



Pregledni rad/Review paper
Primljen/Received: 21. 3. 2019.
Prihvaćen/Accepted: 6. 6. 2019.

ANALIZA MJESEČNIH I GODIŠNJIH PROTOKA RIJEKE CETINE NA VODOMJERNOJ POSTAJI TISNE STINE 1

Gordan Prskalo, izv.prof.dr.sc.

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, gordan.prskalo@gf.sum.ba

Ante Žužul, magistar građevinarstva

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet

Sažetak: U radu je izvršena osnovna statistička analiza, te analiza trenda za protoke zabilježene na vodomjernoj postaji Tisne Stine 1 na rijeci Cetini. Analiza je provedena metodama linearne i nelinearne regresije, Mann-Kendall testom te primjenom tzv. RAPS metode.

Ključne riječi: Cetina, sliv, krš, vodomjerna postaja Tisne Stine 1, protoci, regresijska analiza, Mann-Kendall test, RAPS, trend

ANALYSIS OF THE MONTHLY AND ANNUAL FLOWS OF THE CETINA RIVER AT THE TISNE STINE 1 GAUGING STATION

Abstract: A basic statistical data analysis and trend analysis were performed for the flows recorded at the Tisne Stine 1 gauging station on the Cetina River. The analysis was carried out using the linear and nonlinear regression, Mann-Kendall test, and the so-called RAPS method.

Keywords: Cetina, river basin, karst, Tisne Stine 1 gauging station, flows, regression analysis, Mann-Kendall test, RAPS, trend



1. Uvod

Mjerna postaja Tisne Stine 1 najnižvodnija je postaja na rijeci Cetini koja nije pod utjecajem uspora Jadranskog mora. Udaljenost od ušća je 6,6 km, a kota nule je na 1.198 m n. m. Postaja raspolaže mjernim nizom podataka u razdoblju od 1966. do 2018.

Na temelju podataka o protocima zabilježenih na vodomjernoj postaji Tisne Stine 1, provedena je analiza trend testa. Analizirani su vrijednosti srednjih dnevnih protoka za razdoblje od 1967. do 2017. godine. Uz srednje dnevne protoke prikazani su minimalni, srednji te maksimalni mjesečni i godišnji protoci.



Slika 1. Zemljopisni položaj vodomjerne postaje Tisne Stine 1



Slika 2. Vodomjerna postaja Tisne Stine 1

2. Osnovne značajke slivnog područja rijeke Cetine

Rijeka Cetina pripada Jadranskom slivu i predstavlja najveću rijeku Splitsko-dalmatinske županije. Duga je 105 kilometara sa površinom porječja od 4.090 km². Od izvora (Slika 3.) u mjestu Vrlika (Šibensko-kninska županija), protječe kroz različite zemljopisne cjeline, koje karakteriziraju njezin tok. Završava sa ušćem u gradu Omišu (Slika 4.), neposredno prije kojeg se nalazi i mjerna postaja Tisne Stine 1. Cetina izvire iz pet „vrila“ u podnožju planine Dinara, između vrhova Gnjat (1.809 m) i Dinara (1.831 m), na 380 metara nadmorske visine u blizini istoimenog sela Cetina. Glavni je izvor jezero duboko preko stotinu metara, a utvrđena je veza izvorišta s Buškim blatom i Livanjskim poljem.



Tok rijeke određen je raznim udolinama, krškim poljima te zaravnima. Od izvora sa njezine desne strane pruža se planina Svilaja, a sa lijeve Dinara na koju se nastavlja Kamešnica. Gornjim dijelom toka protječe kroz nekoliko polja: Cetinsko, Koljansko, Ribaričko i Sinjsko. U gradu Trilju završava ravničarski gornji dio toka rijeke Cetine. Donjim dijelom toka, sve do Zadvarja, duboko je usječena u kršku zaravan, koja rezultira kanjonskim izgledom. U tom dijelu tok je popraćen manjim brojem vodopada i riječnih brzaca koji su i važan turistički čimbenik. Donji tok prati planina Mosor, a posljednji kilometri imaju izuzetno atraktivan plovni dio, zbog velike širine korita. Na ušću rijeku Cetinu napaja podmorski izvor poznat kao Vrulja.



Slika 3. Izvor rijeke Cetine



Slika 4. Ušće rijeke Cetine

3. Metodologija rada

Metodologija rada obuhvaća opis matematičkih formulacija, koje su korištene za analizu podataka. Također su opisani osnovni statistički pojmovi te metode iz numeričke matematike. Posebna je pozornost usmjerena na metode za identifikaciju postojećeg trenda.

