

HIDROLOŠKA ANALIZA MINIMALNIH I MAKSIMALNIH 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 Splitu
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 minimalnih i maksimalnih godišnjih protoka proračunati 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. Posljednja uključena u analizu je 2022. godina. Uočen je trend opadanja minimalnih godišnjih protoka na svim vodomjernim postajama. Vrijednosti koeficijenata linearne regresije, a , ukazuju na to da se proces opadanja individualno ponaša na svakoj od postaja. Kreće se u rasponu od prosječno $2,2 \text{ m}^3/10$ godina na postaji Rugvica, do prosječno $7,4 \text{ m}^3/10$ godina na postaji Davor. Analizom nizova razlika minimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja pronađene su određene nepravilnosti koje ukazuju na vjerojatne greške u određivanju minimalnih godišnjih protoka na nekim od postaja. One se najvjerojatnije mogu objasniti nestabilnošću (erozijom ili nasipavanjem) dna korita i nedovoljno brojnim mjerenjima u slučaju malih voda, što uzrokuje stalne promjene donjih dijelova krivulja protoka. Analizom nizova maksimalnih godišnjih protoka na većini je postaja uočen trend porasta, dok na nekim nema naznake nikakvog trenda. Najveći trend porasta od prosječno $61 \text{ m}^3/10$ godina uočen je na postaji Podsused. Trend opadanja jedino je izmjeren na postaji Županja od prosječno $14 \text{ m}^3/10$ godina. Nizovi razlika maksimalnih godišnjih protoka između susjednih postaja jako se razlikuju, što ukazuje na nedovoljno točna mjerenja (određivanja) maksimalnih protoka. To je vjerojatno posljedica nedovoljnog broja mjerenja protoka pri visokim vodostajima i stoga nedovoljno pouzdano definiranih krivulja protoka u području velikih voda.

Ključne riječi: minimalni godišnji protok, maksimalni godišnji protok, Mann-Kendall test, Sava, Hrvatska

1. UVOD

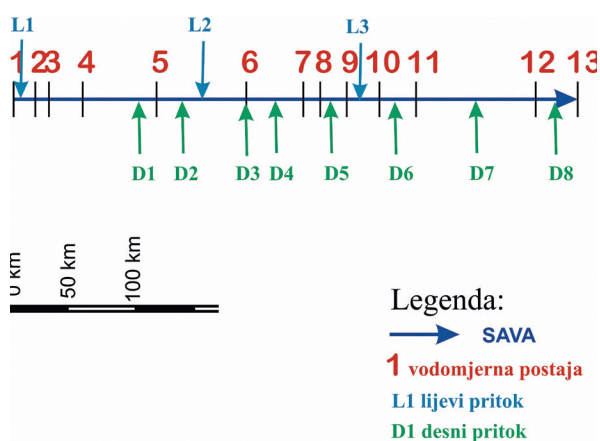
Analize izvršene u ovom članku predstavljaju nastavak istraživanja objavljenih u prethodnom broju časopisa

Hrvatske vode (Bonacci i sur. 2024). U njemu su bili analizirani nizovi srednjih godišnjih protoka na svim raspoloživim vodomjernim postajama, njih ukupno 13,

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

R. br.	Postaja	R. km	A (km ²)	H (mnm)	Raspoloživo razdoblje
1	Drenje Brdovečko	693,4	10.750	132,754	2000.-2022. Nedostaju: 2001-2002.
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: 194w3.-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.

koje motri Državni hidrometeorološki zavod Hrvatske (DHMZ) duž toka rijeke Save u Hrvatskoj. U ovom radu na tim istim postajama i u istim vremenskim razdobljima izvršena je analiza nizova minimalnih i maksimalnih



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

godišnjih protoka. U **tablici 1** navedene su sljedeće karakteristike raspoloživih i analiziranih 13 vodomjernih postaja: (1) riječni kilometar – R. km; (2) površina sliva – A; (3) kota nule vodomjera – H; (4) raspoloživo razdoblje definiranja protoka.

Shematski prikaz položaja 13 vodomjernih postaja na kojima DHMZ mjeri i određuje protoke, a čiji su podaci analizirani u ovom radu, prikazan je na [slici 1](#). Na njoj su ucrtani položaji triju lijevoobalnih (L1-L3) i osam desnoobalnih (D1-D8) pritoka. Ucrtani su samo oni pritoci čije su površine slivova veće od 450 km². U [tablici 2](#) navedeni su njihovi nazivi i površine slivova.

2. MINIMALNI GODIŠNJI PROTOCI

2.1. Analiza nizova minimalnih godišnjih protoka

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

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

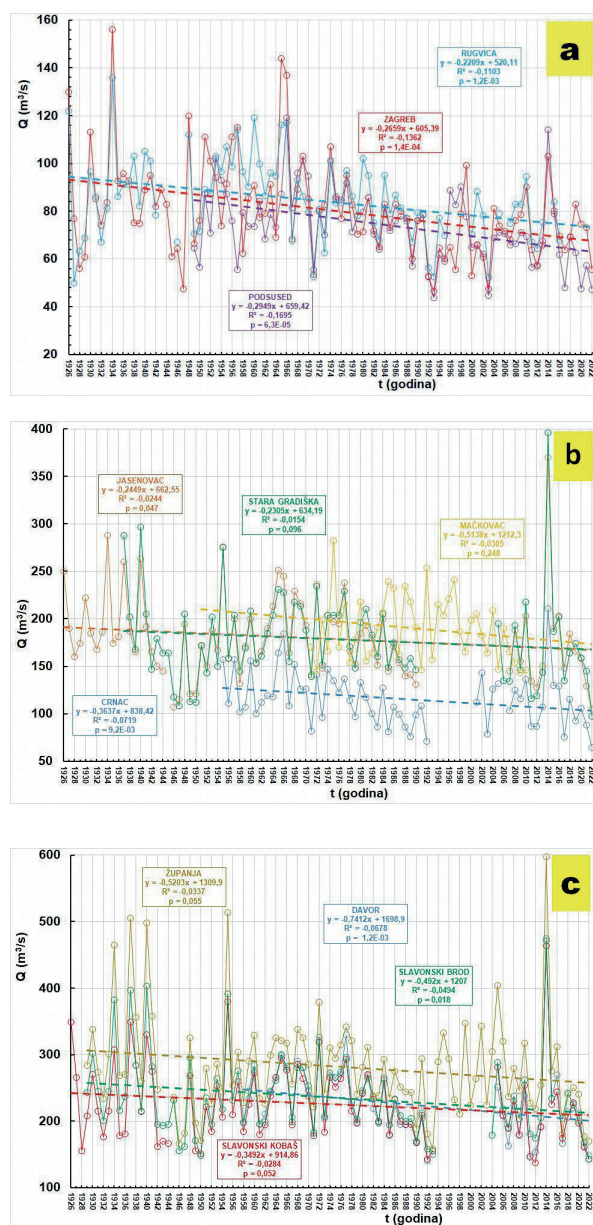
Obala	Oznaka na slici 1	pritok	A (km ²)
lijeva	L1	Krapina	1237
	L2	Lonja + Ilova	6055
	L3	Orljava	1618
desna	D1	Kupa	10.226
	D2	Sunja	470
	D3	Una	9829
	D4	Jablanica	477
	D5	Vrbas	6274
	D6	Ukrina	1504
	D7	Bosna	10.810
	D8	Tinja	904

Tablica 3: Karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) vrijednosti minimalnih godišnjih protoka na svih 13 raspoloživih vodomjernih postaja duž toka rijeke Save u Hrvatskoj u raspoloživom razdoblju od N godina

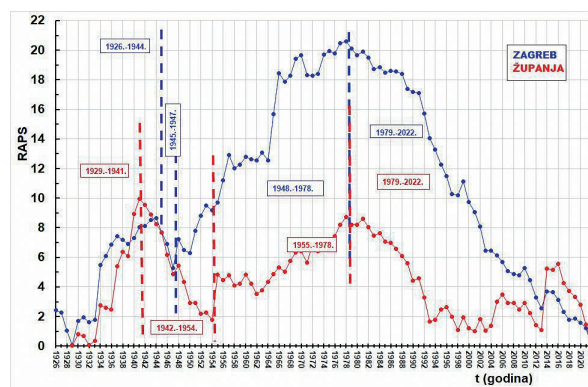
Postaja	Q (m ³ /s)			N (godina)	Raspoloživo razdoblje
	min	prosjeak	max		
Drenje Brdovečko	37,3	61,5	106	21	2000.-2022. Nedostaju: 2001.-2002.
Podsused	43,6	73,4	119	74	1949.-2022.
Zagreb	46,5	80,1	156	97	1926.-2022.
Rugvica	46,5	84,5	136	80	1926.-2016. Nedostaju: 1943.-1945., 1947., 1996.-1999., 2004., 2006., 2014.
Crnac	64,5	115	211	59	1955.-2022. Nedostaju: 1993.-1999., 2006.
Jasenovac	105	179	370	80	1926.-2022. Nedostaju: 1945., 1991.-2006.
Stara Gradiška	97,4	178	396	72	1937.-2022. Nedostaju: 1991.-2004.
Mačkovac	105	189	389	58	1951.-2022. Nedostaju: 1991.-2004.
Davor	141	224	475	54	1958.-2022. Nedostaju: 1994.-2004.
Slavonski Kobaš	137	225	464	83	1926.-2022. Nedostaju: 1945.-1946., 1994.-2004.
Slavonski Brod	143	236	471	83	1926.-2022. Nedostaju: 1994.-2003., 2016.
Županja	158	280	598	92	1929.-2022. Nedostaju: 1943.-1944.
Gunja	173	274	596	11	2012.-2022.

