

HIDROLOŠKA ANALIZA SREDNJIH GODIŠNJIH PROTOKA DUŽ TOKA RIJEKE SAVE U HRVATSKOJ

**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 Zagrebu
Fakultet građevinarstva
arhitekture i geodezije
Matice hrvatske 15, Split, Hrvatska

mr. sc. Duje Bonacci, dipl. ing. fiz.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet hrvatskih studija
Borongajska cesta 83d,
Zagreb, Hrvatska

U radu su analizirani svi raspoloživi nizovi srednjih godišnjih protoka izračunati na 13 vodomjernih postaja duž toka rijeke Save u Hrvatskoj. Korišteni su isključivo službeni podaci DHMZ-a iz Zagreba. Duljine nizova su različite, unutar pojedinih nizova postoje prekidi u opažanjima, ali svi završavaju s 2022. godinom. Jasno je uočen trend opadanja srednjih godišnjih protoka na svim vodomjernim postajama. Vrijednosti koeficijenata linearne regresije, a, ukazuju na to da se proces opadanja intenzivira idući nizvodno duž toka rijeke. U gornjem toku prosječna vrijednost opadanja iznosi $7 \text{ m}^3/10$ godina. U srednjem toku prosječna vrijednost opadanja naraste na $11 \text{ m}^3/10$ godina, dok na postajama u donjem toku iznosi prosječno $22 \text{ m}^3/10$ godina. Analizom razlika protoka između susjednih vodomjernih postaja pronađene su određene nepravilnosti koje ukazuju na vjerojatne greške u određivanju srednjih godišnjih protoka na nekim postajama. Čini se da na postajama Podsused, Rugvica i Jasenovac najmanje pouzdano određuju protoke. Kao vjerojatni razlog navodi se nedovoljan broj vodomjerenja koji ne osigurava definiranje pouzdanih krivulja protoka. Izračunat je Hurstov eksponent za nizove Save kod Zagreba (1926. - 2022.) i Save kod Županje (1929. - 2022.). S obzirom na to da njegova vrijednost za Zagreb iznosi 0,68, a za Županju 0,70 može se pretpostaviti da na cijelom toku rijeke u Hrvatskoj srednji godišnji protoci nose u sebi dugotrajnu memoriju.

Ključne riječi: srednji godišnji protok, Sava, Hrvatska, Hurstov eksponent

1. UVOD

Sliv rijeke Save (13.67° E - 20.58° E ; 42.43° N - 46.52° N) prostire se na teritoriju sljedećih šest država: (1) Slovenije; (2) Hrvatske; (3) Bosne i Hercegovine; (4) Srbije; (5) Crne Gore; (6) Albanije. Izvorišna zona nalazi se u Sloveniji, a rijeka Sava formira se spajanjem dva alpska vodotoka Save Dolinke (lijevi pritok) i Save Bohinjke (desni pritok). Ušće u Dunav nalazi se praktički u samom središtu Beograda, glavnog grada Srbije. Sa stanovišta prinosa vodnih količina rijeka, Sava predstavlja najznačajniji

pritok Dunava. Na prostoru sliva rijeke Save živi oko 8,2 milijuna stanovnika. Po izdašnosti voda Sava predstavlja osmu europsku rijeku. Površina sliva joj iznosi $97.277,2 \text{ km}^2$. Duljina korita rijeke Save iznosi 945 km, s tim da u Hrvatskoj protječe dionicom dugom 510 km (Orešić i sur. 2017a; ISRBC 2022). Površina sliva Save u Hrvatskoj iznosi $25.373,5 \text{ km}^2$, što predstavlja 44,9 % njenog državnog teritorija ili 26,1 % ukupnog riječnog sliva. Sliv rijeke Save je asimetričan s obzirom na to da desnoobalni pritoci čine 75 %, a lijevoobalni 25 % površine sliva.

Tablica 1: Osnovne karakteristike 13 vodomjernih postaja duž toka rijeke Save u Hrvatskoj na kojima se mjeri protok

R. br.	Postaja	R. km	A (km ²)	H (mnm)	Raspoloživo razdoblje
1	Drenje Brdovečko	693,4	10.750	132,754	2003.-2022.
2	Podsused	675,4	12.316	119,134	1949.-2022.
3	Zagreb	664,2	12.450	112,260	1926.-2022.
4	Rugvica	636,3	12.730	95,612	1926.-2016. Nedostaju: 1943.-1945., 1947., 1996.-1999., 2004., 2006., 2014.
5	Crnac	575,0	22.852	91,338	1955.-2022. Nedostaju: 1993.-1999., 2006.
6	Jasenovac	500,5	38.953	86,820	1926.-2022. Nedostaju: 1945., 1991.-2006.
7	Stara Gradiška	453,4	40.262	85,467	1937.-2022. Nedostaju: 1991.-2004.
8	Mačkovac	439,0	40.838	83,645	1951.-2022. Nedostaju: 1991.-2004.
9	Davor	416,0	47.179	82,594	1958.-2022. Nedostaju: 1994.-2004.
10	Slavonski Kobaš	390,5	48.744	82,690	1926.-2022. Nedostaju: 1945.-1946., 1994.-2004.
11	Slavonski Brod	360,0	50.858	81,800	1926.-2022. Nedostaju: 1994.-2003., 2016.
12	Županja	262,0	62.891	76,277	1929.-2022. Nedostaju: 1943.-1944.
13	Gunja	227,0		74,324	2012.-2022.

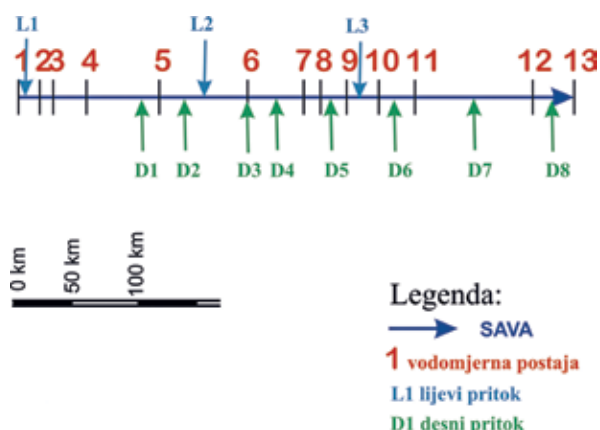
Tablica 2: Pritoci Save prikazani na slici 1 čija je slivna površina veća od 450 km²

Obala	Oznaka na slici 1	pritok	A (km ²)
lijeva	L1	Krapina	1237
	L2	Lonja + Ilova	6055
	L3	Orljava	1618
desna	D1	Kupa	10.226
	D2	Sunja	470
	D3	Una	9829
	D4	Jablanica	477
	D5	Vrbas	6274
	D6	Ukrina	1504
	D7	Bosna	10810
	D8	Tinja	904

Gornju Savu, od spoja Save Dolinke i Save Bohinjke do Rugvice (R. 636 km) karakterizira planinsko-brdski reljef. Područje srednje Sava, od Rugvice do ušća rijeke Drine (R. 178 km) predstavlja niski, aluvijalni dio, koji karakteriziraju široke poplavne ravnice i ušća brojnih pritoka. Područje donje Sava, započinje nizvodno od ušća rijeke Drine. Radi se o aluvijalnoj dionici rijeke bez značajnih pritoka. Najnizvodniji dio rijeke Save u dužini od oko 100 km pod utjecajem je uspora rijeke Dunav.

U ovom radu bit će analizirani svi raspoloživi nizovi srednjih godišnjih protoka Save proračunati na vodomjernim postajama u Hrvatskoj. U tablici 1 navedene su karakteristike (riječni kilometar – R. km;

površina sliva – A; kota nule vodomjera – H; raspoloživo razdoblje) 13 vodomjernih postaja duž rijeke Save na kojima Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) Hrvatske iz Zagreba mjeri i definira protok. Uočava se da na postajama postoje brojni prekidi u radu. Posebno treba ukazati na one koje su nastale kao posljedica ratnih razaranja od 1991. nadalje. Na rijeci Savi DHMZ mjeri vodostaje na sljedećim postajama, ali na njima ne mjeri i ne određuje protok: (1) Medsave (H = 125,874 mnm); (2) Dubrovčak (H = 94,530 mnm); (3) Tišina (H = 90,459 mnm); (4) Strelečko (H = 88,459 mnm); (5) Gušče (H = 89,135 mnm); (6) Slavonski Šamac (H = 80,696 mnm). Na slici 1 shematski su prokazani položaji 13



Slika 1: Shematska situacija rijeke Save u Hrvatskoj s ucrtanim položajima vodomjernih postaja, lijevih (L1 - L3) i desnih pritoka (D1 - D8) čije su površine sliva veće od 450 km²

vodomjernih postaja na kojima DHMZ mjeri i određuje protoke, a čiji su podaci analizirani u ovom radu. Ucertani su i položaji lijevoobalnih (L1 - L3) i desnoobalnih (D1 - D8) pritoka. Ucertani su samo oni pritoci čije su površine slivova veće od 450 km². U [tablici 2](#) navedeni su njihovi nazivi i površine slivova.

Prije iznošenja rezultata izvršenih analiza neophodno je osvrnuti se na od strane DHMZ-a definirane srednje godišnje protoke na vodomjernoj postaji Jasenovac. Radi se o jednoj od bitnih lokacija u području srednjeg dijela toka rijeke. Sam vodomjerni uređaj nalazi se oko 1,5 km **uzvodno** od ušća rijeke Une, jedne od glavnih pritoka rijeke Save na kojem se mjere vodostaji. U **Historijatu postaje Jasenovac** stoji sljedeće: "U razdoblju od **1926.** do **1991.** godine i od **2007.** godine nadalje podaci o protoku se odnose na ukupni protok Save i Une, jer se H/Q mjerenja vrše nizvodno od ušća Une u Savu i protočne krivulje se definiraju za taj mjerni profil. Za razdoblje od **1996.** do **2006.** godine protoci su za lokaciju na Savi uzvodno od utoka Une." Zbog toga se u ovom radu nije koristio niz srednjih godišnjih protoka definiran od strane DHMZ-a u razdoblju 1996. - 2006. iako se svi podaci za cijeli niz od 1926. do 2022. u dokumentaciji DHMZ-a navode zajedno. DHMZ bi trebao iz svojih službenih podataka koje daje na korištenje stručnoj javnosti jasno odvojiti ta dva podniza podataka, što nažalost nije učinjeno, te postoji opravdana sumnja da su u nekim novijim hidrološkim analizama tretirana zajedno oba podniza podataka što je moglo utjecati na točnost zaključaka.