3.1. Mann-Kendall trend test

Mann-Kendall test se koristi u svrhu statističke procjene prisutnosti trenda promatrane varijable u određenom vremenskom periodu. Trend može biti rastući ili padajući, što znači da varijabla dosljedno raste ili opada tokom vremena. MK test može se koristiti umjesto parametarskog testa linearne regresije koji se temelji na pretpostavci da se reziduali aproksimacijske linije ravnaju po normalnoj raspodjeli. MK test ne zahtijeva pretpostavku o normalnoj raspodjeli odnosno predstavlja ne parametarski test.

MK test ne zahtijeva da se mjerenja ravnaju po normalnoj distribuciji ili da trend, ukoliko prisutan, bude linearan ali zahtijeva pretpostavku o neovisnosti (Gilbert, 1987). Da bi se zadovoljila pretpostavka o neovisnosti vremenski korak između mjerenja mora biti dovoljno



velik. Time se osigurava nedostatak korelacije između mjerenja u različitim trenucima. MK test testira treba li odbaciti hipotezu (H_0) ili prihvatiti alternativnu (H_1).

3.2. Metoda RAPS

RAPS (eng. Rescaled Adjusted Partial Sums) metoda često je korištena za detektiranje i kvantificiranje trendova i fluktuacija u vremenskim serijama. Grafički prikaz RAPS-a ukazuje na podrazdoblja sa sličnim karakteristikama, veći broj trendova, nagle skokove ili padove vrijednosti, neregularne fluktuacije, postojanje periodičnosti u analiziranom vremenskom nizu itd. (Bonacci, 2010). Izraz za proračun vrijednosti RAPS-a:

$$RAPS_k = \sum_{t=1}^k \frac{Y_t - \bar{Y}}{S_y} \quad (1)$$

gdje je:

S_y - standardna devijacija,

n - broj podataka vremenske serije,

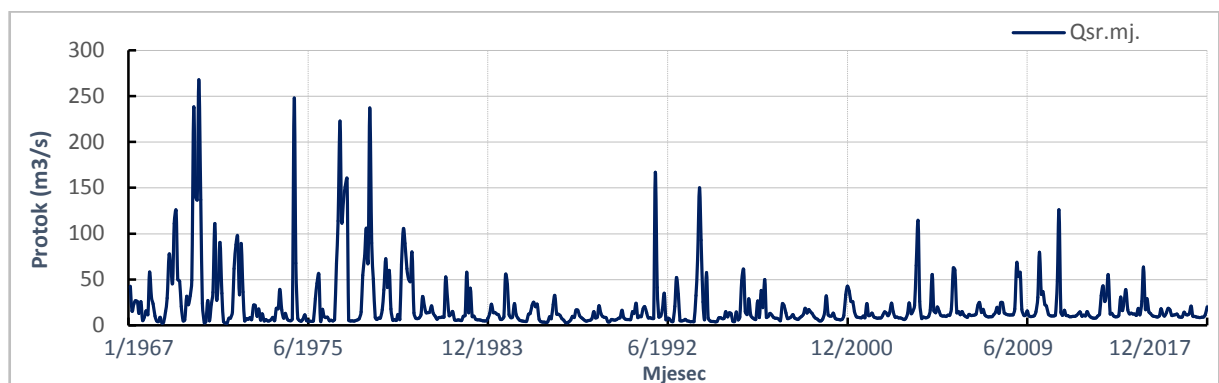
\bar{Y} - srednja vrijednost promatranog vremenskog niza.

4. Rezultati analize

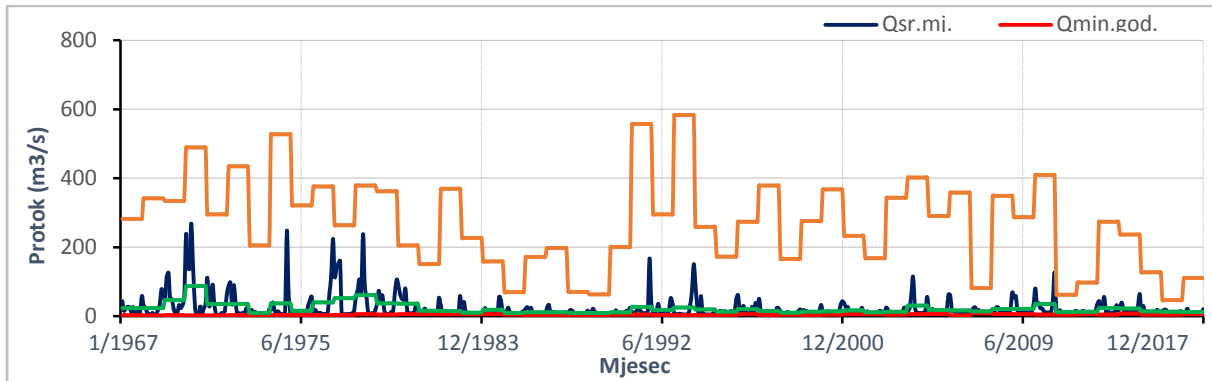
Podaci za analizu dobiveni su od DHMZ-a u razdoblju od 1967. do 2017. godine na razini srednjih dnevnih protoka. Za promatrani period, na temelju raspoloživih podataka, provedena je analiza trenda pomoću Mann-Kendall trend testa, linearne i nelinearne regresijske analize, te metodom RAPS-a.