Na [slici 2a](#) ucrtni su nizovi minimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernim postajama Podsused, Zagreb i Rugvica. Duljine nizova nisu identične, a u slučaju Rugvice postoje i određeni prekidi u radu (vidi [tablicu 1](#)). U slučaju svih triju nizova moguće je uočiti statistički značajan trend opadanja s obzirom na to da

su vrijednosti vjerojatnosti Mann-Kendall (M-K) testa, $p < 0,05$. Na [slici 2b](#) ucrtni su nizovi minimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernim postajama Crnac, Jasenovac, Stara Gradiška i Mačkovac. I kod ovih postaja duljine se nizova razlikuju te postoje prekidi u radu (vidi [tablicu 1](#)). Na svim četirima postajama uočava se trend



Slika 2: Nizovi minimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernim postajama Zagreb, Podšused, 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 pravca regresije, vrijednosti koeficijenta determinacije, R^2 , te vjerojatnost M-K testa, p.



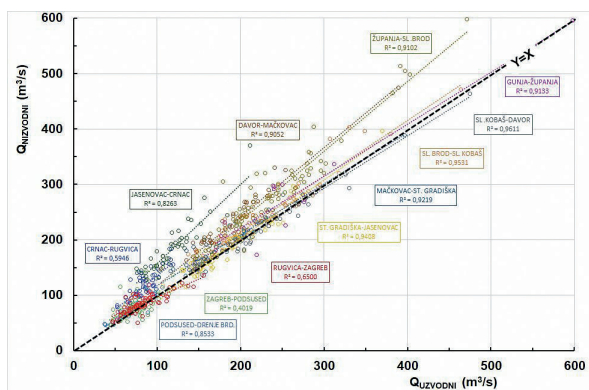
Slika 3: Dva RAPS vremenska niza za minimalne godišnje protoke Save kod Zagreba (1926. – 2022.) i Save kod Županje (1929. – 2022.)

opadanja s tim da je on statistički značajan samo na postajama Jasenovac i Crnac. Na slici 2c ucrtni su nizovi minimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernim postajama Davor, Slavonski Kobaš, Slavonski Brod i Županja. I kod ovih četiriju postaja razlikuju se duljine nizova te postoje prekidi u radu (vidi tablicu 1). Na svim četirima postajama postoji trend snižavanja minimalnih godišnjih protoka. Na samo dvjema od njih je (Davor i Slavonski Brod) trend opadanja statistički značajan s obzirom na to da su vrijednosti vjerojatnosti M-K testa, $p < 0,05$.

U gornjem dijelu toka na prvim trima uzvodnim postajama (Podšused, Zagreb i Rugvica) vrijednosti koeficijenta, a, kreću se između -2,9 i -2,2 $m^3/10$ godina. U srednjem dijelu toka na četirima postajama (Crnac, Jasenovac, Stara Gradiška i Mačkovac) kreću se između -5,1 i -2,3 $m^3/10$ godina. Vrijednosti opadanja koeficijenta linearne regresije, a, javljaju se i na četirima postajama (Davor, Slavonski Kobaš, Slavonski Brod i Županja) u donjem toku rijeke Save u Hrvatskoj. Kreću se u rasponu vrijednosti između -7,4 i -3,5 $m^3/10$ godina. Kad se usporede vrijednosti koeficijenta linearne regresije, a, za 11 nizova podataka prikazanih na slikama 2a, 2b i 2c moguće je uočiti blagi porast apsolutnih vrijednosti kako se ide nizvodno duž toka rijeke Save u Hrvatskoj. Trend opadanja minimalnih godišnjih protoka ukazuje na potencijalno realnu opasnost

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

Postaja	podrazdoblje	Q (m^3/s)	p	
			F-test	t-test
Zagreb	1926.-1944.	89,7	0,2712 0,3322 6,5E-04	0,0299
	1945.-1947.	57,6		0,0111
	1948.-1978.	90,5		2,5E-05
	1979.-2022.	71,0		
Županja	1929.-1941.	339	0,0224 0,3103 0,3941	1,8E-03
	1942.-1954.	233		1,0E-03
	1955.-1978.	303		
	1979.-2022.	206		0,0372



Slika 4: Odnos između minimalnih godišnjih protoka susjednih nizvodnih (os y) i uzvodnih (os x) vodomjernih postaja

nastavka procesa snižavanja minimalnih godišnjih protoka u budućnosti.

Različite duljine nizova i prekidi u motrenjima utječu na mogućnost usporedbe ponašanja nizova minimalnih godišnjih protoka i na donošenje pouzdanih zaključaka vezano uz razvoj procesa kako duž toka rijeke tako i tijekom vremena. Trendovi, tj. pravci regresije za postaje Drenje Brdovečko i Gunja nisu izračunati jer su im nizovi mjerenja kraći od 30 godina.

Na slici 3 prikazana su dva niza RAPS-ova za minimalne godišnje protoke Save kod Zagreba (1926. – 2022.) i Županje (1929. – 2022.). U oba niza utvrđeno je postojanje četiriju podnizova. U tablici 4 navedene su prosječne vrijednosti podnizova minimalnih godišnjih protoka u podrazdobljima određenim RAPS metodom (vidi sliku 3) na vodomjernim postajama Zagreb i Županja. Upisane su vjerojatnosti, p , F -testa i t -testa između susjednih podrazdoblja. Testiranje F -testom ukazuje da se varijance podnizova statistički značajno razlikuju samo u zadnjim dvama podnizovima na postaji Zagreb i prvim dvama podnizovima na postaji Županja. Prosječne vrijednosti susjednih podnizova statistički se značajno razlikuju između svih podnizova

na nivou vjerojatnosti, $p < 0,05$. Zanimljivo je uočiti slično ponašanje hidrološkog režima malih voda Save na dvjema postajama udaljenim 402 km. Pri tome treba imati u vidu da su prosječne vrijednosti minimalnih godišnjih protoka u Županji oko 3,5 puta veće od onih u Zagrebu.

2.2. Analiza odnosa minimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja

U okviru ovog poglavlja analizirat će se odnos između nizova minimalnih godišnjih protoka susjednih vodomjernih postaja kad na obje susjedne vodomjerne postaje opažanja. Na slici 4 grafički je prikazan odnos između minimalnih godišnjih protoka susjednih nizvodnih (os y) i uzvodnih (os x) vodomjernih postaja. Uočava se različito ponašanje na postajama duž toka Save. U slučajevima kad između postaja nema značajnijih pritoka, minimalni godišnji protoci na uzvodnim i nizvodnim postajama gotovo su identični. Najveće razlike javljaju se na potezima Crnac – Rugvica, Jasenovac – Crnac, Davor – Mačkovac i Županja – Slavonski Brod, s obzirom na to da se na tim dionicama u Savu ulijevaju značajniji pritoci – Kupa, Una, Vrbas i Bosna.

U tablici 5 unesene su vrijednosti koeficijenata linearne regresije, a , i koeficijenata determinacije, R^2 , za istovremene nizove minimalnih godišnjih protoka između susjednih postaja. Vrijednosti koeficijenata determinacije kreću se od minimalnih 0,402 za odnos između vodomjernih postaja Zagreb i Podsused do maksimalnih 0,961 za odnos između vodomjernih postaja Slavonski Kobaš i Davor. 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. Treba uočiti da pravci regresije imaju u šest slučajeva vrijednost koeficijenta linearne regresije, $a > 1$,

Tablica 5: Broj godina kad istovremeno postoje mjerenje na obje susjedne postaje, N , koeficijenti linearne regresije, a , koeficijenti determinacije, R^2 , za istovremene nizove minimalnih godišnjih protoka između susjednih postaja

SUSJEDNE POSTAJE	N (godina)	a	R^2
PODSUSED-DRENJE BRDOVEČKO	21	0,847	0,853
ZAGREB-PODSUSED	74	0,756	0,402
RUGVICA-ZAGREB	80	0,661	0,650
CRNAC-RUGVICA	51	1,230	0,595
JASENOVAC-CRNAC	52	1,428	0,826
STARA GRADIŠKA-JASENOVAC	69	1,051	0,941
MAČKOVAC-STARA GRADIŠKA	58	0,922	0,922
DAVOR-MAČKOVAC	51	1,245	0,905
SLAVONSKI Kobaš-DAVOR	54	0,944	0,961
SLAVONSKI BROD-SLAVONSKI Kobaš	79	1,004	0,929
ŽUPANJA-SLAVONSKI BROD	81	1,255	0,910
GUNJA-ŽUPANJA	11	0,944	0,919