Dugi vremenski nizovi srednjih godišnjih protoka opaženi na nekoj vodomjernoj postaji pružaju mogućnost analize razvoja procesa koji su se tijekom raspoloživog vremena motrenja odvijali na toj lokaciji. Kad se na nekom otvorenom vodotoku, kao što je slučaj Save u Hrvatskoj, raspolaže većim brojem vodomjernih postaja moguće je detaljnije i suptilnije pratiti razvoj hidroloških procesa. Cilj ovog rada je usporedba i kritička analiza svih raspoloživih službenih DHMZ-ovih nizova srednjih godišnjih protoka na 13 vodomjernih postaja duž toka Save u Hrvatskoj. Ti podaci su od neprocjenjive važnosti ne samo za stanovišta nego

i za potrebe inženjerske prakse. Pouzdani podaci o srednjim godišnjim protocima duž toka rijeke i tijekom dužeg vremena ključni su za razumijevanje dinamičnih hidroloških procesa i uočavanje promjena koje se u tom prostoru zbivaju. Raspolaganje točnim vrijednostima srednjih godišnjih protoka prvi je i bitni preduvjet za donošenje pravilnih i održivih odluka vezanih uz upravljanje vodnim resursima svakog otvorenog vodotoka.

Neće biti pretjerano ako se kaže da rijeka Sava za Hrvatsku predstavlja ključan ekološki, socijalni i ekonomski resurs. Savu i njene vode može se poistovjetiti s kičmom i glavnom arterijom krvotoka Hrvatske. Ona kao i njen cijeli sliv već duže vremena, a osobito u posljednjih nekoliko dekada, pod velikim su pritiskom, kako onim koje na njih vrši čovjek svojim zahvatima, tako i onim koji su posljedica aktualnih klimatskih promjena. Namjera je analiza izvršenih u ovom članku da našoj stručnoj, ali i široj javnosti, ukaže na moguće nedostatke postojećih saznanja vezanih uz hidrologiju rijeke Save te da to posluži kao poticaj da se to stanje, koliko je to moguće, što žurnije poboljša. Na kraju ovog uvodnog dijela članka autori žele istaknuti da pripremaju radove koji će analizirati minimalne i maksimalne godišnje protoke duž toka rijeke Save u Hrvatskoj.

2. PREGLED OBJAVLJENIH RADOVA KOJI TRETIRAJU HIDROLOŠKU PROBLEMATIKU SAVE U HRVATSKOJ

Rijeka Sava predstavlja za Hrvatsku izrazito važan prirodni fenomen. O njoj i njenim najrazličitijim svojstvima dosta je toga objavljeno. U ovom će se poglavlju dati kratki osvrt isključivo na one radove koji su prvenstveno vezani uz hidrološku problematiku i koji su objavljeni u posljednjih tridesetak godina u nekom od stručnih ili znanstvenih časopisa. Na izuzetan značaj hidrološkog aspekta rijeke Save u razvojnim vodoprivrednim planovima u svom su radu ukazali Srebrenović i Pilar (2000.).

Na hidrološki režim Save u Hrvatskoj značajno, ali do sada nedovoljno istraženo utječu promjene hidrološkog režima na uzvodnom dijelu kako samog vodotoka tako i unutar sliva koji se nalazi na području Slovenije. U Sloveniji je do sada izgrađeno osam hidroelektrana (Tootle i sur. 2023). Prva mala hidroelektrana Moste puštena je u rad 1952. godine, dok je prva veća hidroelektrana Mavčiče započela s radom 1986. Lanac od pet hidroelektrana na području Donje Save u Sloveniji (Vrhovo, Boštanj, Blanca, Krško, Brežice) izgrađen je u razdoblju između 2006. (HE Boštanj) i 2017. (HE Brežice) (Bonacci i Roje-Bonacci 2023). Namjerava se izgraditi još hidroelektranu Mokrice. O njihovom utjecaju na promjenu hidrološkog režima Save u Sloveniji nismo našli mnogo objavljenih radova. Ne navodeći detaljnije razloge Mikoš (2000.) procese erozije korita Save u Sloveniji objašnjava manjom produkcijom nanosa u slivu od Jesenica do

Mokrica. Ulaga i sur. (2008.) upozoravaju na smanjenju količine vode u cijeloj Sloveniji, osobito u sušnom razdoblju godine. Pri tome je taj proces osobito izražen na rijeci Savi na postajama Radovljica i Litija, kao i na brojnim pritokama. U radu se ne iznose detaljnije razlozi koji su uzrokovali ovaj opasan proces. Pouzdana procjena utjecaja funkcioniranja sustava slovenskih hidroelektrana na Savi na nizvodni hidrološki režim Save u Hrvatskoj, kao i činjenica da u slivu Save uočeni trendovi sniženja protoka nisu dovoljno izučeni te bi u tom smislu trebalo napraviti ozbiljne stručno-znanstvene pomake.

Na slivu rijeke Save u Hrvatskoj izvedeni su brojni radovi koji su utjecali na promjenu njenog hidrološkog režima (Kratofil 2000; Beraković 2009; Marušić 2022). Najčešće su ovi zahvati poduzimani sa svrhom zaštite od poplava (Kratofil i sur. 2011). Zaštita od poplava koja se temelji na tzv. sivim infrastrukturnim mjerama, kao što su nasipi i brane, uključuje tradicionalne sheme ublažavanja poplava. Dugogodišnja praksa je pokazala da se ovim pristupom ne može u potpunosti odgovoriti na izazov rastućih trendova poplava potaknutih utjecajima klimatskih promjena i promjena u korištenju zemljišta. U srednjem dijelu toka rijeke Save u Hrvatskoj primijenjen je tzv. zeleni pristup, tj. prirodno rješenje za ublažavanje poplava, kao što je uključivanje prirodnih retencijskih područja. Takav pristup pruža fleksibilnije i učinkovitije rješenje koje istovremeno značajno utječe na poboljšanje lokalne biološke raznolikosti i održivosti (Potočki i sur. 2021).

Uzdružni pad rijeke Save na dionici od granice sa Slovenijom do Siska podijeljen je na tri karakteristične poddionice. Od granice do Podsuseda pad iznosi 0,867 m/km, od Podsuseda do Rugvice 0,660 m/km, a od Rugvice do Siska 0,051 m/km (Kuspilić i sur. 2020). Rijeka na tom relativno kratkom potezu bitno mijenja karakteristike tečenja. Kako rijeka Sava protječe kroz glavni grad Hrvatske, Zagreb, ona za njega istovremeno predstavlja blagodat i opasnost. Stoga je i razumljivo da je o hidrološko-hidrogeološko-geomorfološkoj problematici odnosa Save i na širem lokalitetu Zagreba objavljen najveći broj radova. Brojni regulacijski radovi u koritu Save kod Zagreba započeti su krajem 19. stoljeća, dok je glavina zahvata obavljena između 1900. i 1918. godine kada korito Save kod Zagreba dobiva svoj današnji oblik (Slukan Altić 2010).

Daleko najrazornija poplava Zagreba desila se u noći s 25. na 26. listopada 1964. Vode rijeke Save poplavila su trećinu Zagreba, prekrivši više od šest tisuća hektara užeg gradskog područja na kojemu je živjelo 180 tisuća ljudi (Trninić 2014). Nakon poplave pristupilo se izgradnji sustava obrane od poplava Srednjeg Posavlja, unutar kojeg se Zagreb, Karlovac i Sisak uz obrambene nasipe brane od poplava i oteretnim kanalima. Povišeni su i nasipi, ugrađena je i dodatna zaštita od povratnih voda na ušću potoka Vrapčaka u Savu. Nakon rekordnih kiša u srpnju 1989. godine, kao mjera opreza, izgrađene su i retencije na svim gradskim potocima, bliže izvorima,

u brdskom dijelu grada. Današnji sustav zaštite od velikih voda rijeke Save dimenzioniran je na 1000 godišnju pojavu velikih voda. Svi vodni valovi su od tada uspješno sprovedeni rijekom Savom zahvaljujući izgradnji i održavanju dobrog sustava koji funkcionira i danas (<https://voda.hr/hr/novost/57-godina-od-velike-poplave-u-zagrebu>).

Hidrološkom problematikom sigurnosti od poplava grada Zagreba vodama rijeke Save detaljno je tretirana u nizu radova (Pavlin i Pletikapić 2005; Bonacci i Ljubenković 2008; Bonacci i Oskoruš 2011, 2014). Ukazano je na problem nedovoljno pouzdanih određivanja protoka pri prolasku velikih voda na potezu Save od granice sa Slovenijom do Zagreba. Naglašeno je da je nemoguće izgraditi apsolutno siguran sustav obrane od poplava, ali je moguće i nužno poduzeti mjere koje će na minimum svesti štete od poplava.

Poplava Save u Hrvatskoj 2010. dogodila se na području gradova Zaprešić, Samobor, Zagreb, Velika Gorica i na području općina Rugvica, Orle i Martinske Vesi. Poplava je počela prodorom vodenog vala iz Slovenije 19. rujna 2010. Detaljnu analizu poplavnih i velikih voda sliva Rijeke Save do Zagreba u rujnu 2010. izvršili su Trninić i Bošnjak (2023.). Autori su zaključili da je ova relativno nedavna poplava ukazala na svu složenost i ozbiljnost stanja koje zahtijeva mnogobrojnije klimatološke i hidrološke podatke koji bi omogućili poduzimanja pravovremenih mjera.

Kao posljedica brojnih, uglavnom nedovoljno analiziranih i slabo kontroliranih radova na slivu i u koritu rijeke Save došlo je do značajnih promjena u režimu pronosa nanosa duž toka Save. Jedna od najočitijih i ujedno najopasnijih promjena je trend produbljivanja korita Save u širem području Zagreba (Biondić 2000; Gilja i sur. 2010). Produbljivanje korita je uzrokovalo snižavanja razina podzemnih voda u vodonosniku iz kojeg se Zagreb opskrbljuje vodom (Kuspilić i Gilja 2016; Vujević i Posavec 2018). S namjerom zaustavljanja ili barem ublažavanja procesa erozije korita Save u području Zagreba, 1983. godine izgrađen je tzv. Te-To potopljeni preliv (prag) 6400 m nizvodno od vodomjernog profila Zagreb. Rekonstrukcijom praga 1993. godine kota krune je postavljena na 107,00 mnm. Problem je da se nizvodno od praga javlja značajna erozija dna korita koja ugrožava stabilnost praga i kontinuirano zahtijeva sanaciju (Kalinić i sur. 2019).