4.1. Obrada podataka

Raspoloživi podaci (67. – 17.) dobiveni su na razini srednjih dnevnih protoka, osrednjeni na mjesečnoj i godišnjoj razini i prikazani su u obliku hidrograma. Izrađena je i prikazana krivulja trajanja protoka za mjernu postaju Tisne Stine 1.

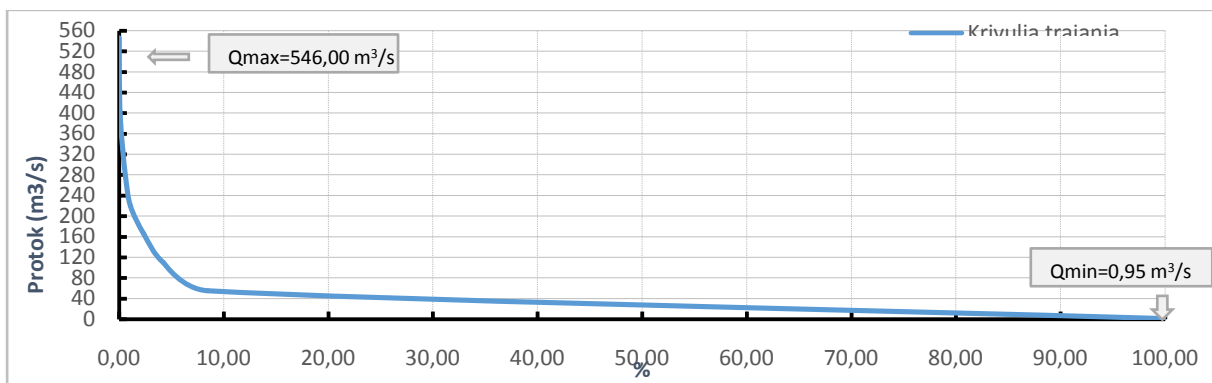


Slika 5. Hidrogram za razdoblje 1967. - 2017.



Slika 6. Min, max i srednji godišnji protoci

Za promatrano razdoblje mogu se uočiti određene godine sa znatno većim protocima kao što su 1970., 1974., 1976. te 1978. godina. Veći protoci su također zabilježeni 1991., 1993., 2004. te 2011. godine.



Slika 7. Krivulja trajanja (Žugaj, 2011)

4.2. Mann-Kendall trend test

Provedena je analiza trenda za skup podataka na razini srednjih dnevnih protoka pomoću Mann-Kendall trend testa. Prije provođenja testa potrebno je provjeriti postojanost periodičnosti za dani skup podataka, odnosno provjeriti sezonski karakter podataka. Postupak je nužan kako bi se utvrdila moguća postojanost periodičnosti, te se u tom slučaju koristi se zonski Mann- Kendall trend test koji uzima u obzir sezonski karakter podataka.