Tablica 6: Karakteristične (minimalne, $Q_{\min}$, prosječne, Q_{pr} , i maksimalne, $Q_{\max}$) minimalne godišnje protoke susjednih vodomjernih postaja tijekom istovremenog rada. Broj godina kada su istovremeno određeni protoci na susjednim postajama, N. Vjerojatnosti, p, statističke značajnosti razlika između prosječnih vrijednosti srednjih godišnji nizova susjednih vodomjernih postaja određene t-testom. Crveno podebljano označeni su slučajevi kad se prosječne vrijednosti nizova minimalnih godišnjih protoka međusobno statistički značajno razlikuju na razini od, $p < 0,05$. Ljubičasto italic 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	21	37,3	62,6	0,647	106
Podsused		44,7	64,8		114
Podsused	74	43,6	73,8	0,097	119
Zagreb		46,5	78,5		144
Zagreb	80	46,5	81,9	0,315	156
Rugvica		50	84,9		136
Rugvica	51	52,2	84,7	1,1E-11	119
Crnac		71,1	117		184
Crnac	52	64,5	116	7,0E-14	211
Jasenovac		105	180		370
Jasenovac	69	105	177	0,821	370
Stara Gradiška		97,4	179		396
Stara Gradiška	58	97,4	179	0,448	396
Mačkovac		105	190		389
Mačkovac	51	105	190	1,6E-04	389
Davor		145	229		475
Davor	54	141	225	0,807	475
Slavonski Kobaš		137	223		464
Slavonski Kobaš	79	137	225	0,158	464
Slavonski Brod		143	240		471
Slavonski Brod	81	143	238	1,1E-04	471
Županja		158	282		598
Županja	11	170	265	0,730	598
Gunja		173	283		596

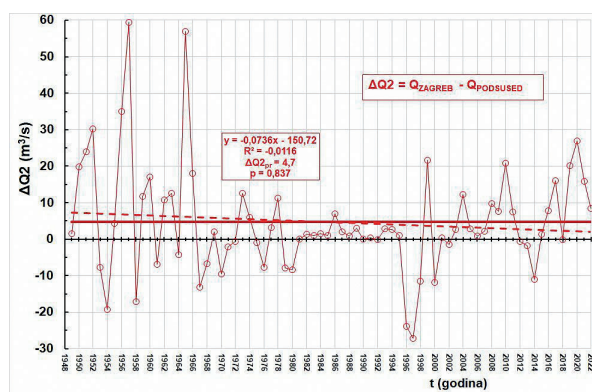
a u ostalih šest slučajeva je $a < 1$.

U tablici 6 unesene su vrijednosti karakterističnih (minimalnih, $Q_{\min}$, prosječnih, Q_{pr} , i maksimalnih, $Q_{\max}$) minimalnih godišnjih protoka susjednih vodomjernih postaja tijekom godina istovremenog rada, N. Vjerojatnosti, p, statističke značajnosti razlika između prosječnih vrijednosti srednjih godišnjih nizova susjednih vodomjernih postaja određene su t-testom. Crveno podebljano označeni su slučajevi kad se prosječne vrijednosti nizova minimalnih 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 italic brojevima označeni su slučajevi kad je prosječni minimalni godišnji protok na uzvodnoj postaji veći od onog na nizvodnoj ili mu je jednak. Ta se situacija pojavila na sljedećim četirima dionicama rijeke: (1) Zagreb – Rugvica; (2)

Stara Gradiška – Mačkovac; (3) Davor – Slavonski Kobaš; (4) Županja – Gunja. Radi se o ponašanju koje bi trebalo detaljnije objasniti. Minimalne godišnje protoke nizvodnih postaja trebale bi generalno biti veće od onih na uzvodnim postajama kao posljedica dotoka vode s većeg sliva. Obratno ponašanje trebalo bi se objasniti mogućim gubicima vode na određenoj dionici. Ova činjenica traži dodatne i suptilnije analize te ukazuje na to da je određivanje minimalnih protoka duž toka rijeke Save nepouzdan. Objašnjenje je moguće tražiti u činjenici čestih morfoloških promjena korita na mjestima vodomjernih postaja. Ove promjene nisu praćene dovoljno brojnim mjerenjima protoka, što onemogućava adekvatno praćenje promjena dijelova krivulja protoka u području malih voda.

2.3. Analiza nizova razlika minimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja

Prethodno izvršene analize upućuju na neophodnost



Slika 5: Niz razlika minimalnih godišnjih protoka Zagreba i Podsuseda, ΔQ_2

detalnijeg izučavanja ponašanja nizova minimalnih godišnjih protoka duž toka rijeke Save. Izučavanje razlika minimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja čini se kao razumni postupak koji bi mogao pomoći objašnjavanju procesa koji se zbivaju na rijeci Savi te ukazati na moguće greške pri mjerenjima ili određivanjima donjih dijelova krivulja protoka.

U tablici 7 upisane su karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) razlike, ΔQ , minimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. Unesene su vrijednosti koeficijenta determinacije, R^2 , nizova razlika minimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. U trećem stupcu tablice 7 naveden je broj godina, N , kada su istovremeno određeni protoci na susjednim

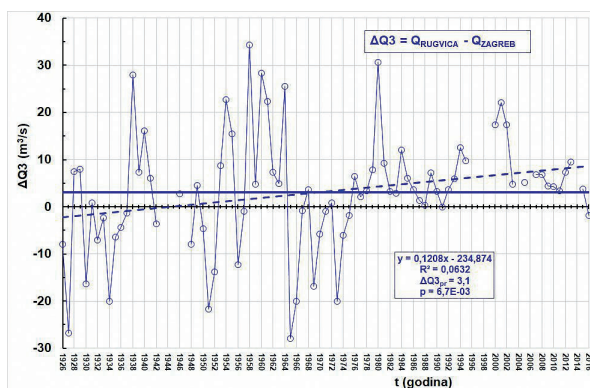
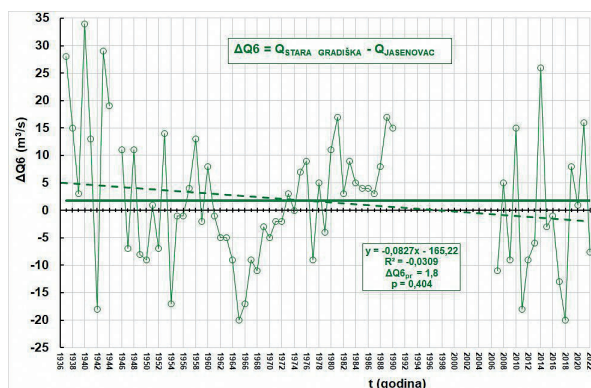
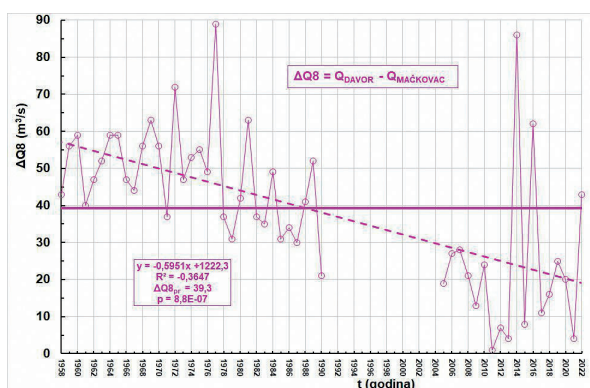
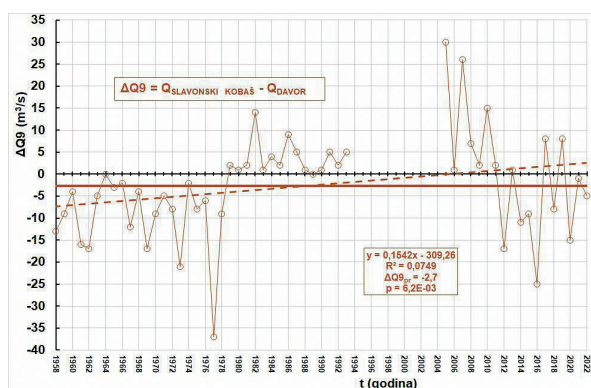
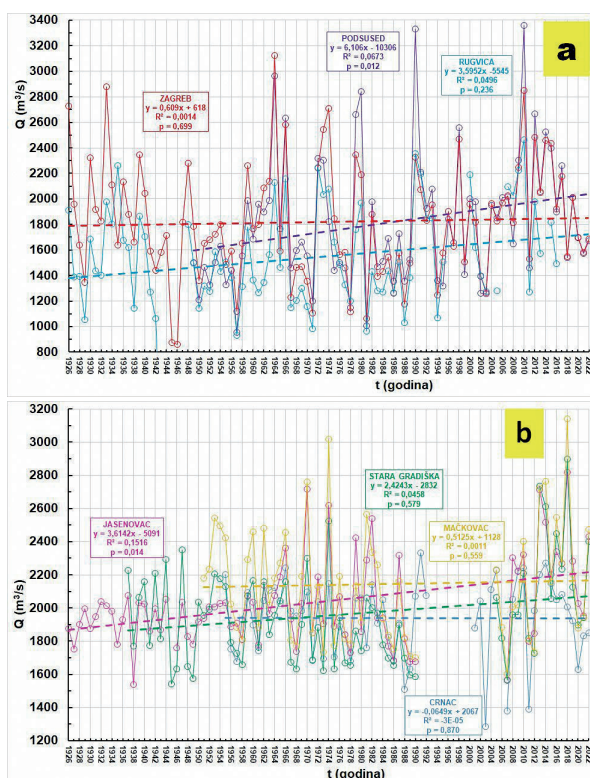
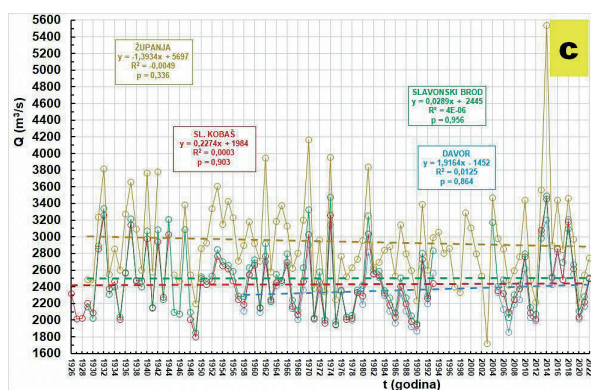
postajama, dok je u četvrtom stupcu upisan broj godina, N_1 , kad je protok na uzvodnoj postaji veći od onog na nizvodnoj ili mu je jednak. Na čak devet od dvanaest razmatranih dionica rijeke Save javljaju se godine kada je na nizvodnoj postaji protok manji od onog na uzvodnoj postaji ili mu je jednak. Vrlo vjerojatno se radi o nepouzdanom određenim i često promjenjivim donjim dijelovima krivulja protoka kao posljedica nestabilnih korita. Na nekim dionicama ne treba isključiti mogućnost pojave gubitaka (poniranja, evaporacije, crpljena itd.) vode tijekom sušnih i malovodnih razdoblja. U šestom stupcu tablice 7 upisane su vjerojatnosti, p , statističke značajnosti trenda nizova razlika, ΔQ , određene M-K testom. Crveno podebljanim brojevima označeni su slučajevi kad su trendovi porasta ili opadanja statistički značajni. Statistički značajni trendovi (porasta ili opadanja) javljaju se u šest analiziranih nizova s tim da na četirima dionicama ukazuju na porast, a na dvjema na opadanje.