Sredinom svibnja 2014. u donjem je dijelu toka rijeke Save u Hrvatskoj došlo do velikih poplava zbog intenzivnih oborina uzrokovanih višednevnim zadržavanjem jake i duboke ciklone iznad jugoistočne Europe. Bosna i Hercegovina, Srbija te istočna Hrvatska primile su velike količine kiše, više od 200 litara u nekoliko dana, što je na tim područjima rezultiralo katastrofalnim poplavama, najvećim u do sada zabilježenoj povijesti (Abdulaj i sur. 2014; <https://hidro.dhz.hr/hidroweb/pocetna/Poplave/PoplaveSave.html>; https://klima.hr/razno/priopcenja/poplava_sava_2014.pdf). Ukupna materijalna šteta procijenjena je na oko 150 milijuna

euca, a izgubljena su i dva ljudska života.

Primjenom bivarijantnih kopola Gilja i sur. (2018.) procijenili su opasnost od istovremene pojave velike vode za dva ušća na rijeci Savi i njezinim najvećim pritokama Kupi i Uni. Rezultati su pokazali da se trend protoka procijenjenih bivarijantnom kopulom poklapa s mjerenjima protoka velike vode 2014. godine.

Problematicom analize trendova nizova karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) godišnjih, sezonskih i mjesečnih protoka na slivu Save i/ili na postajama na samoj rijeci Savi bavili su se brojni istraživači (Bonacci i Ljubenkov 2004; Šegota i Filipčić 2007; Trninić i Bošnjak 2009; Barbalić i Petraš 2012; Čanjevac 2012; Barbarić i Kuspilić 2014; Bonacci 2014; Čanjevci i Orešić 2015, 2018; Orešić i sur. 2017b). Koristeći vremenske nizove različitih duljina opaženi na različitim vodomjernim postajama gotovo u svim radovima autori dolaze do sličnih zaključaka. Ukazuje se na to da postoji trend snižavanja minimalnih i srednjih godišnjih protoka koji je intenziviran u posljednjim dekadama. Što se tiče nizova maksimalnih protoka, trend snižavanja nije uočen. Nizovi maksimalnih godišnjih vodostaja na tri analizirane postaje na Savi (Čatež, Podsused i Zagreb) u razdoblju 1926. - 2021. ne pokazuju trend sniženja. Što više na profilu Save u Zagrebu uočen je trend porasta u razdoblju od 2004. do 2021. (Bonacci i Roje-Bonacci 2023).

Bez obzira na relativnu brojnost objavljenih radova vezanih uz najširu problematiku hidrologije i vodnih resursa Save u Hrvatskoj ne možemo se oteti dojmu da tom važnom segmentu održivog razvoja u našoj republici nije posvećeno dovoljno pažnje, stoga bi trebalo intenzivirati istraživanja kako bi se bolje pripremili na neizvjesnu budućnost.

3. PODACI I METODE

3.1. Korišteni podaci

U radu su korišteni podaci srednjih godišnjih protoka Save na svih 13 vodomjernih postaja duž toka rijeke Save u Hrvatskoj na kojima DHMZ iz Zagreba vrši mjerenja i proračunava protoke. U [tablici 1](#) navedeni su svi osnovni podaci ovih 13 vodomjernih postaja.

3.2. Korištene metode

Metoda linearne regresije korištena je da se kvantitativno izrazi povezanost (korelacija) između zavisne (y) i nezavisne (x) varijable. Jednadžba linearne regresije glasi:

$$y = (a \cdot x) + b \quad (1)$$

Matematički postupak za proračunavanje pravca regresije koji prolazi kroz zadani skup točaka zasnovan je na minimiziranju sume kvadrata odstupanja zadanih točaka od tog pravca, a naziva se metodom najmanjih kvadrata. Koeficijent a predstavlja nagib pravca regresije čija je dimenzija m^3/s godišnje tijekom analiziranog

vremenskog niza. Kao takav on je indikator prosječnog intenziteta trenda porasta ili opadanja srednjih godišnjih protoka ili razlika između srednjih godišnjih protoka susjednih vodomjernih postaja raspoloživih vremenskih nizova.

Trendovi u nizovima srednjih godišnjih protoka ključni su za prepoznavanje utjecaja klimatskih promjena i/ili ljudskih djelatnosti na hidrološki režim analizirane rijeke i na analiziranoj lokaciji, ali i za upravljanje njihovim vodnim resursima. Računati su linearni trendovi vremenskih nizova srednjih godišnjih protoka i njihovih razlika između susjednih vodomjernih postaja. Za svaki pojedini vremenski niz izračunati su koeficijenti determinacije R^2 . Koeficijent linearne korelacije R brojčani je pokazatelj čvrstoće zavisnosti i smjera linearne povezanosti između dvije analizirane varijable. Njegova se apsolutna vrijednost kreće u rasponu od 0 do 1. Ako je npr. $R = 0,8$ vrijednost $R^2 = 0,64$, znači da se 64 % ukupne varijacije zavisne varijable može objasniti linearnom ovisnošću, dok se preostalih 36 % ne može objasniti linearnom ovisnošću. Predznak koeficijenta linearne korelacije svjedoči o smjeru linearne povezanosti između dvije varijable. U slučaju da je predznak pozitivan (+) znači da s porastom vrijednosti nezavisne varijable raste i vrijednost zavisne varijable. Negativan predznak (-) ukazuje da s porastom nezavisne varijable dolazi do opadanja vrijednosti zavisne varijable. Statistička značajnost linearnih trendova ocjenjivana je Mann-Kendallovim testom (Mann 1945; Kendall 1975; Husain Shourov i Mahmud 2019).

Metodom *Rescaled Adjusted Partial Summs* (RAPS) analizirani su vremenski nizovi srednjih godišnjih protoka (Garbrecht i Fernandez 1984). Izraz za proračun glasi:

$$RAPS_k = \sum_k ((Q_k - Q_{pr})/\sigma_Q) \quad (2)$$

kod čega je Q_{pr} prosječna vrijednost analiziranog vremenskog niza koji se sastoji od n članova, σ_Q standardna devijacija istog niza, $k=1,2,\dots, n$ predstavlja brojač tijekom sumiranja.

F-test se koristio za određivanje statističke značajnosti razlika varijanci, dok se t-testom vršila procjena statističke značajnosti razlika prosječne vrijednosti dva susjedna vremenska podrazdoblja (Pavlič 1965). Za sva tri prethodno spomenuta testa kao nivo statističke značajnosti razlika korištena je vrijednost vjerojatnost, $p < 0,05$.

U ovom radu je izračunat Hurstov eksponent za vremenske nizove srednjih godišnjih protoka Save kod Zagreba u razdoblju 1926. - 2022. i Save kod Županje u razdoblju 1929. - 2022. Računati su rasponi kumulativnih odstupanja srednjih godišnjih protoka u pripadnom trenutku od prosječnog protoka cijelog niza. Hurst (1951., 1956.) te Hurst i sur. (1965.) su zaključili da se skalirani raspon R/o (o predstavlja standardnu devijaciju niza), povećava s duljinom serije n. Razlika protoka Q_i i prosječnog protoka cijelog niza Q_{pr} u trenutku i, ΔQ_i na

kraju svakog razdoblja i iznosi:

$$S_i = \Delta Q_i = Q_i - Q_{pr} \quad (3)$$

Izraz, ovisno o predznaku, opisuje punjenje ili pražnjenje sustava. Nakon razdoblja $i = n$ sukcesivna suma kumulativnih odstupanja računa se izrazom:

$$\sum_n S_i = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q_n \quad (4)$$

Maksimalna se vrijednost naziva maksimalni suvišak ili maksimalna parcijalna suma odstupanja te se označava kao S_n^+ . Minimalna se naziva minimalni deficit ili minimalna parcijalna suma odstupanja, a označava se kao S_n^- . Raspon R računa se kao zbroj ovih dviju vrijednosti:

$$R = S_n^+ + |S_n^-| \quad (5)$$

Raspon R predstavlja veličinu sustava (akumulacije) potrebnu da se održava istjecanje Q_{pr} (prosječna vrijednost svih dotoka), ukoliko su dotoci jednaki Q_i .

Prirodni fenomen i duljina serije prema Hurstovim istraživanjima dani su empirijskom relacijom:

$$R/\sigma = (n/2)^H \quad (6)$$

kod čega H označava Hurstov eksponent. Fenomen Hursta, tj. perzistentnost u analiziranom vremenskom nizu javlja se kad je vrijednost, H, veća od 0,5.

4. REZULTATI I RASPRAVA

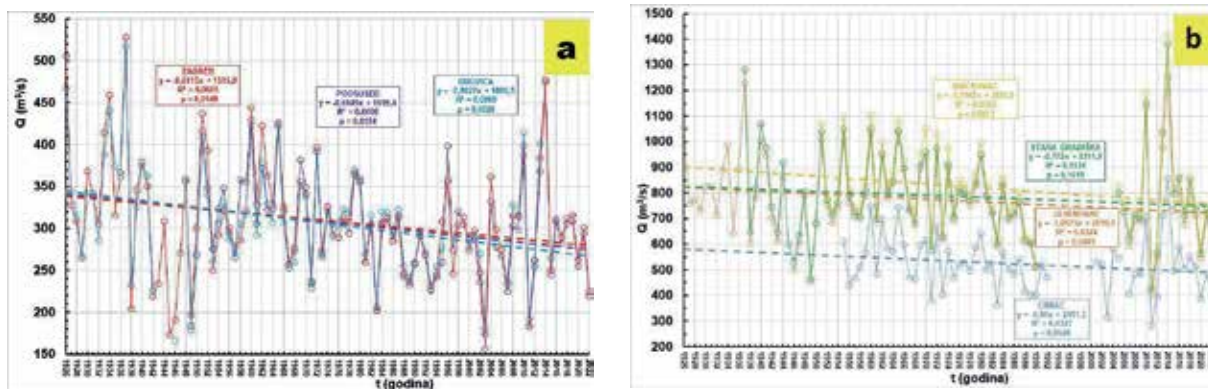
4.1. Nizovi srednjih godišnjih protoka

U [tablici 3](#) navedene su minimalne, prosječne i maksimalne vrijednosti srednjih godišnjih protoka na svih 13 raspoloživih vodomjernih postaja u raspoloživom razdoblju od N godina koje je različito za svaku od postaja.