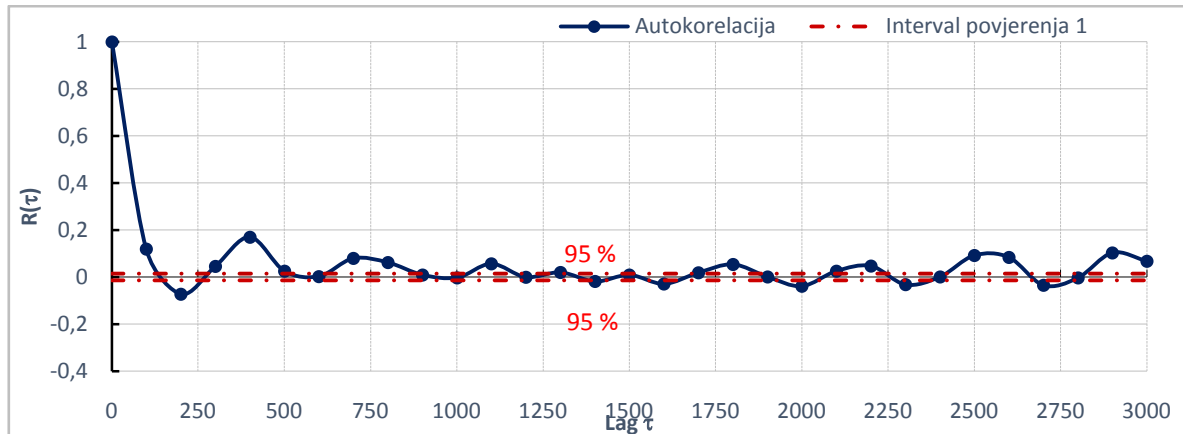
4.2.1. Analiza periodičnosti

Početni korak u određivanju postojanja sezonskog karaktera podataka je izrada korelograma. Zatim se proračunavaju koeficijenti autokorelacije $R(\tau)$, na temelju srednje vrijednosti i varijance za pripadajući vremenski korak τ . Sljedeći korak predstavlja provjeru postojanosti periodičnosti. Pretpostavka analize je ta da se autokorelacijski koeficijent ravna po normalnoj raspodjeli (Ross, 2007). Ovim postupkom definirana je nulta hipoteza, za zadani nivo značajnosti α . Ukoliko se svi podaci nalaze unutar područja pouzdanosti, prihvaća se nulta hipotezu, u suprotnome odbacuje. Rezultati proračuna prikazani su grafički (Slika 8) i tablično (Tablica 1.).



Tablica 1. Rezultati proračuna, Tisne Stine 1

N	τ	μ	$\sigma^2 * N$	α	$z_{\alpha/2}$	B_1	B_2
18628	100	21,9159	34304456,02	0,05	-1,96	-0,0144	0,0144



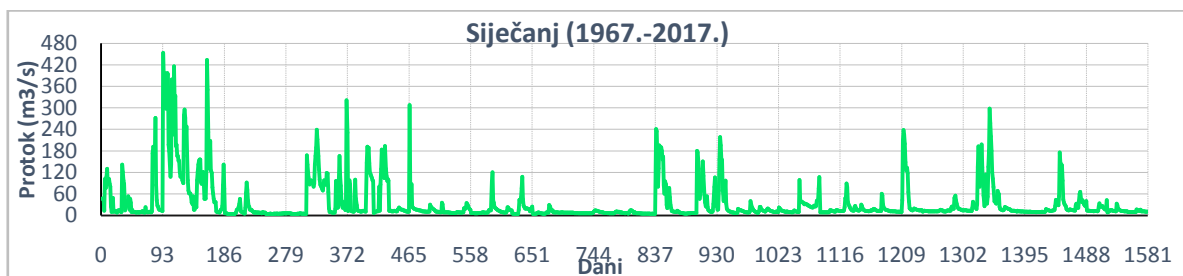
Slika 8. Korelogram (Hrvatske vode, 2008)

Prema dobivenim rezultatima vidljivo je da se znatan dio vrijednosti koeficijenta autokorelacije nalazi izvan 95 % - og intervala povjerenja te se može zaključiti da su podaci periodični, odnosno sezonskog karaktera. Nulta hipoteza se odbacuje u korist alternativne, uz zadani koeficijent značajnosti α .

4.2.2. Sezonski Mann-Kendall test

Rezultatom prethodno provedene analize utvrđena je prisutnost periodičnosti, odnosno postojanje sezonskog karaktera, te je korišten sezonski Mann-Kendall trend test.

Početni korak je podjela podataka u 12 razreda (mjeseci), kojim se ispunjava uvjet neovisnosti podataka (Hrelja, 2007). Obradeni podaci prikazani su grafički na slikama (Slika 9.) u obliku hidrograma. Svaki razred određen je predznakom svih $n(n-1)/2$ razlika, te proračunata indikator funkcija za svaku razliku. Sljedeći korak je provedba proračuna Mann-Kendall statistike S_i za i -ti mjesec, te pripadajuće varijance $Var(S_i)$, koje se sumiraju. Zadnji korak je proračun Mann-Kendall test statistike ZMK prema izrazu, te prikaz dobivenih rezultata proračuna (Tablica 2).



Slika 9. Rezultati proračuna (ogledni primjer za 1. mjesec)



Tablica 2. Rezultati proračuna MK test statistike

i	S_i	$Var(S_i)$		S'	$Var(S')$
1	38836	4,39E+08	/	2652853	5,00E+09
2	2169	3,33E+08			
3	52282	4,39E+08		Z_{MK}	
4	-28137	3,98E+08		37,518	
5	152710	4,39E+08			
6	389219	3,98E+08			
7	639081	4,39E+08			
8	603812	4,39E+08			
9	325643	3,98E+08			
10	211594	4,39E+08			
11	174580	3,98E+08			
12	91064	4,39E+08			

Provedeni proračun rezultira pozitivnom vrijednosti MK test-a statistike, koja implicira rastući trend. Zatim se testira nul hipoteza H_0 :nema prisutnog trenda protiv alternativne hipoteze H_1 :prisutan je rastući trend uz pripadajuću razinu značajnosti α . Odabran je dvostrani Z test. Rezultati analize prikazani su tablično (Tablica 3.).