U sljedećih pet slika dani grafički prikazi jasno će ukazati na obrasce ponašanja nizova razlika, ΔQ , tijekom vremena zajedničkog rada susjednih vodomjernih postaja.

Niz razlika između minimalnih godišnjih protoka izmjerenih na postajama Podsused i Zagreb, $\Delta_2 = Q_{ZAGREB} - Q_{PODSUSED}$, ucrtan je na slici 5. Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$, a vrijednosti se kreću u rasponu od minimalne vrijednosti $-27,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (1997.) do maksimalnih $59,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (1957.). Pravac regresije ukazuje

Tablica 7: Karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) razlike, ΔQ , minimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. Koeficijent determinacije, R^2 , nizova razlika minimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. Vjerojatnost, p , statističke značajnosti trenda određena M-K testom. Broj godina kada su istovremeno određeni protoci na susjednim postajama, N . U četvrtom stupcu upisan je broj godina, N_1 , kad je protok na uzvodnoj postaji veći ili jednak od onog na nizvodnoj.

dionica	SUSJEDNE POSTAJE	N (godina)	N1 ($\Delta Q \leq 0$) (godina)	R^2	p	$\Delta Q \text{ (m}^3/\text{s)}$		
						min	prosjeak	max
ΔQ_1	PODSUSED-DRENJE BRDOVEČKO	21	5	0,0723	0,716	-20,2	2,2	10,6
ΔQ_2	ZAGREB-PODSUSED	74	25	-0,0116	0,837	-27,1	4,7	59,4
ΔQ_3	RUGVICA-ZAGREB	80	27	0,0632	6,7E-03	-28	3,1	34,3
ΔQ_4	CRNAC-RUGVICA	51	0	0,0002	0,564	0,2	31,9	67
ΔQ_5	JASENOVAC-CRNAC	52	0	-0,0636	0,223	30	64,0	159
ΔQ_6	STARA GRADIŠKA-JASENOVAC	69	37	-0,0309	0,404	-20	1,8	34
ΔQ_7	MAČKOVAC-STARA GRADIŠKA	58	10	0,199	0,025	-15	10,8	46
ΔQ_8	DAVOR-MAČKOVAC	51	0	-0,365	8,8E-07	1	39,3	89
ΔQ_9	SLAVONSKI KOBAŠ-DAVOR	54	30	0,075	6,2E-03	-37	-2,7	30
ΔQ_{10}	SLAVONSKI BROD-SLAVONSKI KOBAS	79	11	-0,147	1,7E-04	-6	14,6	75
ΔQ_{11}	ŽUPANJA-SLAVONSKI BROD	81	30	-0,0008	0,961	-23	44,3	127
ΔQ_{12}	GUNJA-ŽUPANJA	11	4	0,5238	0,029	-46	17,5	57

Slika 6: Niz razlika minimalnih godišnjih protoka Rugvice i Zagreba, ΔQ_3 Slika 7: Niz razlika minimalnih godišnjih protoka Stare Gradiške i Jasenovca, ΔQ_6 Slika 8: Niz razlika minimalnih godišnjih protoka Davora i Mačkovca, ΔQ_8 Slika 9: Niz razlika minimalnih godišnjih protoka Slavonskog Kobaša i Davora, ΔQ_9 Slika 10: Nizovi maksimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernim postajama Zagreb, Podused, Rugvica (slika 10a), Crnac, Jasenovac, Stara Gradiška, Mačkovac (slika 10b) i Davor, SlavonSKI Kobaš, SlavonSKI Brod, Županja (slika 10c) u raspoloživim razdobljima. Upisane su jednadžbe pravaca regresije, vrijednosti koeficijenta determinacije, R^2 , te vjerojatnost M-K testa, p.

na statistički neznačajan trend opadanja.

Na slici 6 prikazan je niz razlika minimalnih godišnjih protoka, $\Delta Q_3 = Q_{RUGVICA} - Q_{ZAGREB}$. Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi 3,1 m³/s, a vrijednosti se kreću u rasponu od -28 m³/s (1965.) do 34,3 m³/s (1956.). Pravac regresije ukazuje na statistički značajan trend porasta.

Na slici 7 prikazan je niz razlika minimalnih godišnjih protoka, $\Delta Q_6 = Q_{STARA\ GRADIŠKA} - Q_{JASENOVAC}$. Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi 1,8 m³/s, a vrijednosti se kreću u rasponu od -20 m³/s (1965. i 2018.) do 34 m³/s (1940.). Pravac regresije ukazuje na statistički neznačajan trend opadanja.

Na slici 8 prikazan je niz razlika minimalnih godišnjih

Tablica 8: Karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka na svih 13 raspoloživih vodomjernih postaja duž toka rijeke Save u Hrvatskoj u raspoloživim razdobljima od N godina

Postaja	Q (m ³ /s)			N (godina)	Raspoloživo razdoblje
	min	prosjeak	max		
Drenje Brdovečko	1254	1950	3792	21	2000.-2022. Nedostaju: 2001.-2002.
Podsused	953	1817	3360	74	1949.-2022.
Zagreb	859	1821	3360	97	1926.-2022.
Rugvica	751	1554	2462	80	1926.-2016. Nedostaju: 1943.-1945., 1947., 1996.-1999., 2004., 2006., 2014.
Crnac	1285	1938	2331	59	1955.-2022. Nedostaju: 1993.-1999., 2006.
Jasenovac	1537	2027	2819	80	1926.-2022. Nedostaju: 1945., 1991.-2006.
Stara Gradiška	1543	1959	2898	72	1937.-2022. Nedostaju: 1991.-2004.
Mačkovac	1604	2144	3142	58	1951.-2022. Nedostaju: 1991.-2004.
Davor	1858	2358	3208	54	1958.-2022. Nedostaju: 1994.-2004.
Slavonski Kobaš	1795	2432	3451	83	1926.-2022. Nedostaju: 1945.-1946., 1994.-2004.
Slavonski Brod	1849	2502	3493	83	1926.-2022. Nedostaju: 1994.-2003., 2016.
Županja	1720	2943	5539	92	1929.-2022. Nedostaju: 1943.-1944.
Gunja	2220	3127	4621	11	2012.-2022.

protoka, $\Delta 8 = Q_{DAVOR} - Q_{MAČKOVAC}$. Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi 39,3 m³/s, a vrijednosti se kreću u rasponu od 1 m³/s (2011.) do maksimalnih 39,3 m³/s (1977.). Pravac regresije ukazuje na statistički značajan trend opadanja.

Na slici 9 prikazan je niz razlika minimalnih godišnjih protoka, $\Delta 9 = Q_{SLAVONSKI KOBAS} - Q_{DAVOR}$. Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi -2,7 m³/s, a vrijednosti se kreću u rasponu od -37 m³/s (1977.) do 30 m³/s (2005.). Pravac regresije ukazuje na statistički značajan trend porasta.

3. MAKSIMALNI GODIŠNJI PROTOCI

3.1. Analiza nizova maksimalnih godišnjih protoka

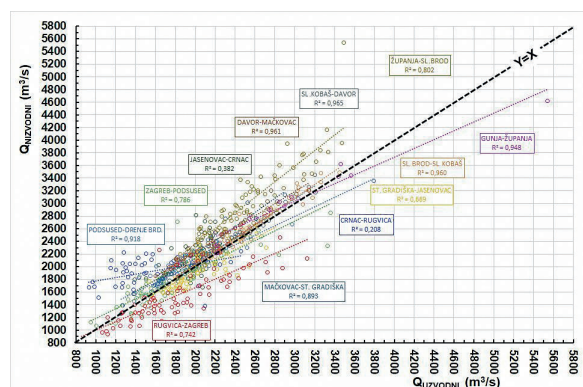
U tablici 8 navedene su karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka na svih 13 raspoloživih vodomjernih postaja u raspoloživim razdobljima od N godina koje je različito za svaku od postaja.