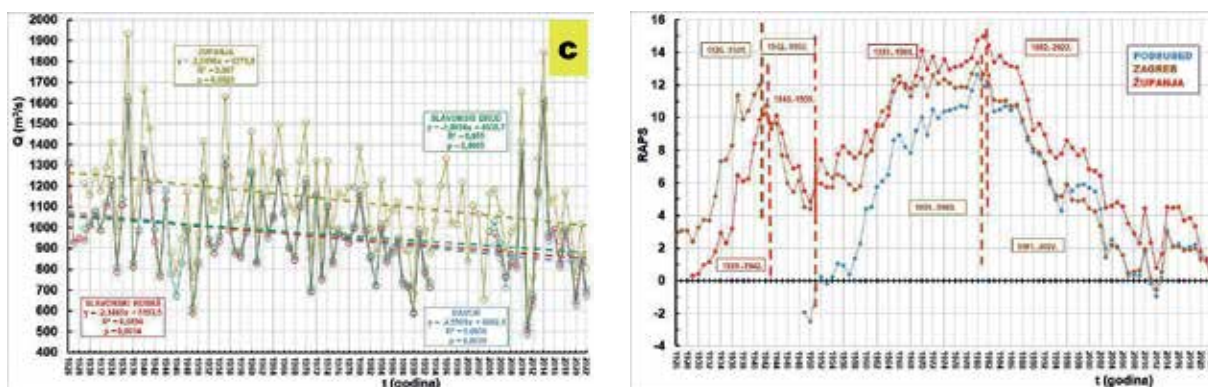
Na [slici 2a](#) ucrtni su nizovi i srednjih godišnjih protoka Save na vodomjernih postajama Podsused, Zagreb i Rugvica. Duljine nizova nisu identične, a u slučaju Rugvice postoje i određeni prekidi u radu (vidi [tablicu 1](#)). Kod sva tri niza moguće je uočiti statistički značajan trend opadanja s obzirom na to da su vrijednosti vjerojatnosti M-K testa $p < 0,05$. Na [slici 2b](#) ucrtni su nizovi i srednjih godišnjih protoka Save na vodomjernih postajama Crnac, Jasenovac, Stara Gradiška i Mačkovac. I kod ovih postaja duljine se nizova razlikuju te postoje prekidi u radu (vidi [tablicu 1](#)). Na sve četiri postaje uočava se trend opadanja s tim da je on statistički značajan samo na postajama Jasenovac i Mačkovac. Na [slici 2c](#) ucrtni su nizovi srednjih godišnjih protoka Save na vodomjernih postajama Davor,

Tablica 3: Minimalne, prosječne i maksimalne vrijednosti srednjih godišnjih protoka na svih 13 raspoloživih vodomjernih postaja duž toka rijeke Save u Hrvatskoj u raspoloživom razdoblju od N godina

Postaja	Q (m ³ /s)			N (godina)	Raspoloživo razdoblje
	min	prosjeak	max		
Drenje Brdovečko	166	266,6	425	20	2003.-2022.
Podsused	156	300,3	474	74	1949.-2022.
Zagreb	173	309,2	528	97	1926.-2022.
Rugvica	166	309,5	517	80	1926.-2016. Nedostaju: 1943.-1945., 1947., 1996.-1999., 2004., 2006., 2014.
Crnac	284	523,6	856	59	1955.-2022. Nedostaju: 1993.-1999., 2006.
Jasenovac	350	752,1	1252	80	1926.-2022. Nedostaju: 1945., 1991.-2006.
Stara Gradiška	424	786,4	1380	72	1937.-2022. Nedostaju: 1991.-2004.
Mačkovac	437	815,0	1419	58	1951.-2022. Nedostaju: 1991.-2004.
Davor	488	916,0	1573	54	1958.-2022. Nedostaju: 1994.-2004.
Slavonski Kobaš	505	961,3	1609	83	1926.-2022. Nedostaju: 1945.-1946., 1994.-2004.
Slavonski Brod	530	970,1	1629	83	1926.-2022. Nedostaju: 1994.-2003., 2016.
Županja	614	1134,2	1935	92	1929.-2022. Nedostaju: 1943.-1944.
Gunja	785	1129,7	1884	11	2012.-2022.



Slika 2a, b, c: Nizovi srednjih godišnjih protoka Save na vodomjernim postajama Zagreb, Podsused, Rugvica (slika 2a), Crnac, Jasenovac, Stara Gradiška, Mačkovac (slika 2b) i Davor, Slavonski Kobaš, Slavonski Brod, Županja (slika 2c) u raspoloživim razdobljima. Upisane su jednadžbe pravaca regresije, vrijednosti koeficijenta determinacije R2 te vjerojatnost M-K testa p.



Slika 3: Tri RAPS vremenska niza za srednje godišnje protoke Save kod Podsuseda (1949. - 2022.), Save kod Zagreba (1926. - 2022.) i Save kod Županje (1929. - 2022.).

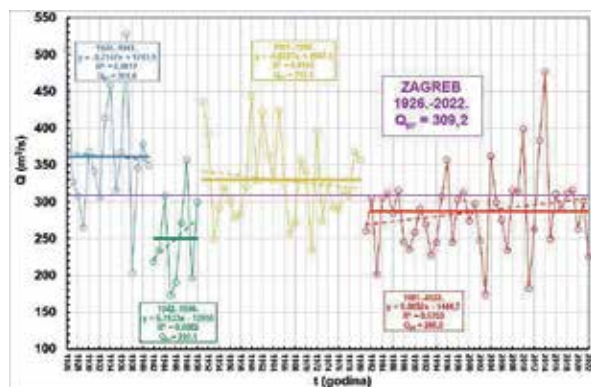
Slavonski Kobaš, Slavonski Brod i Županja. I kod ove četiri postaje duljine se nizova razlikuju te postoje prekidi u radu (vidi tablicu 1). Na sve četiri postaje uočava se statistički značajan trend opadanja s obzirom na to da su vrijednosti vjerojatnosti M-K testa $p < 0,05$. Kad se usporede vrijednosti koeficijenta linearne regresije, a, za 11 nizova podataka prikazanih na slici 2 moguće je uočiti da se vrijednosti povećavaju kako se ide nizvodno duž toka rijeke Save u Hrvatskoj. U gornjem dijelu toka na prve tri postaje (Podsused, Zagreb i Rugvica) vrijednosti koeficijenta kreću se između 6,1 i 8,0 m³/10

godina. U srednjem dijelu toka na četiri postaje (Crnac, Jasenovac, Stara Gradiška i Mačkovac) kreću se između 7,7 i 15,2 m³/10 godina. Značajan porast opadanja vrijednosti koeficijenta linearne regresije, a, javljaju se na četiri postaje (Davor, Slavonski Kobaš, Slavonski Brod i Županja) u donjem toku rijeke Save u Hrvatskoj. Vrijednosti se kreću između 18,1 i 21,5 m³/10 godina.

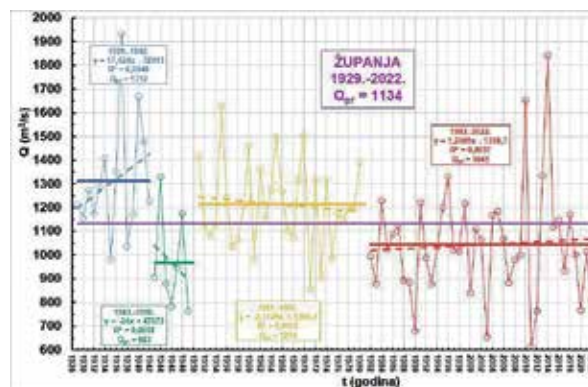
Različite duljine nizova i prekidi u motrenjima zasigurno utječu na mogućnost pouzdanih usporedbi

Tablica 4: Prosječne vrijednosti podnizova srednjih godišnjih protoka u podrazdobljima određenim RAPS metodom (vidi sliku 3) na vodomjernim postajama Zagreb i Županja s upisanim vjerojatnostima statističke značajnosti razlika varijanci i prosječnih srednjih vrijednosti, p, F-testa i t-testa između susjednih podrazdoblja. Crveno podebljano označeni su slučajevi kad se prosječne vrijednosti podnizova srednjih godišnjih protoka međusobno statistički značajno razlikuju na razini od $p < 0,05$.

Postaja	podrazdoblje	Q (m³/s)	p	
			F-test	t-test
Zagreb	1926.-1941.	361,6	0,4085	2,1E-03
	1942.-1950.	250,1		8,3E-04
	1951.-1980.	330,1	0,9892	2,1E-03
	1981.-2022.	286,9		
Županja	1929.-1942.	1312	0,5012	3,3E-03
	1943.-1950.	969,4		1,9E-03
	1951.-1981.	1214	0,1686	1,5E-03
	1982.-2022.	1045		



Slika 4: Četiri podniza srednjih godišnjih protoka Save kod Zagreba određene RAPS metodom (vidi sliku 3) u podrazdobljima: 1926. - 1941.; 1942. - 1950.; 1951. - 1980.; 1981. - 2022.



Slika 5: Četiri podniza srednjih godišnjih protoka Save kod Županje određene RAPS metodom (vidi sliku 3) u podrazdobljima: 1929. - 1942.; 1943. - 1950.; 1951. - 1981.; 1982. - 2022.

ponašanja nizova srednjih godišnjih postaja duž toka Save. Bez obzira na tu činjenicu jasno se uočava trend opadanja na svih 11 analiziranih postaja. Vrijednosti koeficijenta linearne regresije, a, ukazuju na to da se proces opadanja intenzivira idući nizvodno duž toka rijeke. Trendovi, tj. pravci regresije za postaje Drenje Brdovečko i Gunja nisu analizirani, jer su im nizovi prekratki.

