskih parametara, ali i drugih ekoloških pa i društvenih pokazatelja.

U ovom se radu nije tretirala problematika gubitaka vode iz sustava, ali je očito da se i u tom segmentu kriju značajni potencijali uštede vode koja se treba uzimati iz izvora Jadra.

ZAHVALA

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

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

LITERATURA

- Bonacci, O. (2012.a): Hidrološka analiza odvođenja vode iz krškog izvora rijeke Jadro. *Hrvatske Vode*, 20(79/80), 23–28.
- Bonacci, O. (2012.b): Increase of mean annual surface air temperature in the Western Balkans during last 30 years. *Vodoprivreda*, 44(255–257), 75–89.
- Bonacci, O. (2015.): Karst hydrogeology/hydrology of Dinaric chain and Isles. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 37–55.
- Bonacci, O. (2022.): What is above average air temperature!?. *Theoretical and Applied Climatology*, 150(1–2), 85–101.
- Bonacci, O.; Bonacci, D.; Roje-Bonacci, T.; Vrsalović, A. (2023.): Proposal of a new method for drought analysis. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71(1), 1–11.
- Bonacci, O.; Oštrić, M.; Roje-Bonacci, T. (2018.a): Prilog hidrologiji krškog izvora Rječine. *Hrvatske Vode*, 25(100), 99–108.
- Bonacci, O.; Oštrić, M.; Roje-Bonacci, T. (2018.b): Water resources analysis of the Rječina karst spring and river (Dinaric karst). *Acta Carsologica*, 47(2–3), 123–137.
- Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. (1997.): Hidrološki vid određivanja ekološkog minimuma rijeke Jadro. *Hrvatske Vode*, 5(21), 339–350.
- Čikotić, S. (2002.): Zagađenje rijeke Jadro. *Hrvatska Vodoprivreda*, 114(XI), 13–16.
- Denić-Jukić, V.; Jukić, D. (2003.): Composite transfer function for karst aquifers. *Journal of Hydrology*, 274(1–4), 80–94.
- Divić, V.; Galešić, M.; Di Dato, M.; Tavra, M.; Andričević, R. (2020.): Application of open source electronics for measurements of surface water properties in an estuary: a case study of River Jadro, Croatia. *Water*, 12(1), 209.
- Fiorillo, F.; Pagnozzi, M.; Adesso, R.; Cafaro, S.; D'Angeli, I. M.; Esposito, L.; Leone, G.; Liso, I. S.; Parise, M. (2022.): Uncertainties in understanding groundwater flow and spring functioning in karst. *Threats to Springs in a Changing World: Science and Policies for Protection* (urednici M. J. Currell, B. G. Katz), 131–143. American Geophysical Union, Washington D. C.
- Giorgi, F.; Lionello, P. (2008.): Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2–3), 90–104.
- Husain Shourov, M. M.; Mahmud, I. (2019.): pyMannKendall: a python package for nonparametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, 4 (9), 1556.
- Jukić, D.; Denić-Jukić, V. (2008.): Estimating parameters of groundwater recharge model in frequency domain: karst springs Jadro and Žrnovnica. *Hydrological Processes*, 22(23), 4532–4542.
- 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.
- Jukić, D.; Denić-Jukić, V. (2015.): Investigating relationships between rainfall and karst-spring discharge by higher-order partial correlation functions. *Journal of Hydrology*, 530, 24–36.
- Jukić, D.; Denić-Jukić, V.; Kadić, A. (2022.): Temporal and spatial characterization of sediment transport through a karst aquifer by means of time series analysis. *Journal of Hydrology*, 609, 127753.
- Kadić, A.; Denić-Jukić, V.; Jukić, D. (2019.): Analiza meteoroloških i hidroloških odnosa u kršu primjenom parcijalne kros-korelacijske funkcije višeg reda. *Hrvatske Vode*, 27(109), 201–210.
- Kapelj, S.; Kapelj, J.; Švonja, M. (2012.): Hidrogeološka obilježja sliva Jadra i Žrnovnice. *Tusculum*, 5(1), 205–216.
- Kendall, M. G. (1975.): *Rank correlation methods*, 4th edition. Charles Griffin, London.
- Loborec, J.; Kapelj, S.; Dogančić, D.; Siročić, A. P. (2015.): Assessment of groundwater vulnerability in Croatian karstic aquifer in Jadro and Žrnovnica Springs catchment area. *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems* (urednici B. Andreo, F. Carrasco, J. Durán, P. Jiménez, J. LaMoreaux), 397–405. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Mann, H. B. (1945.): Non-parametric test of randomness against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.