Na slici 10a ucrtani su nizovi maksimalnih godišnjih protoka Save na vodomjernim postajama Podsused, Zagreb i Rugvica. Duljine nizova nisu identične, a u slučaju Rugvice postoje i prekidi u radu (vidi tablicu 1). Jedino je na postaji Podsused moguće uočiti statistički značajan trend porasta s obzirom na to da su vrijednosti

vjerojatnosti M-K testa, p 0,05.

3.2. Analiza odnosa maksimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja

U okviru ovog poglavlja analizirat će se odnos između nizova maksimalnih godišnjih protoka susjednih vodomjernih postaja kad na obje susjedne vodomjerne postaje opažanja. Na slici 11 grafički je prikazan odnos između maksimalnih godišnjih protoka susjednih nizvodnih (os y) i uzvodnih (os x) vodomjernih postaja.



Slika 11: Odnos između maksimalnih godišnjih protoka susjednih nizvodnih (os y) i uzvodnih (os x) vodomjernih postaja

Tablica 9: Broj godina kad istovremeno postoje mjerenje na obje susjedne postaje, N, koeficijenti linearne regresije, a, koeficijenti determinacije, R², za istovremene nizove maksimalnih godišnjih protoka između susjednih postaja

SUSJEDNE POSTAJE	N (godina)	a	R ²
PODSUSED-DRENJE BRDOVEČKO	21	0,749	0,918
ZAGREB-PODSUSED	74	1,017	0,786
RUGVICA-ZAGREB	80	0,720	0,742
CRNAC-RUGVICA	51	0,274	0,208
JASENOVAC-CRNAC	52	0,853	0,382
STARA GRADIŠKA-JASENOVAC	69	0,865	0,669
MAČKOVAC-STARA GRADIŠKA	58	1,115	0,893
DAVOR-MAČKOVAC	51	0,960	0,961
SLAVONSKI KOBAS-DAVOR	54	1,022	0,965
SLAVONSKI BROD-SLAVONSKI KOBAS	79	1,056	0,960
ŽUPANJA-SLAVONSKI BROD	81	0,650	0,802
GUNJA-ŽUPANJA	11	0,696	0,948

Tablica 10: Karakteristične (minimalne, Q_{min}, prosječne, Q_{pr}, i maksimalne, Q_{max}) maksimalne 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 maksimalnih godišnji nizova susjednih vodomjernih postaja određeni t-testom. Crveno podebljano označeni su slučajevi kad se prosječne vrijednosti nizova maksimalnih godišnjih protoka međusobno statistički značajno razlikuju na razini od, p<0,05. Ljubičasto italic 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	21	1254	1972	0,732	3792
Podsused		1258	2024		3360
Podsused	74	953	1817	0,939	3360
Zagreb		1065	1811		3126
Zagreb	80	859	1825	9,0E-05	3126
Rugvica		751	1554		2462
Rugvica	51	931	1573	2,5E-07	2462
Crnac		1285	1934		2331
Crnac	52	1379	1931	4,0E-03	2270
Jasenovac		1567	2083		2819
Jasenovac	69	1537	2044	0,107	2819
Stara Gradiška		1563	1965		2898
Stara Gradiška	58	1563	1964	0,101	2898
Mačkovac		2898	2145		3142
Mačkovac	51	1904	2129	2,1E-03	3142
Davor		1858	2352		3208
Davor	54	1858	2358	0,420	3208
Slavonski Kobaš		1845	2414		3451
Slavonski Kobaš	79	1795	2439	0,411	3451
Slavonski Brod		1849	2497		3493
Slavonski Brod	81	1849	2497	2,9E-09	3493
Županja		2195	2969		5539
Županja	11	2214	3130	0,993	5539
Gunja		2220	3127		4621

Tablica 11: Karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) razlike, ΔQ , maksimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. Koeficijent determinacije, R^2 , nizova razlika maksimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. Vjerojatnost, p , statističke značajnosti trend određena M-K testom. 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	p	ΔQ (m ³ /s)		
						min	prosjeck	max
$\Delta Q1$	PODSUSED-DRENJE BRDOVEČKO	21	3	-0,0088	0,450	-432	58	402
$\Delta Q2$	ZAGREB-PODSUSED	74	39	-0,0669	0,043	-1004	-6,0	888
$\Delta Q3$	RUGVICA-ZAGREB	80	67	0,0976	1,9E-04	-995	-271	622
$\Delta Q4$	CRNAC-RUGVICA	51	6	-0,1053	0,025	-718	361	948
$\Delta Q5$	JASENOVAC-CRNAC	52	14	0,141	7,0E-03	-395	177	1488
$\Delta Q6$	STARA GRADIŠKA- JASENOVAC	69	49	-0,0573	0,030	-559	79	316
$\Delta Q7$	MAČKOVAC-STARA GRADIŠKA	58	3	-0,3613	2,9E-07	-17	180	501
$\Delta Q8$	DAVOR-MAČKOVAC	51	0	-0,0008	0,807	18	223	437
$\Delta Q9$	SLAVONSKI KO- BAŠ-DAVOR	54	10	0,0343	0,339	-122	55	250
$\Delta Q10$	SLAVONSKI BROD-SLAVONSKI KOBAS	79	15	0,0125	0,234	-94	58	393
$\Delta Q11$	ŽUPANJA-SLAVONSKI BROD	81	0	-0,0106	0,028	39	472	2046
$\Delta Q12$	GUNJA-ŽUPANJA	11	3	0,1905	0,119	-918	-3,2	216

U ovom slučaju odnosi maksimalnih godišnjih protoka susjednih postaja vrlo se različito manifestiraju. To je posljedica geomorfoloških karakteristika terena između njih. Na nekim potezima postoje plavljenja površine koja mogu uskladištiti značajne količine valova velikih voda, dok na drugim potezima ona ili prirodno ne postoje ili su uklonjena antropogenim zahvatima.

U **tablici 9** unesene su vrijednosti koeficijenta linearne regresije, a , i koeficijenta determinacije, R^2 , za istovremene nizove maksimalnih godišnjih protoka između susjednih postaja. Vrijednosti koeficijenta determinacije kreću se od minimalnih 0,208 za odnos između vodomjernih postaja Crnac i Rugvica do maksimalnih 0,965 za odnos između vodomjernih postaja Slavonski Kobaš i Davor. Pri procjeni pouzdanosti ovih pokazatelja treba biti svjestan činjenice da se broj godina, N , kad istovremeno postoje mjerenja na objema susjednim vodomjernim postajama, kreće u rasponu od 11 do 80. Treba uočiti da pravci regresije imaju u četirima slučajevima vrijednost koeficijenta linearne regresije, $a > 1$, a u ostalih osam slučajeva je $a < 1$.

U **tablici 10** unesene su vrijednosti karakterističnih (minimalnih, Q_{min} , prosječnih, Q_{pr} , i maksimalnih, Q_{max}) maksimalnih godišnjih protoka susjednih vodomjernih postaja tijekom godina istovremenog rada, N . Vjerojatnost, p , statističke značajnosti razlika između prosječnih vrijednosti maksimalnih godišnji nizova susjednih vodomjernih postaja određene su t-testom. Crveno podebljano označeni su slučajevi kad se prosječne vrijednosti nizova maksimalnih godišnjih

protoka međusobno statistički značajno razlikuju na razini od $p < 0,05$. Statistički značajni porasti prosječnih maksimalnih protoka na nizvodnoj postaji javljaju se na dionicama rijeke Save na kojima postoje ušća većih pritoka kao što su Kupa (dionica Rugvica – Crnac), Una (dionica Crnac – Jasenovac), Vrbas (dionica Mačkovac – Davor) i Bosna (dionica Slavonski Brod – Županja). Statistički značajna razlika prosječnih maksimalnih vrijednosti pojavila se i na dionici Zagreb – Rugvica. Na ovoj je dionici došlo do smanjivanja svih karakterističnih maksimalnih protoka na nizvodnoj postaji Rugvica u odnosu na postaju Zagreb, što je posljedica retencioniranja vode u plavljenom području i rada ustave Prevlaka. Razlog statistički neznačajnog opadanja prosječnih maksimalnih protoka koji se javlja na dionici Podsused – Zagreb treba tražiti u funkcioniranju preljeva Jankomir. Ljubičasto podebljanim *italic* brojevima označeni su slučajevi kad je bilo koji karakteristični (minimalni, prosječni, maksimalni) godišnji protok na uzvodnoj postaji veći od onog na nizvodnoj ili mu je jednak. Ta se situacija pojavila na sljedećih šest dionica rijeke: (1) Podsused – Zagreb (prosječni i maksimalni); (2) Zagreb – Rugvica (minimalni, prosječni i maksimalni); (3) Jasenovac – Stara Gradiška (prosječni); (4) Mačkovac – Davor (minimalni); (5) Davor – Slavonski Kobaš (minimalni); (6) Županja – Gunja (prosječni i maksimalni). Ova činjenica ukazuje na to da je mjerenje i određivanje protoka u slučaju pojave velikih vodnih valova duž toka rijeke Save na nekim postajama nepouzđano. Objašnjenje je moguće tražiti u činjenici velikih

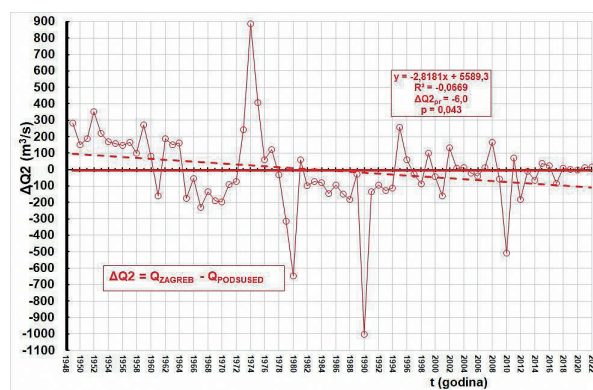
poteškoća koje se javljaju prilikom mjerenja velikih voda. To se posebno odnosi na razdoblje prije nego se započelo s primjenom suvremene tehnologije mjerenja ADCP (*acoustic Doppler current profiler*) uređajima.