Na slici 3 prikazana su tri niza RAPS-ova za srednje godišnje protoke Save kod Podsuseda (1949. - 2022.), Zagreba (1926. - 2022.) i Županje (1929. - 2022.). Uočava se velika sličnost ponašanja na sve tri analizirane postaje. Nastavno će se razmatrati ponašanje vremenskih nizova na samo dvije od njih koje raspolažu s gotovo identično dugim nizovima, Save kod Zagreba i Županje. U oba niza utvrđeno je postojanje 4 gotovo identična podniza. U tablici 4 navedene su prosječne vrijednosti podnizova srednjih godišnjih protoka u podrazdobljima određenim RAPS metodom (vidi sliku 3) na vodomjernim postajama Zagreb i Županje. Upisane su vjerojatnosti, p, F-testa i t-testa između susjednih podrazdoblja. Vidljivo je da F-test potvrđuje da se varijance podnizova statistički značajno ne razlikuju. Međutim prosječne vrijednosti susjednih podnizova statistički se izrazito značajno razlikuju na nivou vjerojatnosti $p < 0,001$. Zanimljivo je zaključiti o gotovo identičnom ponašanju hidrološkog

režima Save na dvije postaje udaljene 402 km čije se prosječne vrijednosti srednjih godišnjih protoka značajno razlikuju. One u Županji su veće od onih u Zagrebu 3,66 puta.

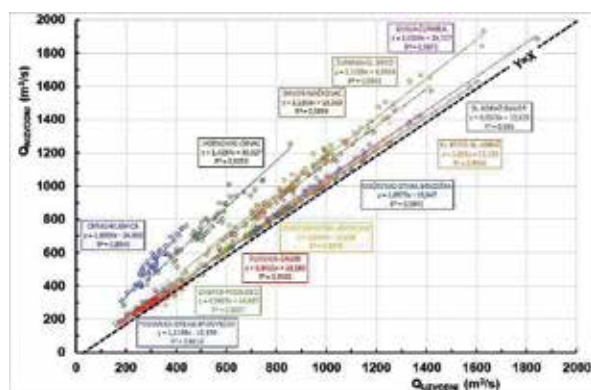
Na slici 4 ucrtna su četiri podniza srednjih godišnjih protoka Save kod Zagreba određene RAPS metodom (vidi sliku 3) u podrazdobljima: 1926. - 1941.; 1942. - 1950.; 1951. - 1980.; 1981. - 2022.

Na slici 5 prikazana su četiri podniza srednjih godišnjih protoka Save kod Županje određene RAPS metodom (vidi sliku 3) u podrazdobljima: 1929. - 1942.; 1943. - 1950.; 1951. - 1981.; 1982. - 2022. Ucrtnane su i upisane prosječne vrijednosti svakog od podnizova. Za svaki podniz definirani su i ucrtni pravci regresije i njihovi koeficijenti determinacije R^2 .

4.2. Analiza odnosa srednjih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja

U okviru ovog poglavlja analizirat će se odnos između nizova srednjih godišnjih protoka susjednih vodomjernih postaja. Kako se duljine nizova međusobno na vodomjernim postajama razlikuju te kako u nekim od postaja ima povremenih prekida u radu, usporedbe su se vršile samo za one godine kad na obje susjedne vodomjerne postaje postoje opažanja. Na slici 6 grafički je prikazan odnos između srednjih godišnjih protoka susjednih nizvodnih (os y) i uzvodnih (os x) vodomjernih postaja.

U tablici 5 unesene su vrijednosti koeficijenta linearne regresije a i koeficijenta determinacije R^2 za istovremene nizove srednjih godišnjih protoka između susjednih postaja. Vrijednosti koeficijenta determinacije vrlo su visoke i kreću se od minimalnih 0,885 za odnos između vodomjernih postaja Crnac i Rugvica do maksimalnih 0,997 za odnos između vodomjernih postaja Slavonski Kobaš i Slavonski Brod. Pri procjeni pouzdanosti ovih pokazatelja treba biti svjestan činjenice da se broj godina, N, kad istovremeno postoje mjerenja na obje susjedne vodomjerne postaje kreće u rasponu od 11 do 80. Važno je uočiti da pravci



Slika 6: Odnos između srednjih godišnjih protoka susjednih nizvodnih (os y) i uzvodnih (os x) vodomjernih postaja

Tablica 5: Koeficijenti determinacije R^2 za istovremene nizove srednjih godišnjih protoka između susjednih postaja

SUSJEDNE POSTAJE	N (godina)	a	R^2
PODSUSED-DRENJE BRDOVEČKO	20	1,11	0,982
ZAGREB-PODSUSED	74	0,96	0,901
RUGVICA-ZAGREB	80	0,90	0,938
CRNAC-RUGVICA	51	1,80	0,885
JASENOVAC-CRNAC	51	1,41	0,925
STARA GRADIŠKA-JASENOVAC	69	1,05	0,988
MAČKOVAC-STARA GRADIŠKA	58	1,06	0,994
DAVOR-MAČKOVAC	51	1,12	0,990
SLAVONSKI Kobaš-DAVOR	54	1,00	0,995
SLAVONSKI BROD-SLAVONSKI Kobaš	79	1,01	0,997
ŽUPANJA-SLAVONSKI BROD	81	1,17	0,983
GUNJA-ŽUPANJA	11	1,02	0,997

Tablica 6: Minimalne, $Q_{\min}$, prosječne, Q_{pr} , i maksimalne, $Q_{\max}$, srednje godišnje protoke susjednih vodomjernih postaja tijekom istovremenog rada. Broj godina kada su istovremeno određeni protoci na susjednim postajama, N. Vjerojatnost, p, statističke značajnosti razlika između prosječnih vrijednosti srednjih godišnjih nizova susjednih vodomjernih postaja određeni t-testom. Crveno podebljano označeni su slučajevi kad se prosječne vrijednosti nizova srednjih godišnjih protoka međusobno statistički značajno razlikuju na razini od $p < 0,05$. Ljubičasto podebljano označeni su slučajevi kad je protok na uzvodnoj postaji veći od onog na nizvodnoj.

postaja	N (godina)	$Q_{\min}$ (m^3/s)	Q_{pr} (m^3/s)	p	$Q_{\max}$ (m^3/s)
Drenje Brdovečko	20	166	266,6	0,341	425
Podsused		156	287,2		474
Podsused	74	156	300,3	0,753	474
Zagreb		174	303,4		477
Zagreb	80	174	312,0	0,812	528
Rugvica		166	309,5		517
Rugvica	51	181	303,2	9,7E-24	423
Crnac		284	521,8		748
Crnac	51	284	529,5	4,2E-14	856
Jasenovac		407	774,3		1252
Jasenovac	69	407	768,7	0,486	1252
Stara Gradiška		424	789,8		1380
Stara Gradiška	58	424	789,6	0,652	1380
Mačkovac		437	815,0		1419
Mačkovac	51	437	808,9	4,0E-03	1419
Davor		488	922,1		1573
Davor	54	488	916,0	0,766	1573
Slavonski Kobaš		505	927,6		1595
Slavonski Kobaš	79	505	957,0	0,651	1609
Slavonski Brod		530	977,9		1629
Slavonski Brod	81	530	970,0	3,6E-06	1629
Županja		614	1144,5		1932
Županja	11	764	1082,4	0,727	1841
Gunja		785	1129,7		1884

regresije imaju u devet slučajeva vrijednost koeficijenta linearne regresije $a > 1$, a u dva slučaja je $a < 1$.

U tablici 6 unesene su vrijednosti minimalnih $Q_{\min}$

prosječnih, Q_{pr} i maksimalnih $Q_{\max}$ srednjih godišnjih protoka susjednih vodomjernih postaja tijekom godina istovremenog rada N. Vjerojatnost p statističke

Tablica 7: Minimalne, prosječne i maksimalne razlike, ΔQ , srednjih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. Koeficijent determinacije, R^2 , nizova razlika srednjih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. Broj godina kada su istovremeno određeni protoci na susjednim postajama, N. U četvrtom stupcu upisan je broj godina, N1, kad je protok na uzvodnoj postaji veći ili jednak od onog na nizvodnoj.

	SUSJEDNE POSTAJE	N (godina)	N1 ($\Delta Q \leq 0$) (godina)	R^2	ΔQ (m ³ /s)		
					min	prosjeak	max
ΔQ_1	PODSUSED-DRENJE BRDOVEČKO	20	1	0,0978	-10	20,5	49
ΔQ_2	ZAGREB-PODSUSED	74	24	0,0134	-72	3,1	51
ΔQ_3	RUGVICA-ZAGREB	80	40	0,0782	-53	-2,6	58
ΔQ_4	CRNAC-RUGVICA	51	0	-0,0572	92	218,6	325
ΔQ_5	JASENOVAC-CRNAC	51	0	-0,0743	110	243,7	428
ΔQ_6	STARA GRADIŠKA-JASENOVAC	69	5	0,0013	-15	21,0	128
ΔQ_7	MAČKOVAC-STARA GRADIŠKA	58	0	-0,1173	5	25,4	95
ΔQ_8	DAVOR-MAČKOVAC	51	0	-0,4585	47	113,1	175
ΔQ_9	SLAVONSKI KOBAŠ-DAVOR	54	13	0,3964	-14	11,6	55
ΔQ_{10}	SLAVONSKI BROD-SLAVONSKI KOBAŠ	79	1	0,0016	-4	20,9	58
ΔQ_{11}	ŽUPANJA-SLAVONSKI BROD	81	0	-0,1637	60	174,6	303
ΔQ_{12}	GUNJA-ŽUPANJA	11	0	-0,1244	18	47,4	77

značajnosti razlika između prosječnih vrijednosti srednjih godišnji nizova susjednih vodomjernih postaja određene su t-testom. Crveno podebljano označeni su slučajevi kad se prosječne vrijednosti nizova srednjih godišnjih protoka međusobno statistički značajno razlikuju na razini od $p < 0,05$. Statistički značajne razlike javljaju se isključivo na dionicama rijeke Save na kojima postoji ušće većih pritoka kao što su Kupa (dionica Rugvica - Crnac), Una (dionica Crnac - Jasenovac), Vrbas (dionica Mačkovac - Davor) i Bosna (dionica Slavonski Brod - Županja). Ljubičasto podebljanim brojevima označen su slučajevi kad je protok na uzvodnoj postaji veći ili jednak od onog na nizvodnoj. Ta se situacija pojavila kod minimalnih srednjih godišnjih protoka između postaja Drenje Brdovečko i Podsused te u slučaju minimalnih, srednjih i maksimalnih godišnjih protoka između postaja Zagreb i Rugvica. Radi se nelogičnom ponašanju jer bi srednji godišnji protoci nizvodnih postaja, bez obzira radi li se o minimalnim, prosječnim ili maksimalnim srednjim godišnjim protocima, trebali uvijek biti veći od onih na uzvodnim postajama.