Tablica 3. Testiranje hipoteze

α	Z_{MK}		$Z_{1-\alpha/2}$
0,05	37,51766	>	1,96

Kako je $Z_{MK} > Z_{1-\alpha/2}$, nulta hipoteza H_0 se odbacuje, a alternativna hipoteza H_1 prihvaća. Provedenom analizom za skup podataka na razini srednjih dnevnih protoka, može se zaključiti prisutnost rastućeg trenda.

4.3. Linearna i nelinearna regresijska analiza

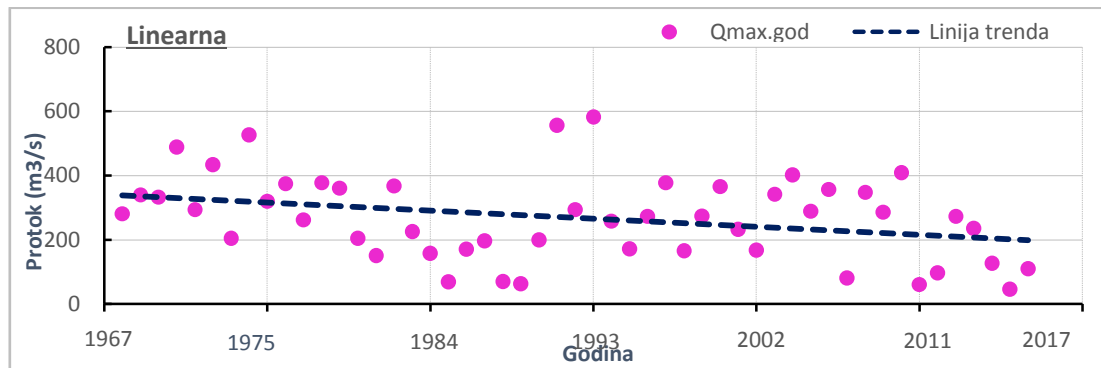
Regresijska analiza predstavlja parametarsku metodu određivanja trenda. Za poznate podatke o protocima u ovom poglavlju su izrađena dva modela regresijske analize, linearni i polinomski. Svaki model prikazan je grafički uz pripadajuće parametre te njihove osobine. Analiza trenda provedena je za podatke na razini srednjih dnevnih, mjesečnih i godišnjih protoka te minimalnih i maksimalnih godišnjih protoka. Osrednjeni protoci na mjesečnoj i godišnjoj razini rezultiraju povećanjem koeficijenta korelacije. Nedostatak je gubitak ekstremnih vrijednosti čime se smanjuje točnost procjene. Koeficijent korelacije, za veliki broj podataka, poprima malu vrijednost te kao takav upućuje na malu točnost odabranog modela. Polinomski model bolje opisuje skup podataka, te za razliku od linearnog prikazuje trend za više razdoblja (Dunn, 2005). Svako povećanje stupnja polinoma rezultira povećanjem koeficijenta korelacije, ali do određene granice.

Mala vrijednost koeficijenta korelacije dovodi u pitanje valjanost modela. Zbog toga razloga za svaki model provedena je analiza valjanosti. Testirana je hipoteza $H_0: r=0$: nema korelacije između podataka, protiv alternativne hipoteze $H_1: r \neq 0$: odnosno prisutna je korelacija, pri razini značajnosti $\alpha=5\%$. Odabran je dvostrani Z test. Analiza valjanosti provedena je i za koeficijente linearnog i polinomskog modela.

Provedene su analize za srednje dnevne, mjesečne protoke te minimalne, srednje i maksimalne godišnje protoke. Rezultati analize prikazani su ilustrativno za maksimalne godišnje protoke grafički u obliku hidrograma sa pripadajućom linijom trenda za vrijednosti te tablično sa odgovarajućim izračunatim parametrima.