3.3. Analiza nizova razlika maksimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja

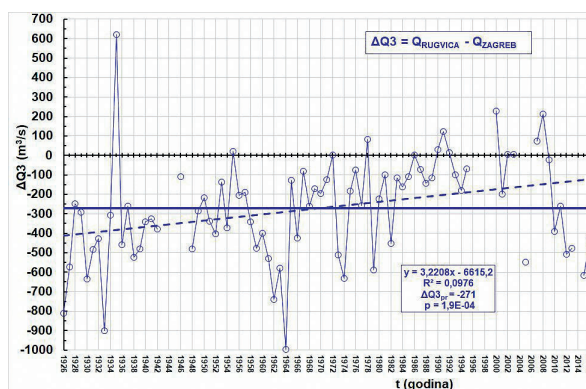
Prethodno izneseni rezultati ukazali su na potrebu detaljnijeg izučavanja razlika maksimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja.

U [tablici 11](#) upisane su karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) razlike, ΔQ , maksimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja te vrijednosti koeficijenta determinacije, R^2 , nizova razlika maksimalnih godišnjih protoka između susjednih vodomjernih postaja. U trećem stupcu [tablice 11](#) naveden je 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 od onog na nizvodnoj ili mu jednak. Na čak deset od dvanaest razmatranih dionica rijeke Save javljaju se godine kada je na nizvodnoj postaji protok manji ili jednak onom na uzvodnoj postaji. Djelomično je ova problematika za neke dionice prodiskutirana i objašnjena u prethodnom potpoglavlju. U nekim dionicama radi se o nepouzdanom izmjerenim protocima kod velikih voda i promjenjivim gornjim dijelovima krivulja protoka (pojavi petlje pri porastu i opadanju vodnog vala). U šestom stupcu [tablice 11](#) upisane su vjerojatnosti, p , statističke značajnosti trendova nizova razlika između maksimalnih godišnjih protoka, ΔQ , određene M-K testom. Trendovi porasta razlika javljaju se u pet analiziranih nizova, od čega su u dvama nizovima statistički značajni. Trendovi opadanja razlika javljaju se u sedam analiziranih nizova, od čega su u pet statistički značajni. U sljedećih pet slika pokazat će se nekoliko slučajeva nizova razlika.

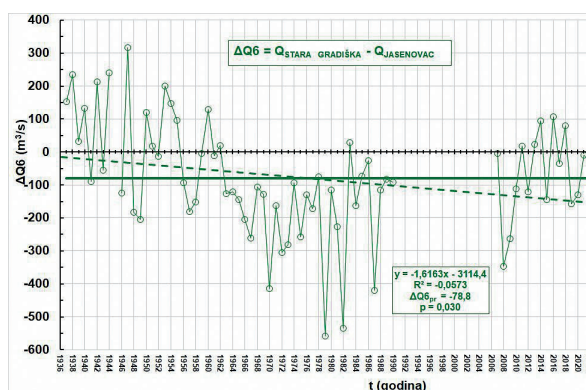
Niz razlika između maksimalnih godišnjih protoka izmjerenih na postajama Podsused i Zagreb, $\Delta Q2 = Q_{ZAGREB} - Q_{PODSUSED}$, ucrtan je na [slici 12](#). Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi $-6,0 \text{ m}^3/\text{s}$, a vrijednosti se kreću u rasponu od



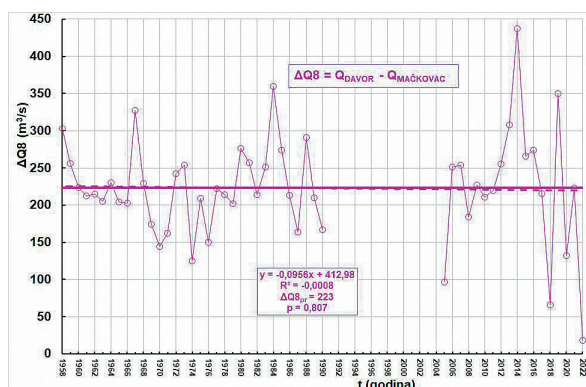
Slika 12: Niz razlika maksimalnih godišnjih protoka Zagreba i Podsuseda, $\Delta Q2$



Slika 13: Niz razlika maksimalnih godišnjih protoka Rugvice i Zagreba, $\Delta Q3$



Slika 14: Niz razlika maksimalnih godišnjih protoka Stare Gradiške i Jasenovca, $\Delta Q6$



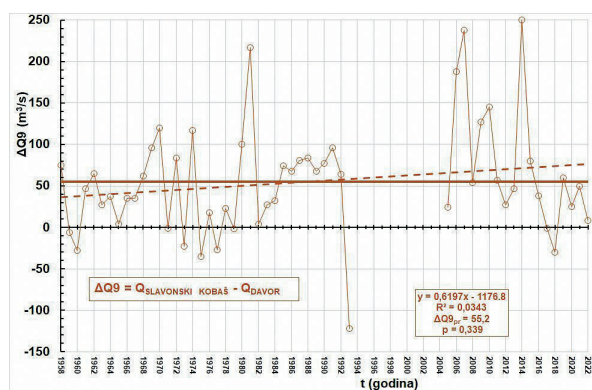
Slika 15: Niz razlika maksimalnih godišnjih protoka Davora i Mačkovca, $\Delta Q8$

minimalnih $-1004 \text{ m}^3/\text{s}$ (1990.) do maksimalnih $888 \text{ m}^3/\text{s}$ (1974.). Pravac regresije ukazuje na statistički značajan trend opadanja.

Na [slici 13](#) prikazan je niz razlika maksimalnih godišnjih protoka, $\Delta Q3 = Q_{RUGVICA} - Q_{ZAGREB}$. Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi $-271 \text{ m}^3/\text{s}$, a vrijednosti se kreću u rasponu od $-995 \text{ m}^3/\text{s}$ (1964.) do $622 \text{ m}^3/\text{s}$ (1935.). Pravac regresije ukazuje na statistički značajan trend porasta.

Na [slici 14](#) prikazan je niz razlika maksimalnih godišnjih protoka, $\Delta Q6 = Q_{STARA \text{ GRADIŠKA}} - Q_{JASENOVAC}$. Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi $-78,8 \text{ m}^3/\text{s}$, a vrijednosti se kreću u rasponu od $-559 \text{ m}^3/\text{s}$ (1979.) do $316 \text{ m}^3/\text{s}$ (1947.). Pravac regresije ukazuje na statistički značajan trend opadanja.

Na [slici 15](#) prikazan je niz razlika maksimalnih godišnjih



Slika 16: Niz razlika maksimalnih godišnjih protoka Slavnskog Kobaša i Davora, ΔQ_9

protoka, $\Delta 8 = Q_{DAVOR} - Q_{MAČKOVAC}$. Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi $223 \text{ m}^3/\text{s}$, a vrijednosti se kreću u rasponu od $15 \text{ m}^3/\text{s}$ (2022.) do $437 \text{ m}^3/\text{s}$ (2014.). Pravac regresije ne ukazuje na statistički neznatjan trend opadanja.

Na slici 16 prikazan je niz razlika maksimalnih godišnjih protoka, $\Delta 9 = Q_{SLAVONSKI KOBAS} - Q_{DAVOR}$. Prosječna vrijednost razlika u raspoloživom vremenskom razdoblju iznosi $55,2 \text{ m}^3/\text{s}$, a vrijednosti se kreću u rasponu od $-122 \text{ m}^3/\text{s}$ (1993.) do $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (2014.). Pravac regresije ne ukazuje na statistički neznatjan trend porasta.

4. ZAKJUČNO RAZMATRANJE

Rijeka Sava prepoznata je kao značajan regionalni i međudržavni prirodni resurs. Okvirni sporazum o slivu rijeke Save (*Framework Agreement on the Sava River Basin – FASRB*) razvojno je orijentiran multilateralni sporazum Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Slovenije i Srbije potpisan 3. XII. 2002. u Kranjskoj Gori (http://www.savacommission.org/basic_docs). FASRB predstavlja osnovu za prekograničnu suradnju vlada, institucija i pojedinaca s ciljem održivog razvoja sliva rijeke Save. U njemu su definirana sljedeća tri glavna cilja suradnje: (1) uspostavljanje međunarodnog režima plovidbe na rijeci Savi i njezinim plovim pritokama; (2) uspostavljanje održivog upravljanja vodama; (3) poduzimanje mjera za sprečavanje ili ograničavanje opasnosti te za smanjenje i uklanjanje negativnih posljedica, uključujući i posljedice poplava, leda, suša i slučajeva ispuštanja tvari štetnih za vodu. Komatina (2011.) naglašava da ispunjavanje ciljeva FASRB-a predstavlja bitan preduvjet za održivi razvoj cijele regije. Prekogranična vodna suradnja neizbježna je za provedbu cjelovitog slivnog pristupa i načela integriranog upravljanja vodnim resursima, kao temelja za učinkovit i održiv razvoj i upravljanje vodnim resursima u međunarodnim slivovima. Načela prekogranične vodne suradnje unutar riječnih slivova postavljena su u UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*) Konvenciji o vodama. FASRB se do sada pokazao kao dobar okvir za suradnju uključenih strana na integriranom upravljanju vodnim resursima u slivu Save, dodajući značajnu vrijednost nacionalnim naporima (Komatina i Grošelj 2015).