- 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.
- Margeta, J. (2022.): Water abstraction management under climate change: Jadro spring Croatia. *Groundwater for Sustainable Development*, 16, 100717.
- Margeta, J.; Fistanić, I. (2004.): Water quality modelling of Jadro Spring. *Water Sciences and Technology*, 50(11), 59-66.
- Margeta, J.; Marasović, K. (2018.): Vodoopskrbni zahvati na izvoru rijeke Jadro od antike do danas. *Građevinar*, 70(11), 985-996.
- McGhee, J. W. (1985.): *Introductory statistics*. West Publishing Company, St Paul and New York.
- Narrant, C.; Douguédroit, A. (2006.): Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950–2000). *Theoretical and Applied Climatology*, 83(1-4), 89–106.
- Rađa, B.; Puljas, S. (2008.): Macroinvertebrate diversity in the karst Jadro river (Croatia). *Archives of Biological Sciences*, 60(3), 437–448.
- Rađa, B.; Šantić (2014.): Community structure of aquatic insects in the karstic Jadro River in Croatia. *Journal of Insect Science*, 14(1), 54.
- Štambuk-Giljanović, N. (2006.): *Vode Dalmacije*. Nastavni Zavod za javno zdravstvo Splitsko-dalmatinske županije, Split.

ANALYSIS OF WATER ABSTRACTION FROM THE JADRO RIVER SOURCE IN THE PERIOD 2010-2021

Abstract. The paper analyses the series of average daily, monthly and annual discharges of the Jadro River source measured at three hydrological stations (Jadro-Majdan, Jadro-Noví Kanal, Jadro-Dioklecijanov Kanal) in the period from January 1, 1995 to December 31, 2021. The main goal of the research described in this paper was to compare the quantities of water abstracted from the Jadro source into the water supply system in the period 1995–2009 with those in the recent 2010–2021 period. There has been a positive shift in the past 12 years, i.e. on average, less water is annually abstracted from the Jadro source than in the period 1995–2009. It is important to note that the downward trend in the recent period is statistically significant. It is also important to note that the problems still exist, primarily because the situation during the warm period of the year from June to September has not significantly improved. The key problem occurs in July and August, when more than 40% of the water from the source is still abstracted. It can be realistically expected that the air temperatures in the region will rise in the future as a consequence of global warming. Drought occurrences will intensify during the summer and periods without rain, which could result in a renewed increase in water abstraction from the Jadro source. It is necessary to continue the work on reducing the irreversible removal of water from the source and creating a reliable and a sustainable management system for this invaluable water resource.

Key words: Jadro River source, water abstraction from the source, trend analysis, Mann-Kendall Test, t-test

ANALYSE DER WASSERENTNAHME AUS DER QUELLE DES FLUSSES JADRO IM ZEITRAUM 2010-2021

Zusammenfassung. Im Artikel werden die Reihen von mittleren täglichen, monatlichen und jährlichen Durchflüssen des Flusses Jadro analysiert, die an drei Wassermessstationen (Jadro-Majdan, Jadro-Noví Kanal, Jadro-Dioklecijanov Kanal) im Zeitraum vom 1. Januar 1995 bis 31. Dezember 2021 gemessen wurden. Das Hauptziel der in diesem Artikel dargestellten Untersuchung war, die Wassermengen, die von der Jadro-Quelle entnommen und in das Wasserversorgungssystem im Zeitraum 1995–2009 abgeleitet wurden, mit den im Zeitraum 2010–2021 entnommenen Wassermengen zu vergleichen. In den letzten 12 Jahren gab es eine positive Verschiebung, nämlich, aus der Jadro-Quelle wird jährlich durchschnittlich weniger Wasser abgeleitet, als das im Zeitraum 1995–2009 der Fall war. Es ist wichtig zu beachten, dass der Abwärtstrend im letzten Zeitraum statistisch signifikant ist. Es ist aber auch wichtig zu betonen, dass Probleme weiterhin bestehen, vor allem weil sich die Situation während der warmen Jahreszeit von Juni bis September noch immer wesentlich nicht verbesserte. Das Hauptproblem entsteht in Juli und August, wenn aus der Quelle noch immer mehr als 40% des Wassers abgeleitet wird. Es ist realistisch zu erwarten, dass die Lufttemperaturen in der Region aufgrund der Auswirkungen der globalen Erwärmung auch in Zukunft steigen werden. Im Sommer und in der regenfreien Zeit werden Dürren verstärkt, was zu einem erneuten Anstieg der Wasserableitung aus der Jadro-Quelle führen könnte. Es muss weiter an der Reduzierung der Ableitung von Wasser aus der Quelle und an der Schaffung eines zuverlässigen und nachhaltigen Managementsystems für diese unschätzbare Wasserressource gearbeitet werden.

Schlüsselwörter: Quelle des Flusses Jadro, Quellwasserableitung, Trendanalyse, Mann-Kendall-Test, t-Test