4.3.1. Maksimalni godišnji protoci

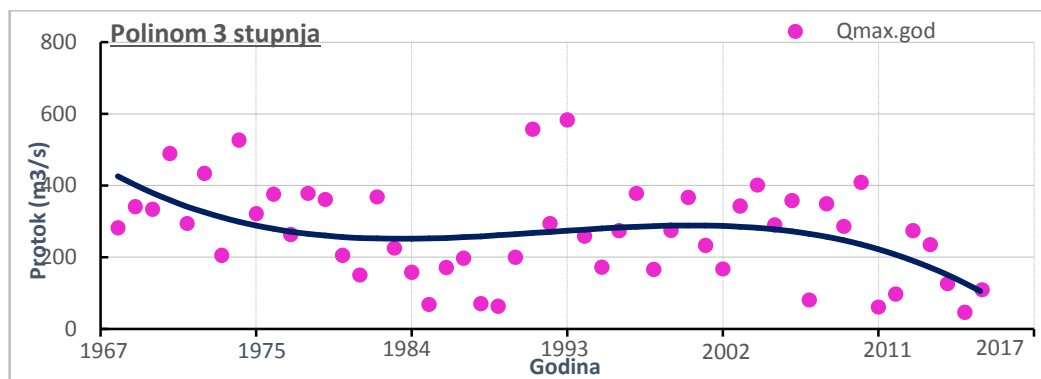


Slika 10. Linearni model za maksimalne godišnje protoke

Tablica 4. Parametri polinomskog modela

Jed. pravca	$y = -2,795x + 341,029$								
Nagib pravca	$y' = 2,795$								
r	r²	$\hat{\sigma}$	n	Koeficijenti	s_{koef}	 z_n 	█	Z_{(1-α)/2}	
0,315	0,099	126,670	51	a	-2,795	1,205	2,319	>	1,96
				r	0,315	0,136	2,319	>	1,96

Linearni model za maksimalne godišnje protoke sadrži 51 podatak. Opisuje 9,9 % podataka. Testiranje hipoteza za koeficijent nagiba i korelacije pokazuje da su test statistike veće od graničnih (Tablica 4). Negativna vrijednost nagiba pravca pokazuje padajući trend, odnosno pad vrijednosti protoka u promatranom razdoblju od 43 %; 2,941 m³/s godišnje (Slika 10.).



Slika 11. Polinomski model za maksimalne godišnje protoke



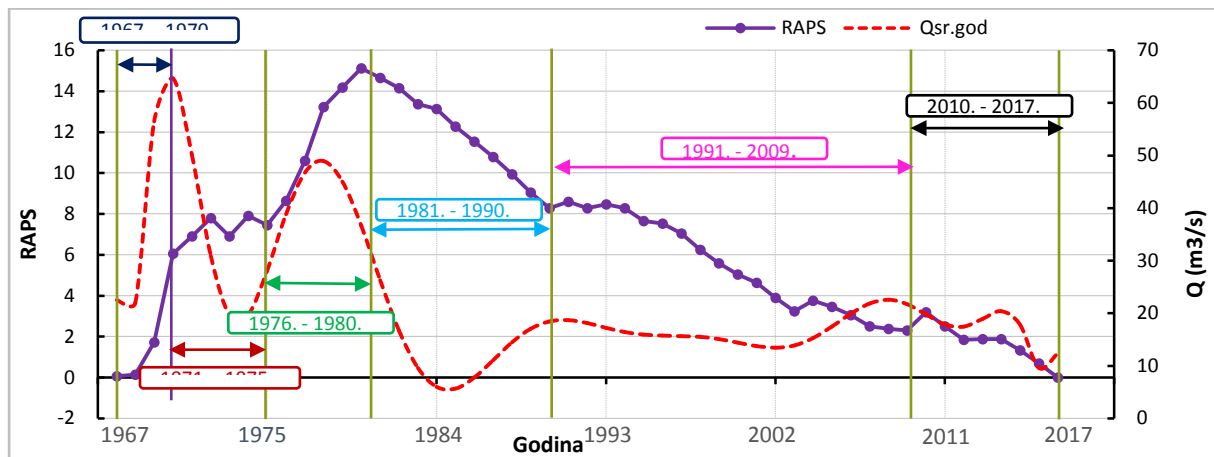
Tablica 5. Parametri polinomskog modela

Jednadžba krivulje	$Y = -0,016x^3 + 1,209x^2 - 27,87x + 452,524$										
Nagib krivulje	$Y = -0,048x^2 + 2,418x - 27,87x$										
r	r²				σ			n			
0,434	0,189				122,728			51			
Koeficijenti	S_{koef}	 z_n 	Z_{(1-α)/2}		Koeficijenti	S_{koef}	 z_n 	Z_{(1-α)/2}			
a₁	-0,016	0,007	2,277	>	1,96	a₃	27,870	12,225	2,280	>	1,96
a₂	1,210	0,543	2,226	>	1,96	r	0,434	0,129	3,375	>	1,96

Za polinomski model odabran je polinom 3. stupnja koji opisuje 18,9 % podataka. Testiranjem hipoteza utvrđeno je da su test statistike za sve koeficijente veće od granične vrijednosti (Tablica 5.). Rezultati modela predloženi dijagramom (Slika 11.) rezultiraju padovima protoka: 39% u razdoblju 1967. – 1984. te 67% u razdoblju 2002. – 2017. godine. Ne veoma značajni porast protoka javlja se u razdoblju 1984. – 2002. godine u iznosu od 13%.