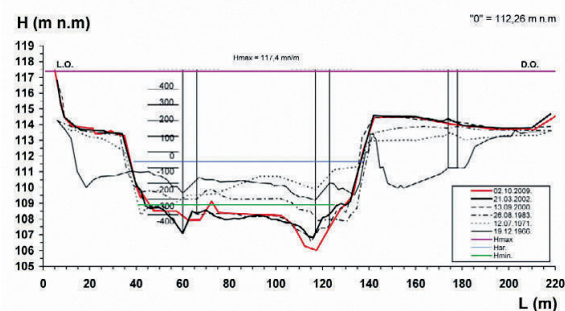
Daleko najbitniji preduvjet za ispunjavanje ciljeva

FASRB-a detaljno je poznavanje i praćenje hidroloških procesa duž toka rijeke Save. Činjenica je da o hidrološkoj i hidrometrijskoj problematici ima dosta malo objavljenih radova iako su te podloge ključne za donošenje pouzdanih odluka o održivom razvoju i upravljanju vodnim resursima u slivu ove međunarodne rijeke. U prethodnom radu (Bonacci i sur. 2024), u kojem se analiziralo nizove srednjih godišnjih protoka, navedeni su brojni radovi koji su tretirali bilo koji vid vezan uz hidrološku problematiku na bilo kojoj lokaciji duž toka Save u Hrvatskoj. Najčešće se analize vršene u njima odnose na jednu ili dvije postaje, prvenstveno Zagreb i Jasenovac. U nijednom od njih nije tretirana hidrološka ili slična problematika na većem broju postaja duž toka rijeke. Ti radovi stoga neće biti navođeni u ovom članku, već se zainteresirane upućuje da koriste rad objavljen u prethodnom broju ovog časopisa.

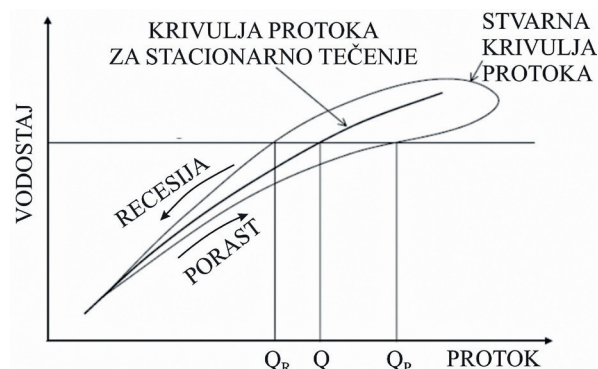
Zanimljivo je napomenuti da je izdavačka kuća Springer 2015. godine objavila knjigu *The Sava River* (Milačić i sur. 2015). U sedamnaest poglavlja te knjige u samo dvama od njih tek je periferno dotaknuta hidrološka problematika. Analizirajući klimatske projekcije na slivu Ceglar i Rakovec (2015.) procijenili su da se očekuje porast temperatura zraka na području sliva u svim godišnjim dobima. Najizraženiji porast može se očekivati ljeti i zimi. Predviđeno je da će se oborine značajno smanjiti ljeti. Manje izraženo smanjenje bit će tijekom proljeća i jeseni. Zimi se očekuje povećanje oborina, osobito u sjeverozapadnom dijelu sliva. Brilly i sur. (2015.) analizirali su rizik od poplava kao posljedica klimatskih promjena. Zaključili su da će se vršni protoci povećati do kraja dvadeset i prvog stoljeća za 100-godišnje povratno razdoblje od 9 % na ušću do 55 % na uzvodnom dijelu sliva.

Leščešen i sur. (2022.) napravili su regionalnu analizu frekvencija pojave velikih voda duž toka rijeke Save u razdoblju 1961. – 2020. koristeći podatke o maksimalnim godišnjim protocima sa sljedećih šest vodomjernih postaja: (1) Radovljica; (2) Čatež; (3) Zagreb; (4) Jasenovac; (5) Županja; (6) Sremska Mitrovica. Zaključili su da se sliv rijeke Save može ocijeniti kao hidrološki homogen. U promatranom razdoblju četiri uzvodne postaje (Radovljica, Čatež, Zagreb i Jasenovac) pokazale su statistički neznatjne trendove porasta, dok su dvije najnižvodnije (Županja i Sremska Mitrovica) pokazale statistički neznatjne trendove opadanja maksimalnih godišnjih protoka.

Analize nizova minimalnih i maksimalnih godišnjih protoka na 13 postaja duž toka rijeke Save u Hrvatskoj izvršene u ovom radu, kao i one vezane uz srednje protoke (Bonacci i sur. 2024), ukazale su na brojne probleme i moguće netočnosti (nepouzdanosti) vezano uz interpretaciju i donošenje pouzdanih zaključaka i odluka o upravljanju vodnim resursima Save u prostoru i vremenu. Pri tome treba biti svjestan činjenice da su kako mjerenja protoka tako i definiranje krivulja protoka složen zadatak podložan mogućim greškama. Kennedy (1984.) naglašava da brojni čimbenici utječu na kvalitetu



Slika 17: Šest poprečnih presjeka korita Save u Zagrebu snimljeni u razdoblju od 2. X. 1960. do 19. XII. 2009.



Slika 18: Formiranje petlje kod krivulje protoka kao posljedica nestacionarnog tečenja pri prolasku valova velike vode

mjerenja protoka u otvorenim vodotocima. Tu realnost treba imati na umu osobito u slučajevima kad se analizira duge nizove mjerenja protoka. Postupci i tehnologije vršenja mjerenja protoka pred tridesetak godina i onih današnjih primjenom ADCP uređaja bitno su različite. ADCP uređaji izračunavaju trenutnu brzinu i smjer kretanja čestica vode na temelju mjerenja Dopplerovog efekta. Imaju četiri ultrazvučne sonde koje funkcioniraju i kao odašiljači i kao prijamnici. Sama točnost mjerenja u odnosu na klasično mjerenje s hidrometrijskim krilom nije se bitno poboljšala, ali su ADCP uređaji omogućili češće i brže obavljanje mjerenja. To je osobito značajno kad se radi o mjerenjima protoka tijekom prolaska valova velikih voda. Tijekom poplava i/ili prolazaka valova velikih voda pristup vodotoku može postati nedostupan i opasan za mjerenje hidrometrijskim krilom, dok je mjerenje ADCP uređajima lakše, brže i manje opasno.

Drugi bitni element hidroloških analiza i uz njih vezanih postupaka upravljanja vodnim resursima je definiranje pouzdanih krivulja protoka. To možda predstavlja i veći problem od samih mjerenja protoka. Krivulja protoka je odnos između razine vode u vodotoku (vodostaja) i protoka. Odnos vodostaja i protoka zavisi o materijalu i geometriji korita vodotoka. Tijekom vremena taj se odnos mijenja. To se osobito brzo, često i snažno dešava u aluvijalnim vodotocima s nestabilnim dnom i/ili obalama. Rijeka Sava je na brojnim lokacijama mjerenja duž toka upravo takav vodotok.

DeGagne i sur. (1996.) kategoriziraju krivulje protoka kao stabilne ako odstupaju unutar unaprijed određene

točnosti (npr. $\pm 5\%$). Nestabilna riječna korita definirana su kao kanali koji doživljavaju evoluciju ili nagle promjene oblika. Takav jedan primjer je dat na slici 17 gdje je prikazano šest poprečnih presjeka korita Save na lokaciji vodomjernog profila Zagreb. Bitno je shvatiti da su razdoblja nestabilnosti isprepletena s razdobljima stabilnosti, pa bi prema tom kriteriju trebalo definirati trajanje važenja svake pojedine krivulje protoka.

Iako je suština odnosa između vodostaja i protoka stohastička, za potrebe hidrotehničke prakse u prvom se redu teži definiranju jednoznačnog (funkcionalnog i/ili analitički definiranog) odnosa protoka i vodostaja. Složenost i nejednoznačnost odnosa protoka i vodostaja uvjetovana je nestacionarnim kretanjem vode, formiranjem leda, obraštenošću korita, nestabilnošću obala i dna, ljudskim intervencijama itd. Pri malom rasipanju točaka (do reda veličine od 10 %) u praksi se zadovoljava s jednoznačnim odnosom vodostaja i protoka.

Često je potrebno ekstrapolirati krivulju protoka iznad najviših (a ponekad i najnižih) izmjerenih vodostaja (Sivapragasam i Muttill 2005). Krivulje protoka moraju se ekstrapolirati kada mjerenja protoka nisu dostupna u cijelom rasponu promatranih vodostaja. U jednostavnim slučajevima, krivulja se može glatko produžiti. To neće biti točno ako se kod viših vodostaja geometrija kanala promijeni, dođe do izlivanja u inundaciju ili se koeficijent hrapavosti značajno promijeni.