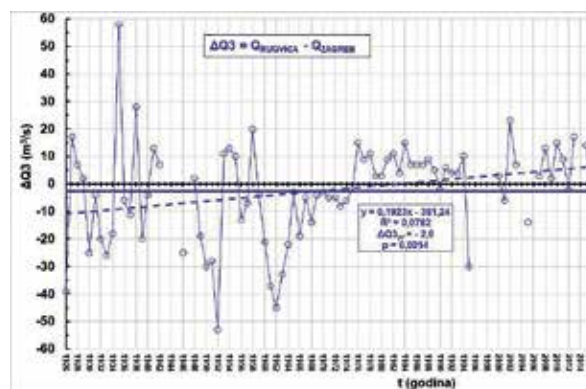
4.3. Analiza razlika srednjih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja

Na potrebu analize razlika srednjih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja ukazala je konstatacija iznesena u posljednjem paragrafu prethodnog poglavlja.

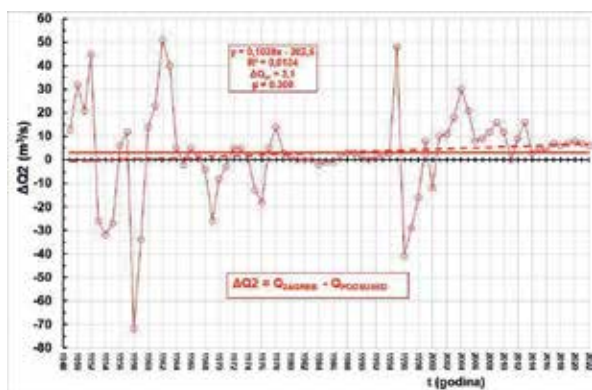
U tablici 7 upisane su minimalne, prosječne i

maksimalne razlike ΔQ srednjih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja te vrijednosti koeficijenta determinacije R^2 nizova razlika srednjih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. U trećem stupcu je naveden broj godina N kada su istovremeno određeni protoci na susjednim postajama dok je u četvrtom stupcu upisan broj godina N1, kad je protok na uzvodnoj postaji veći ili jednak od onog na nizvodnoj.

Na čak pet dionica rijeke Save javljaju se godine kada je nizvodni protok manji od uzvodnog. Posebno je zabrinjavajuća situacija na dionici Zagreb - Rugvica. Čak tijekom 40 godina od ukupno 80 srednji godišnji protok Save kod Rugvice jednak je ili manji od onog u Zagrebu. Površina sliva Save na vodomjernoj postaji Rugvica veća je od one na vodomjernoj postaji Zagreb za 280 km², pa



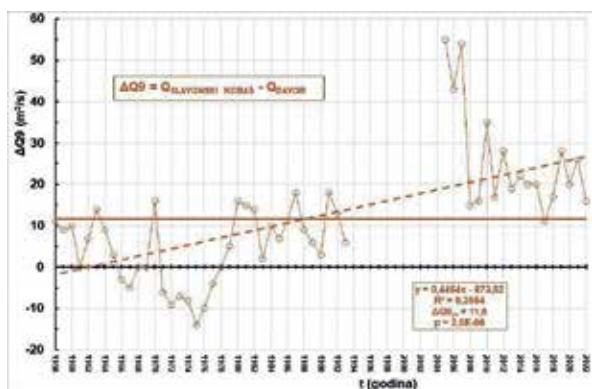
Slika 7: Niz razlika srednjih godišnjih protoka Rugvice i Zagreba ΔQ_3 u razdoblju zajedničkog rada



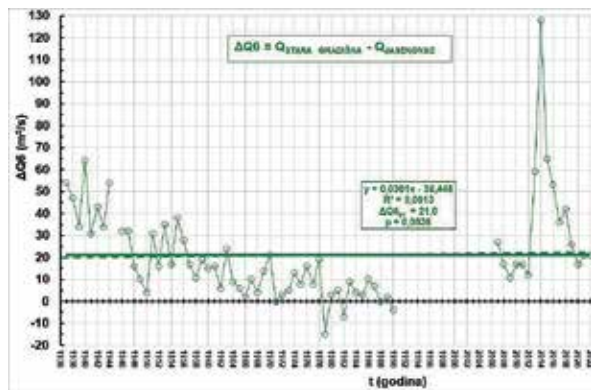
Slika 8: Niz razlika srednjih godišnjih protoka Zagreba i Podsuseda ΔQ_2 u razdoblju zajedničkog rada

se čini nevjerojatnim da su njeni srednji godišnji protoci manji od onih na postaji Zagreb. Vrlo vjerojatno se radi o nepouzdanom određenim krivuljama protoka na osnovi nedovoljnog broja vodomjerenja. Na slici 7 ucrtan je niz razlika srednjih godišnjih protoka, $\Delta Q = Q_{\text{RUGVICA}} - Q_{\text{ZAGREB}}$. Vidljivo je da se većina slučajeva kad je, $\Delta Q \leq 0$, javlja do 1976. godine. Poslije te godine javlja se tek šest slučajeva, iako treba napomenuti da je onaj koji se dogodio 1995., kada je razlika bila čak $30 \text{ m}^3/\text{s}$, krajnje upozoravajući. Prosječni višegodišnji protok u 80 godina zajedničkog rada na Rugvici bio je $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ niži od onog u Zagrebu što je neprihvatljivo. Objašnjenje treba tražiti u tome da su srednje godišnje protoke određene na Rugvici vrlo nepouzdanе jer je logično za pretpostaviti da su one definirane na profilu Zagreb pouzdanije i vjerojatno najtočnije na hrvatskom dijelu Save.

Treba detaljno razmotriti i pouzdanost određivanja protoka na profilu Podsused jer su se na dionici Save između Podsuseda i Zagreba pojavile čak 24 godine kada je srednji godišnji protok na Podsusedu bio viši ili jednak onog u Zagrebu (slika 8). Površina sliva Save kod Zagreba veća je od površine sliva Save kod Podsuseda za 134 km^2 . Ne radi se o velikoj površini, pa se manje greške među srednjim godišnjim protocima mogu očekivati. Međutim, razlike koje su se pojavile npr. 1995. i 1996. teško su objašnjive. Prve spomenute godine (1995.) srednji protok kod Podsuseda bio je $48 \text{ m}^3/\text{s}$ veći od onog u Zagrebu, a 1996. je bio manji za 41



Slika 10: Niz razlika srednjih godišnjih protoka Slavanskog Kobaša i Davora ΔQ_9 u razdoblju zajedničkog rada



Slika 9: Niz razlika srednjih godišnjih protoka Stare Gradiške i Jasenovca ΔQ_6 u razdoblju zajedničkog rada

m^3/s . Već površni pogled na sliku 8 navodi na zaključak da su u razdoblju 1949. - 1978. srednji godišnji protoci Podsuseda u prevelikom i neprihvatljivom raskoraku u odnosu na srednje godišnje protoke Zagreba. Zaključak je najvjerojatnije identičan, kao i u slučaju odnosa srednjih godišnjih protoka Zagreba i Rugvice.

Sučaj vremenskog niza razlika između srednjih godišnjih protoka Save na vodomjernim profilima Stara Gradiška i Jasenovac ΔQ_6 posebno je intrigantan i kao takav traži dodatna razjašnjenja i detaljne analize (slika 9). U podrazdoblju od 1937. - 1990. niz razlika je imao značajan trend opadanja. Štoviše, pojavile su se i negativne vrijednosti, što je teško objasniti. U nizu mjerenja koja su vršena poslije obnove postaja u podrazdoblju od 2007. do 2022. srednji godišnji protoci na profilu Stare Gradiške bili su uvijek veći od onih na postaji Jasenovac. Najveća razlika pojavila se 2014. godine kada je iznosila čak $128 \text{ m}^3/\text{s}$. To je godina kada je u donjem toku Save došlo do proboja nasipa i velike poplave. Površina sliva Save na profilu Stara Gradiška veća je od površine sliva na profilu Jasenovac (uz uključen sliv Une) 1309 km^2 . Neophodno je detaljnije izučiti ovu problematiku.

Na slici 10 je prikazan niz razlika između srednjih godišnjih protoka Save na vodomjernim profilima Slavonski Kobaš i Davor ΔQ_9 . I na ovoj dionici situacija je slična kao na dionici Save između Stare Gradiške i Jasenovca. U podrazdoblju 1958. - 1993. razlike su bile značajno manje nego u podrazdoblju 2006. - 2022. Štoviše, u prvom se podrazdoblju pojavilo čak 13 godina kad su protoci na nizvodnoj postaji Slavonski Kobaš bili jednaki ili manji od onih na uzvodnoj postaji Davor. Razlika u površini slivova za ove dvije susjedne postaje iznosi 1665 km^2 te je teško (nemoguće) prihvatiti da na uzvodnoj postaji srednji godišnji protoci mogu biti veći od onih na nizvodnoj postaji.

U tablici 8 nalaze se vrijednosti koeficijenata determinacije R^2 između nizova srednjih godišnjih protoka Q i godišnjih razlika protoka ΔQ susjednih vodomjernih postaja. Vrijednosti koeficijenata determinacije R^2 kreću se u velikom rasponu od negativnih vrijednosti do vrlo visokih kao npr. za dionice Crnac - Rugvica i Županja - Slavonski Brod.

Tablica 8: Vrijednosti koeficijenta determinacije, R^2 , između nizova srednjih godišnjih protoka, Q (nezavisna varijabla), i godišnjih razlika protoka, ΔQ (zavisna varijabla), susjednih vodomjernih postaja, za nizove koji imaju, N , godina zajedničkih opažanja

SUSJEDNE POSTAJE	N (godina)	R^2 UZVODNI	R^2 NIZVODNI
PODSUSED-DRENJE BRDOVEČKO	20	0,681	0,506
ZAGREB-PODSUSED	74	-0,015	0,039
RUGVICA-ZAGREB	80	-0,157	-0,024
CRNAC-RUGVICA	51	0,603	0,892
JASENOVAC-CRNAC	51	0,508	0,770
STARA GRADIŠKA-JASENOVAC	69	0,135	0,219
MAČKOVAC-STARA GRADIŠKA	58	0,333	0,407
DAVOR-MAČKOVAC	51	0,524	0,625
SLAVONSKI KOBAS-DAVOR	54	-0,001	0,001
SLAVONSKI BROD-SLAVONSKI KOBAS	79	0,011	0,026
ŽUPANJA-SLAVONSKI BROD	81	0,558	0,684
GUNJA-ŽUPANJA	11	0,130	0,167

Negativne vrijednosti javljaju se samo na dionicama Podsused - Zagreb i Zagreb - Rugvica, što se može povezati s prethodno navedenim zaključkom vezano uz nedovoljno pouzdano definirane krivulje protoka na postajama Podsused i Rugvica. Pri tome se ne smije zanemariti ni mogućnost da krivulje protoka za postaju Zagreb nisu apsolutno pouzdane.