4.4. Metoda RAPS

Provedenom analizom metodama linearne i nelinearne regresije, polinomski model prikazao je određene rastuće i padajuće oscilacije protoka. Provjera rezultata provedena je metodom RAPS. Za analizu su korišteni srednji godišnji protoci za razdoblje 1967. – 2017. godine.

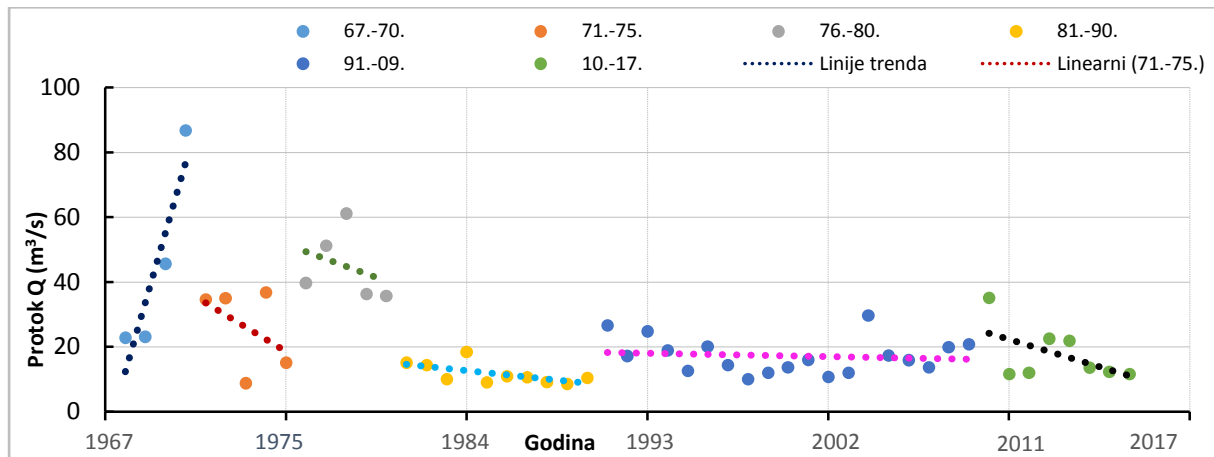


Slika 12. RAPS metoda za srednje godišnje protoke

Rezultati metode ukazali su na određena podrazdoblja naglih promjena protoka te podrazdoblja sličnih karakteristika. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 12, sa prikazanom linijom trenda za polinomski model $Q_{sr/god}$ (Slika 12). Tako dobiveni rezultati mogu se usporediti pomoću metode nelinearne regresije i RAPS metode. Vremenska serija podijeljena je na 6 podrazdoblja kronološkim redoslijedom: 1967. - 1970. ; 1971. - 1975. ; 1976. - 1980. ; 1981. - 1990. ; 1991. - 2009. ; 2010. - 2017. Na osnovu podjele može se uočiti kako se



linija trenda polinomskog modela približno može opisati RAPS krivuljom. Podrazdoblja sa padajućom linijom trenda, odnosno padajućim protocima su: 1967. – 1968.; 1970. – 1974.; 1978. – 1985.; 1991. – 2002.; 2008. – 2011.; 2014. – 2016. Podrazdoblja sa rastućom linijom trenda odnosno rastućim protocima su: 1968. – 1970.; 1974. – 1978.; 1985. – 1991.; 2002. – 2008.; 2011. – 2014.; 2016. – 2017.



Slika 13. Linearni model za sedam podrazdoblja za srednje godišnje protoke

Kako bi se ostvario bolji uvid o podacima, za svako podrazdoblje izrađen je grafički prikaz linearnog regresijskog modela sa pripadajućom linijom trenda (Slika 13.). Također su tablično prikazani parametri modela te rezultati analize (Tablica 6), iz kojih se može zaključiti kako linearni model ne opisuje skup podataka za slijedeća podrazdoblja: 1971. – 1975.; 1976. – 1980.; 1991. – 2009.; 2010. – 2017., odnosno vrijednosti test statistika manje su od granične vrijednosti. Za podrazdoblja: 1967. – 1970.; 1981. – 1990., model prikazuje prisutnost trenda.