Krivulje protoka općenito prikazuju stacionarno stanje tečenja zanemarujući činjenicu nestacionarnog tečenja koje se manifestira formiranjem petlje (slika 18) u odnosu između vodostaja i protoka. Ona se javlja prilikom prolaska svakog vala velike vode. Ta činjenica izravno utječe na pouzdano određivanje maksimalnih godišnjih protoka. Kako je sa slike 18 vidljivo, protok za isti vodostaj pri porastu, Q_p , vala velike vode može biti značajno veći nego pri opadanju, Q_o . Krivulju protoka definiranu za stacionarno stanje tečenja definira protok, Q , koji se nalazi između prethodna dva protoka. Bitno je naglasiti da je oblik petlje različit za svaki val velike vode. Navedeno ukazuje na to da je definiranje točnih maksimalnih godišnjih protoka vrlo osjetljiv problem te da postojeće veličine koje su utvrdile službene institucije, treba prihvatiti s dužnim oprezom. Identična se preporuka odnosi i na minimalne godišnje protoke. Prethodno izneseno ukazuje na neophodnost opreza prilikom primjene ovih podataka u danas sve složenijim hidrološkim modelima.

Svi prethodno navedeni čimbenici, a vjerojatno i neki drugi, utjecali su na to da se javljaju nelogičnosti u ponašanju karakterističnih protoka duž toka velike rijeke kao što je rijeka Sava. Sve što je prethodno izneseno u ovom radu ukazuje na oprez pri donošenju zaključaka o ponašanju karakterističnih protoka duž toka Save u Hrvatskoj. Treba napomenuti da se ne radi isključivo o slučaju Save u Hrvatskoj. Manje ili više ista situacija javlja se na svakom otvorenom vodotoku bilo gdje u svijetu. Ovaj rad ukazuje na potrebu sustavnijeg pristupa

mjerenjima protoka i definiranju krivulja protoka duž toka rijeke Save u našoj državi. Radi se o ozbiljnoj problematici koja traži novi pristup i ima visoku cijenu koštanja. Autori se nadaju da će ova dva rada potaknuti odgovorne da pokušaju sustavnije i učinkovitije riješiti ovu sve aktualniju problematiku.

ZAHVALA

Ovo istraživanje djelomično je sufinancirano projektom KK.01.1.1.02.0027 koji su sufinancirale Vlada Republike Hrvatske i Europska unija kroz *European Regional Development Fund – the Competitiveness and Cohesion Operational Programme*. ■

LITERATURA

Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T.; Bonacci, D. 2024. Hidrološka analiza srednjih godišnjih protoka duž toka rijeke Save u Hrvatskoj. *Hrvatske Vode*. 32(127). 1–15.

Brilly, M.; Šraj, M.; Vidmar, A.; Primožič, M.; Koprivšek, M. 2015. Climate change impact on flood hazard in the Sava River Basin. *The Sava River. The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 31*. Springer. Berlin. Heidelberg. DOI:10.1007/978-3-662-44034-6_2.

Milačić, R.; Ščančar, J.; Paunović, M. 2015. *The Sava River. The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 31*. Springer. Berlin. Heidelberg. Germany.

Ceglar, A.; Rakovec, J. 2015. Climate projections for the Sava River Basin. *The Sava River. The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 31*. Springer. Berlin. Heidelberg. DOI:10.1007/978-3-662-44034-6_3.

DeGagne, M. P. J.; Douglas, G. G.; Hudson, H. R.; Simonović, S. P. 1996. A decision support system for the analysis and use of stage-discharge rating curves. *Journal of Hydrology*. 184(3-4). 225–241. DOI:10.1016/0022-1694(95)02973-7.

Kennedy, E. J. 1984. *Discharge ratings at gauging stations. United States Geological Survey Book 3*. Alexandria. US.

Komatina, D. 2011. The framework agreement on the Sava River Basin – a basis for sustainable development of the region. *Danube News*. 24(13). 4–7.

Komatina, D.; Grošelj, S. 2015. Transboundary water cooperation for sustainable development of the Sava River Basin. *The Sava River. The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 31*. Springer. Berlin. Heidelberg. DOI:10.1007/978-3-662-44034-6_1.

Leščešen, I.; Šraj, M.; Basarin, B.; Pavić, D.; Mesaroš, M.; Mudelsee, M. 2022. Regional flood frequency analysis of the Sava River in South-Eastern Europe. *Sustainability*. 14: 9282. DOI:10.3390/su14159282.

Sivapragasam, C.; Muttill, N. 2005. Discharge rating curve extension – a new approach. *Water Resources Management*. 19: 505–520. DOI:10.1007/s11269-005-6811-2.

http://www.savacommission.org/basic_docs (posjet 26. IV. 2024.)

HYDROLOGICAL ANALYSIS OF MINIMUM AND MAXIMUM ANNUAL FLOWS ALONG THE COURSE OF THE SAVA RIVER IN CROATIA

Abstract: The paper analyses all the available series of minimum and maximum annual flows calculated at 13 hydrological stations along the course of the Sava River in Croatia. Only official data of Croatian Meteorological and Hydrological Service (DHMZ) from Zagreb have been used. The lengths of the series are different, and observation breaks within certain series have been noticed. The last year included in the analysis is 2022. A decreasing trend of minimum annual flows has been observed at all hydrological stations. The values of linear regression coefficients indicate that the decline process behaves differently at each of the stations. It ranges from an average of 2.2 m³/10 years at the Rugvica station to an average of 7.4 m³/10 years at the Davor station. Analyses of the differences in the series of minimum annual flows between neighbouring hydrological stations show certain irregularities that indicate probable errors in the determination of minimum annual flows at some stations. These can be most probably explained by instability (erosion or backfilling) of the riverbed bottom and the insufficient number of measurements at low water levels, which causes constant changes in the lower parts of the flow curves. Regarding the series of maximum annual flows, an increasing trend has been observed at most stations, with some not indicating any trend. The highest increasing trend of 61 m³/10 years on average has been observed at the Podsused station. The decreasing trend of 14 m³/10 years on average has been measured only at the Županja station. The series of differences in maximum annual flows between the neighbouring stations greatly differ, which indicates insufficiently accurate measurements (determination) of maximum flows. This is probably consequential to insufficient number of flow measurements at high water levels and thus insufficient reliability of the determined flow curves in flooding areas.

Keywords: minimum annual flow, maximum annual flow, Mann-Kendall test, Sava River, Croatia

HYDROLOGISCHE ANALYSE DER MINIMALEN UND MAXIMALEN JAHRESDURCHFÜSSE ENTLANG DES FLUSSLAUFS DER SAVE IN KROATIEN

Zusammenfassung: Im Beitrag werden alle verfügbaren Reihen minimaler und maximaler Jahresdurchflüsse analysiert, die an 13 Wassermessstationen entlang des Flusslaufs der Save in Kroatien berechnet wurden. Es wurden nur offizielle Daten des Staatlichen Hydrometeorologischen Instituts (DHMZ) aus Zagreb verwendet. Die Reihenlängen sind unterschiedlich. Innerhalb bestimmter Reihen kommt es zu Unterbrechungen in den Beobachtungen. Das letzte in die Analyse einbezogene Jahr ist 2022. An allen Wassermessstationen war ein abnehmender Trend der minimalen Jahresdurchflüsse zu beobachten. Die Werte der linearen Regressionskoeffizienten, a , zeigen an, dass sich der Rückgangsprozess an jeder der Stationen unterschiedlich verhält. An der Station Rugvica beträgt der Rückgangsprozess durchschnittlich 2,2 m³/10 Jahren und an der Station Davor 7,4 m³/10 Jahren. Bei der Analyse der Differenzreihen der minimalen Jahresdurchflüsse zwischen benachbarten Wassermessstationen wurden gewisse Unregelmäßigkeiten festgestellt, die auf wahrscheinliche Fehler bei der Bestimmung der minimalen Jahresdurchflüsse an einigen Stationen hinweisen. Sie lassen sich höchstwahrscheinlich durch die Instabilität (Erosion oder Auffüllung) der Flusssohle und die unzureichende Anzahl von Messungen kleiner Durchflüsse erklären, was zu ständigen Änderungen in den unteren Teilen der Fließkurven führt. In den Reihen der maximalen Jahresdurchflüsse war an den meisten Stationen ein steigender Trend zu beobachten, während an einigen Stationen kein Trend erkennbar war. Der höchste Wachstumstrend von durchschnittlich 61 m³/10 Jahren wurde an der Station Podsused beobachtet. Ein rückläufiger Trend wurde nur an der Station Županja mit durchschnittlich 14 m³/10 Jahren beobachtet. Die Differenzreihen der maximalen Jahresdurchflüsse zwischen benachbarten Stationen sind sehr unterschiedlich, was auf unzureichend genaue Messungen (Bestimmungen) der maximalen Durchflüsse hinweist. Dies ist vermutlich eine Folge unzureichender Anzahl an Durchflussmessungen bei hohen Wasserständen und damit nicht ausreichend zuverlässig definierter Durchflusskurven im Falle großer Durchflüsse.

Schlüsselwörter: minimaler Jahresdurchfluss, maximaler Jahresdurchfluss, Mann-Kendall Test, Save, Kroatien