5. HURSTOV EKSPONENT

Na hidrološke vremenske procese utječu brojni složeni fizički zakoni i mehanizmi koje je često teško razlučiti, pa čak i uočiti (Bonacci 2023). Oni različito utječu na određene geofizičke karakteristike te se različito manifestiraju u različitim okolišima. U tom smislu protoci, osobito oni srednji godišnji, posebno su važni. Zavisnost među srednjim godišnjim protocima može trajati duži period vremena. To znači da zakonitosti iz prošlosti u nekim slučajevima mogu dugotrajnije utjecati na razvoj procesa u budućnosti. Američki hidrolog Hurst (1951., 1956.) ukazao je na postojanje tzv. fenomena dugoročnog pamćenja u nizovima srednjih godišnjih protoka rijeke Nil. Zaključio je da u mnogim inženjerskim problemima podaci raspoloživih vremenskih nizova nisu pouzdani izvor za buduće ponašanje već predstavljaju samo različiti stupanj vjerojatnosti. Ustanovio je da neke pojave pokazuju karakteristično jaku zavisnost tako da je čak i njihova daleka prošlost značajno povezana s budućim razvojem procesa. Hurstov eksponent koji je on razvio predstavlja statističku mjeru dugotrajne memorije neke vremenske serije.

Fenomen Hursta, tj. perzistentnost u analiziranom vremenskom nizu javlja se kad je vrijednost njegovog eksponenta H veća od 0,5. Koristeći izraze navedene u prethodnom tekstu brojevima (3 - 6), za vremenske nizove srednjih godišnjih protoka Save kod Zagreba u razdoblju 1926. - 2022. i Save kod Županje za vremenske nizove srednjih godišnjih protoka u razdoblju 1929. - 2022. izračunati su Hurstovi eksponenti. Njihove

vrijednost iznosile su 0,68 za postaju Zagreb i 0,70 za postaju Županja. Navedene vrijednosti znatno su veće od 0,5 i praktično identične Hurstovom eksponentu koji iznosi 0,7, što ukazuje da godišnji nizovi protoka Save kod Zagreba i Županje nose u sebi dugotrajnu memoriju. Budući da su postaje duž toka Save udaljene 402 km, a po površini sliva razlikuju se za 50.441 km² nije nelogično pretpostaviti da na svim postajama duž toka Save u Hrvatskoj nizovi srednjih godišnjih protoka nose u sebi dugotrajnu memoriju.

Hurstov eksponent bilo je moguće izračunati samo za dvije vodomjerne postaje koje imaju kontinuirane i duge vremenske nizove opažanja. Postaja Zagreb nalazi se na gornjem potezu rijeke gdje Sava još ima značajan pad korita, dok se postaja Županja nalazi na ravničarskom dijelu rijeke gdje je pad korita vrlo blag. Gotovo identične vrijednosti Hurstovog eksponenta na obje postaje, bez obzira na veliku razliku u površinama sliva i vrijednostima srednjih godišnjih protoka ukazuju na to da ponašanjima hidroloških nizova na cijelom slivu rijeke u području Hrvatske upravljaju isti fenomeni.

6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Koliko nam je poznato, u ovom su radu prvi put zajednički analizirani svi raspoloživi nizovi srednjih godišnjih protoka na vodomjernim postajama duž toka rijeke Save u Hrvatskoj. Bez obzira na činjenicu da se raspolagalo s različito dugim, ali očito i različito kvalitetnim (pouzdanim) nizovima podataka, mogli su se donijeti određeni zaključci bitni za bolje poznavanje hidrološkog režima ove za Hrvatsku, ali i širu regiju ključne rijeke. Činjenica je da se o cjelovitoj vrlo kompleksnoj, ali i krajnje urgentnoj hidrološkoj problematici Save nedovoljno zna. Ovaj rad, koji je tretirao samo srednje godišnje protoke ukazao je na neophodnost značajnog intenziviranja hidroloških istraživanja na cijelom toku Save.

Definitivno je i čini se pouzdano utvrđeno da je duž toka Save u Hrvatskoj trend srednjih godišnjih protoka u opadanju. To je moguće objasniti barem dijelom globalnim klimatskim promjenama, ali bilo bi potrebno ipak ovaj opasan proces detaljnije objasniti i povezati s drugim potencijalnim čimbenicima, osobito onim vezanim uz ljudske djelatnosti.

Da bi se procesi koji se zbivaju duž toka Save bolje shvatili, potrebno je značajnije povećati broj mjerenja protoka tijekom godine za različita hidrološka stanja. Mišljenja smo da je osobito kritično stanje s nedostatkom mjerenja velikih voda. Suvremena tehnologija omogućava da se to stanje prevlada. Samo na taj način omogućit će se definiranja pouzdanih krivulja protoka koje su osnovni preduvjet za preciznije praćenje promjena hidroloških stanja tijekom vremena i za pouzdano određivanje srednjih dnevnih, mjesečnih i godišnjih protoka.

Analize izvršene u ovom radu ukazale su na neke neuralgične lokacije što se točnosti i pouzdanosti analiziranih hidroloških veličina tiče. Radi se prije svega o vodomjernim postajama Podsused, Rugvica i Jasenovac. Preciznije poznavanje hidrološkog stanja na postaji Jasenovac ključno je ne samo za sustav obrane od poplava već i za mogućnost boljeg upravljanja vodnim resursima na srednjem i donjem toku rijeke u Hrvatskoj. Za nas je ipak najbitnije pouzdano poznavati

hidrološke procese Save u širem uzvodnom i nizvodnom području oko Zagreba. Očito je da je neophodno pristupiti mnogo detaljnijim analizama ove složene i za grad Zagreb ekstremno važne problematike. Želja je autora da ovaj rad bude poticaj za nova i sustavnija istraživanja složenih, interaktivnih dinamičkih procesa koji se intenzivno zbivaju na prostoru ove naše ključne rijeke.

Na kraju se naglašava da je u ovom radu izvršena analiza isključivo srednjih godišnjih protoka duž toka Save u Hrvatskoj. U sljedećim će radovima biti izvršena analiza nizova minimalnih i maksimalnih godišnjih protoka duž toka Save u Hrvatskoj. Na osnovi analiza svih triju karakterističnih godišnjih protoka (minimalnih, srednjih i maksimalnih) pokušat će se donijeti dodatni zaključci o razlozima nepravilnosti u mjerenjima i određivanjima protoka duž toka rijeke Save u Hrvatskoj.

ZAHVALA

Ovo istraživanje je djelomično sufinancirano projektom KK.01.1.1.02.0027, koji su sufinancirale hrvatska Vlada i Europska unija kroz "European Regional Development Fund - the Competitiveness and Cohesion Operational Programme". ■

LITERATURA

Abdulaj, R.; Miković, N.; Oskoruš, D.; Vujnović, T. 2014. Velike vode donjeg toka rijeke Save tijekom svibnja 2014. *Hrvatska vodoprivreda*. XXII(207): 14-17.

Barbalić, D.; Kuspilić, N. 2014. Trends of indicators of hydrological alterations. *Građevinar*. 66 (7): 613-624. DOI: 10.14256/JCE.1003.2014.

Barbalić, D.; Petraš, J. 2012. Seasonal occurrence of maximum annual flows in the Danube river basin in Croatia. *Građevinar*. 64(1): 33-38. DOI:10.14256/JCE.628.2011.

Beraković, M. 2009. Radovi na rijeci Savi i njihov utjecaj na vodni režim šireg područja grada Zagreba. *Hrvatska vodoprivreda*. XVIII(90-191): 16-20.

Biondić, D. 2000. Erozijski proces u savskom koritu kod Zagreba, *Zbornik radova okruglog stola "Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima"* (ur. D. Trninić) Hrvatsko hidrološko društvo.

Bonacci, O. 2014. Hidrološka analiza mjerenja izvršenih na vodomjernoj postaji Slavonski Brod na rijeci Savi. *Hrvatske vode*. 22(89): 267-272.

Bonacci, O. 2023. Factors affecting variations in the hydrological cycle at different temporal and spatial scales. *Acta Hydrotechnica*. 36(64): 1-15. DOI:10.15292/acta.hydro.2023.01.

Bonacci, O.; Ljubenkov, I. 2004. Statistička analiza maksimalnih godišnjih protoka Save kod Zagreba 1926.

- 2000. *Hrvatske vode*. 12(48): 243-252.

Bonacci, O.; Ljubenkov, I. 2008. Changes in flow conveyance and implication for flood protection, Sava River, Zagreb. *Hydrological Processes*. 22(8): 1189-1196. DOI:10.1002/hyp.6688.

Bonacci, O.; Oskoruš, D. 2011. Hidrološka analiza sigurnosti Zagreba od poplava vodama rijeke Save u novim uvjetima. *Hrvatske vode*. 19(75): 13-24.

Bonacci, O.; Oskoruš, D. 2014. Analiza nekih hidroloških vidova evakuacije velikih voda na području grada Zagreba. *Hrvatske vode*. 22(87): 409-416.

Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. 2023. Hidrološka analiza nizova vodostaja i protoka Save na vodomjernoj postaji Zagreb. *Hrvatske vode*. 31(125): 173-184.

Čanjevac, I. 2012. Novije promjene protočnih režima u hrvatskom dijelu porječja Dunava, *Hrvatski geografski glasnik*. 74(1): 61-74. DOI:10.21861/HGG.2012.74.01.04.

Čanjevac, I.; Orešić, D. 2015. Contemporary changes of mean annual and seasonal river discharges in Croatia. *Hrvatski geografski glasnik*. 77(1): 7-27.

Čanjevac, I.; Orešić, D. 2018. Changes in discharge regimes of rivers in Croatia. *Acta Geographica Slovenica*. 58(2): 7-18.

Garbrecht, J.; Fernandez, G. P. 1994. Visualization of trends and fluctuations in climatic records. *Water Resources Bulletin*. 30(2): 297-306. DOI:10.1111/j.1752-1688.1994.tb03292.x.