Tablica 6. Parametri linearnog modela za sedam razdoblja, Tisne Stine 1

Godina	Jednadžba pravca	r	r ²	b	n	a			r		
						z _n	z _{(1-α)/2}	z _{(1-α)/2}	z _n	z _{(1-α)/2}	z _{(1-α)/2}
67.-70.	y = 21,45x - 9,05	0,92	0,85	14,47	4	3,31	>	1,96	3,31	>	1,96
71.-75.	y = - 3,74x + 52,3	0,45	0,20	13,56	5	0,87	<	1,96	0,87	<	1,96
76.-80.	y = - 2,72x + 72,1	0,33	0,11	12,03	5	0,60	<	1,96	0,60	<	1,96
81.-90.	y = - 0,65x + 24,54	0,62	0,38	2,68	10	2,22	>	1,96	2,22	<	1,96
91.-09.	y = - 0,11 x + 21,15	0,12	0,01	5,58	19	0,49	<	1,96	0,49	<	1,96
10.-17.	y = - 1,86 + 106,27	0,54	0,30	7,63	8	1,59	<	1,96	1,59	<	1,96

Za podrazdoblje 1967. – 1970. model prikazuje rast protoka od 86% te za podrazdoblje 1981. – 1990. pad od 44%. Nevaljalost modela za podrazdoblja 71. – 75.; 76. – 78.; 91. – 09. te 10. – 17. može se objasniti velikom varijabilnošću malog broja podataka. Time je dobiven vrlo nizak koeficijent korelacije te model nije prikazao prisutnost statistički značajnog trenda.

Sličan rast protoka kao i kod polinomskog modela daje podrazdoblje 1967. – 1970. godine. Podrazdoblje pada protoka 1981. – 1990. godine daje različite rezultate od polinomskog. Linearni model za podrazdoblje određeno RAPS krivuljom prikazuje pad protoka dok polinomski model za isto podrazdoblje obuhvaća i pad i rast.



5. Zaključak

U ovom je radu cilj bio prikazati te usporediti dobivene rezultate analize trenda odabranim metodama. Provedena analiza triju metoda prikazala je različite ali i slične rezultate.

Prva metoda, Mann-Kendall trend testna temelju dobivenih rezultata, pokazao je postojanost rastućeg trenda za promatrano razdoblje 1967.-2017. Prednost testa je ta što uzima u obzir sezonski karakter podataka, koji kod regresijskih metoda znatno utječe na analizu trenda.

Slijedeća metoda, regresijska, omogućuje detaljniji uvid u ponašanje protoka kroz promatrani period. Linearni modeli pokazali su padajući trend od 67 %, što je suprotno od Mann-Kendall testa. Dobiveni koeficijent korelacije najmanji je za model srednjih dnevnih protoka ($r=0,158$), dok je za srednje mjesečne nešto veći ($r=0,212$), a najveći je za srednje godišnje protoke ($r=0,452$). Polinomski model prikazao je razdoblja naizmjeničnog pada i rasta protoka, koja se mogu objasniti u dvije faze. Prva faza obuhvaća razdoblje do 1980. godine tijekom kojeg je trajala izgradnja HE Zakučac, što je rezultiralo pojavom znatno većih protoka. Druga faza od 1980. godine kada je HE izgrađena, predstavlja razdoblje bez značajnih promjena protoka, što se može objasniti kao rezultat puštanja HE u pogon.

Metoda RAPS rezultirala je prikazom podrazdoblja kao kod polinomskog modela za $Q_{\text{sred/god}}$. Sličnosti ponašanja modela ukazuju na točnost provedene regresijske analize koja je rezultirala padajućim trendom.

Obzirom da je jedan od modela pokazao padajući trend, a drugi rastući može se ukazati na točnost metoda. Činjenica padajućeg trenda, kao rezultat regresijske metode, može se objasniti posljedicom izgradnje HE Zakučac. Ipak nešto precizniju analizu trenda pokazuje Mann-Kendall test, koji uzima u obzir sezonski karakter podataka te ih dovodi u vezu, pa time daje pouzdanije rezultate, dok se regresijski temelji na predviđanju trenda obzirom na model koji najbolje opisuje podatke, što često rezultira pogreškama.

6. Literatura

1. Bonacci, O., Analiza nizova srednjih godišnjih temperatura zraka u Hrvatskoj, Građevinar 62 (2010) 9, 781-791. 781., 2010.
2. Dunn, P.F., Measurement and data analysis for engineering and science, McGraw-Hill, a business unit of The McGraw-Hill Companies New York, 2005.
3. Gilbert, R.O., Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, International Thomson Publishing, New York, 1987.
4. Hrelja, H., Inženjerska hidrologija, Građevinski fakultet u Sarajevu, Sarajevo, 2007.
5. Hrvatske vode, Vodoopskrbni plan Splitsko-dalmatinske županije. Split, 2008.
6. Ross, S.M., Introduction to probability models, Berkely, California: Elsevier Inc., 2007.
7. Žugaj, R., Krivulje trajanja protoka. Građevinar 63, str. 1061- 1067, 2011.