- Gilja, G.; Ocvirk, E.; Kuspilić, N. 2018. Analiza zajedničke vjerojatnosti pojave velikih voda na učima primjenom bivarijatnih kopula. *Građevinar*. 70(4): 267-275. DOI:10.14256/JCE.2173.2017.
- Gilja, G.; Oskoruš, D.; Kuspilić, N. 2010. Erosion of the Sava riverbed in Croatia and its foreseeable consequences. *Proceedings of the 12th Conference on Water Observation and Information System for Decision Support*. Ohrid. (ur. M. Morell) 1-9. BALWOIS.
- Hurst, H. E. 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 116(1): 770-799. DOI:10.1061/TACEAT.0006518.
- Hurst H. E. 1956. The problem of long-term storage in reservoirs. *Hydrological Sciences Journal*. 1(3): 13-27. DOI:10.1080/02626665609493644.
- Hurst, H. E.; Black, R. P.; Simaika, Y. M. 1965. *Long-term storage: an experimental study*. Constable. London.
- Husain Shourov, M. M.; Mahmud, I. 2019. pyMannKendall: a python package for non-parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open-Source Software*. 4(9): 1556. DOI:10.21105/joss.01556.
- ISRBC (International Sava River Basin Commission) 2022. *2nd Sava River Basin management plan*. ISRBC. Zagreb. Croatia. (<https://www.savacommission.org/documents-and-publications/water-management-1957/2nd-sava-river-basin-management-plan/10461>) (posjet 4. veljače 2024.)
- Kalinić, F.; Bartolić, I.; Petrićec, M. 2019. Utjecaj praga kod Te-To Zagreb na vodostaje rijeke Save i podzemne vode zaobalja. *Zbornik radova 7. hrvatske konferencije o vodama*. (ur. D. Biondić, D. Holjević, M. Vizner) Hrvatske vode. 261-268.
- Kendall, M. G. 1975. *Rank Correlation Methods*. 4th edition. Charles Griffin. London.
- Kratofil, L. 2000. Promjene vodnog režima Save uzrokovane ljudskom djelatnošću. *Zbornik radova okruglog stola "Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima"*. (ur. D. Trninić) Hrvatsko hidrološko društvo. 335-352.
- Kratofil, L.; Havoić, M.; Juriša, Z. 2011. Poplave uz rijeku Savu. *Hrvatska vodoprovreda*. XIX(194): 37-43.
- Kuspilić, G.; Gilja, G. 2016. Potencijalan učinak morfoloških promjena rijeke Save na zagrebački vodonosnik. *Znanstveno-stručni skup: Strategija razvoja vodoopskrbe i odvodnje Grada Zagreba*. (ur. V. Andročec) Društvo građevinskih inženjera Zagreb. 13-22.
- Kuspilić, N.; Ocvirk, E.; Gilja, G.; Cikojević, A. 2020. *Analiza zaštite, uređenja i korištenja rijeke Save i zaobalja od granice s Republikom Slovenijom do Siska*. Građevinski Fakultet. Zagreb.
- Mann, H. B. 1945. Non-parametric test of randomness against trend. *Econometrica*. 13(3): 245-259.
- Marušić, J. 2022. Studija regulacije i uređenja rijek Save. *Hrvatske vode*. 30(121): 255-259.
- Mikoš, M. 2000. Prodna bilanca reke Save od Jesenica do Mokric. *Gradbeni Vestnik*. 49(9): 208-219.
- Orešić, D.; Čanjevaca, I.; Maradin, M. 2017.a Changes in discharge regimes in the middle course of the Sava River in the 1931-2010 period. *Prace Geograficne*. 151: 93-119. DOI:10.4467/20833113PG.17.024.8036.
- Orešić, D.; Čanjevaca, I.; Plantak, M. 2017.b Changes in flow and discharge regime of the Ilova River. *Acta Geographica Croatica*. 43/44(1): 1-20.
- Pavlić, I. 1965. *Statistička teorija i primjena*. Panorama. Zagreb.
- Pavlin, Ž.; Pletikapić, Z. 2005. Višenamjensko rješenje uređenja i iskorištavanja Save na području Zagreba. *Građevinar*. 57(2): 77-85.
- Potočki, K.; Bekić, D.; Bonacci, O.; Kulić, T. 2021. *Hydrological aspects of nature-based solutions in flood mitigation in the Danube River Basin in Croatia: Green vs. Grey approach*. In: Nature-based solutions for flood mitigation. Springer. 263-288. DOI:10.1007/698_2021_770.
- Slukan Altić, M. 2010. Povijest regulacije rijeke Save kod Zagreba i njezine posljedice na izgradnju grada. *Hrvatske vode*. 18(73): 205-212.
- Srebrenović, D.; Pilar, M. 2000. Hidrološki aspekt rijeke Save u razvojnim vodoprivrednim planovima. *Zbornik radova okruglog stola "Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima"*. (ur. D. Trninić) Hrvatsko hidrološko društvo.
- Šegota, T.; Filipčić, A. 2007. Suvremene promjene klime i smanjenje protoka Save u Zagrebu. *Geoadria*. 12(1): 47-58. DOI:10.15291/geoadria.115.
- Tootle, G.; Oubeidillah, A.; Elliott, E.; Formetta, G.; Bezak, N. 2023. Streamflow reconstructions using tree-ring-based paleo proxies for the Sava River Basin (Slovenia). *Hydrology*. 10: 138. DOI:10.3390/hydrology10070138.
- Trninić, D. 2014. 50 godina od katastrofalne poplave Save kod Zagreba. *Hrvatska vodoprovreda*. XXII(29): 56-63.
- Trninić, D.; Bošnjak, T. 2009. Karakteristični protoci Save kod Zagreba. *Hrvatske vode*. 17(69/70): 257-268.
- Trninić, D.; Bošnjak, T. 2023. Prilog analizi poplavnih velikih voda Save kod Zagreba u rujnu 2010. godine. *Hrvatske vode*. (124): 129-143.
- Uлага, F.; Kobold, M.; Frantar, P. 2008. Trends of river discharges in Slovenia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 4(1): 012030. DOI:10.1088/1755-1307/4/1/012030.
- Vujević, M.; Posavec, K. 2018. Identification of groundwater level decline in the Zagreb and Samobor-Zaprešić aquifers since the sixties of the twentieth century. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*. 33(4): 55-64. DOI: 10.17794/rgn.2018.4.5. <https://hidro.dhz.hr/hidroweb/pocetna/Poplave/PoplaveSave.html> (posjet 5. veljače 2024.) https://klima.hr/razno/priopcenja/poplava_sava_2014.pdf (posjet 5. veljače 2024.) <https://voda.hr/hr/novost/57-godina-od-velike-poplave-u-zagrebu> (posjet 5. veljače 2024.)

HYDROLOGICAL ANALYSIS OF MEAN ANNUAL DISCHARGES ALONG THE SAVA RIVER IN CROATIA

ABSTRACT: The paper analyses all available series of mean annual discharges calculated at 13 gauging stations along the Sava River in Croatia. Only official data from the Croatian Meteorological and Hydrological Service (DHMZ), Zagreb, were used. The series lengths differ, there are interruptions in monitoring within individual series, but all end with 2022. A decreasing trend in mean annual discharges has been clearly observed at all gauging stations. The values of linear regression coefficients, a , indicate an intensification of the decreasing process in downstream direction along the river course. The average value of decreasing in the upper course is 7 m³/10 years, in the middle course to 11 m³/10 year, while the stations in the lower course record 22 m³/10 year. The analysis of difference in discharges between the neighbouring gauging stations revealed certain irregularities that indicate probable errors in the determination of mean annual discharges at some stations. It seems that the least reliable determinations of discharges occur at the Podsused, Rugvica and Jasenovac stations, the probable reason being insufficient number of measurements to determine reliable discharge curves. The Hurst exponent was calculated for the series of the Sava River at Zagreb (1926-2022) and Županja (1929-2022). Since its value equals 0.68 for Zagreb and 0.70 for Županja, it can be assumed that mean annual discharges along the entire river course in Croatia contain long-term memory.

KEY WORDS: mean annual discharge, Sava River, Croatia, Hurst exponent

HYDROLOGISCHE ANALYSE DER MITTLEREN JÄHRLICHEN ABFLÜSSE ENTLANG DES FLUSSLAUFS DER SAVE IN KROATIEN

ZUSAMMENFASSUNG: In der Arbeit wurden alle verfügbaren Reihen mittlerer jährlicher Abflüsse analysiert, die an 13 Wassermessstationen entlang des Flusslaufs der Save in Kroatien berechnet wurden. Es wurden nur offizielle Daten des staatlichen hydrometeorologischen Institutes DHMZ aus Zagreb verwendet. Die Reihenlängen sind unterschiedlich, und innerhalb bestimmter Reihen gibt es Unterbrechungen bei den Beobachtungen, allerdings enden alle Reihen im Jahr 2022. An allen Wassermessstationen war ein Trend sinkender mittlerer jährlicher Abflüssen deutlich zu beobachten. Die Werte der linearen Regressionskoeffizienten zeigen an, dass sich der Prozess der Abflussabnahme flussabwärts entlang des Flusslaufs verstärkt. Im Oberlauf des Flusses beträgt der durchschnittliche Wert der Abflussabnahme 7 m³/10 Jahre. Im Mittelverlauf steigt der Durchschnittswert der Abflussabnahme auf 11 m³/10 Jahre, während er an den Stationen im Unterlauf durchschnittlich 22 m³/10 Jahre beträgt. Durch die Analyse der Unterschiede in Abflüssen zwischen benachbarten Wassermessstationen wurden gewisse Unregelmäßigkeiten festgestellt, die wahrscheinlich auf die Fehler bei der Bestimmung der mittleren jährlichen Abflüsse an einigen Stationen hinweisen. Es scheint, dass an den Stationen Podsused, Rugvica und Jasenovac die Abflüsse am wenigsten zuverlässig bestimmt wurden. Der Grund dafür ist wahrscheinlich eine unzureichende Anzahl von Wassermessungen, die eine Ermittlung zuverlässiger Fließkurven nicht gewährleisten kann. Für die Reihen der Save bei Zagreb (1926-2022) und Save bei Županja (1929-2022) wurde der Hurst-Exponent berechnet. Da der Wert des Hurst-Exponenten für Zagreb 0,68 und für Županja 0,70 beträgt, ist es anzunehmen, dass die mittleren jährlichen Abflüsse im gesamten Flusslauf der Save in Kroatien Langzeitgedächtnis zeigen.

SCHLÜSSELWÖRTER: mittlerer jährlicher Abfluss, Save, Kroatien, Hurst-Exponent