

DUGOROČNE PROMENE GODIŠNJIH I SEZONSKIH PROTICAJA: PRIMER REKE SAVE

Milan STOJKOVIĆ
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Srbija
Jasna PLAVŠIĆ
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija
Stevan PROHASKA
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Srbija

REZIME

U ovom radu analizirane su dugoročne promene u vremenskim serijama oticaja. Razmatrano je prisustvo trenda i višegodišnjih vodnih i sušnih ciklusa. Analiza trenda vršena je standardnim Mann-Kendall testom, a pored toga trend je analiziran korišćenjem tzv. multi-vremenskog pristupa u kojoj se trendovi računaju za podserije različitih početaka i dužina. Analiza je sprovedena na standardizovanim i osrednjenim serijama sezonskih i godišnjih proticaja na reci Savi na stanicama Zagreb i Sremska Mitrovica za period 1926-2005. Kada se posmatra ceo period, zaključuje se da je trend sezonskih i godišnjih proticaja na reci Savi opadajući. Trendovi godišnjih proticaja u širem području (Dunav, Velika Morava, Lim) su u skladu sa ovim rezultatima, dok reka Tisa poseduje rastuće trendove godišnjih proticaja. Multi-vremenskom analizom pokazano je da se trend razlikuje za različite podserije. Na smer i nagib trenda vremenskih serija utiče dužina serije kao i položaj podserije unutar cele serije. Promena smera i nagiba trenda ima ciklični karakter što odgovara smenama višegodišnjih vodnih i sušnih perioda.

Ključne reči: Mann-Kendall test, multi-vremenski pristup za analizu trenda, reka Sava, jugoistočna Evropa

1. UVOD

Energetska razmena između Sunca, Zemlje i atmosfere je osnovni pokretač procesa u atmosferi i na površini Zemlje, kao što je evapotranspiracija i oticaj sa sliva. Istraživanja sprovedena putem merenja sunčevog zračenja na površini Zemlje pokazuju uzlazni trend u poslednjih nekoliko dekada u opsegu + (1,7-2,7) Wm⁻²

(Wild i sar. 2008). Porast sunčevog zračenja na površini Zemlje rezultuje povećanjem globalne temperature. Peti IPCC izveštaj (IPCC 2013) zaključuje da period od 1880. do 2012. pokazuje značajan trend porasta globalne temperature pri čemu je najveći trend zabeležen za period od 1979. do 2012. sa porastom od 0,25-0,27°C po dekadi (Rohde i sar., 2013).

Na severnoj hemisferi, iznad geografske širine od 300, zabeležen je značajan rastući trend suma godišnjih padavina na globalnom nivou za period 1901-2008. (IPCC 2013). Suprotno od temperatura vazduha, porast padavina pokazuje širi opseg vrednosti od 1,44-3,23 mm po dekadi (Smith i sar. 2012) uz postojanje velikih varijacija u zavisnosti od lokacije. Prema različitim klimatskim scenarijima, pored povećanja suma padavina na severnom delu sliva Dunava, očekuje se učestalija pojava ekstremnih događaja (ICPDR 2012). Očekuje se povećanje padavina u zimskim mesecima koje iznosi +20% sa očekivanim regionalnim varijacijama od +5% do +35%. Očekivano smanjenje padavina u južnoj Evropi je u rangu od -25% do -45%. Centralna Evropa predstavlja područje sa umerenim projekcijama padavinama gde se može očekivati u pojedinim njenim delovima smanjenje oko -20%. Regija Alpa deli se na vlažniji i sušniji južni deo, tako da se očekuje da jugoistočni deo Austrije predstavlja sušniju zonu.

Iako su tendencije promene klimatskih veličina kao što su temperature u padavine veoma česta tema istraživanja, uticaj ovih promena na hidrološke veličine je mnogo manje jasan. U hidrološkoj literaturi postoji relativno mali broj analiza koje se bave promenom hidroloških parametara u funkciji promena u meteorološkim vremenskim serijama. Krasovskaia (1996) i Krasovskaia i

Sæltun (1997) su primenom koncepta entropije utvrdili da postoji osetljivost hidrološkog ciklusa na promene temperature vazduha. Istraživanja su sprovedi na severu Evrope i utvrdili da su se promene temperature odrazile na formiranje i otapanje snega. U istom duhu, korišćenjem koncepta entropije, Bower i sar. (2004) su definisali indeks osetljivosti hidroloških procesa na meteorološke parametre na prostoru Velike Britanije i svrstali su reke u sedam klasa na osnovu njihove osetljivosti. Bower i sar. (2008) su koristili linearnu regresiju sa prethodno normalizovanim vremenskim serijama da utvrde uticaj promena meteoroloških veličina na godišnje proticaje, pri čemu regresioni koeficijenti predstavljaju meru osetljivosti hidroloških procesa. Porast temperatura vazduha i njen uticaj na oticanje sa sliva izučavan je na 27 hidroloških stanica u Saksoniji (Nemačka) (Renner i Bernhofer, 2011). Ovi autori su zaključili da se značajne promene javljaju na svim stanicama od 1988. godine kada se grana porasta hidrograma javlja 1 do 3 nedelje ranije, dok se temperatura vazduha povećala za 1 °C.

Cilj ovog rada je da se analiziraju vremenske serije srednjih godišnjih i sezonskih proticaja na reci Savi, pritoci Dunava, da se odrede trendovi u njima i da se pronađe veza sa trendovima u meteorološkim serijama. Pored padavina koje su glavni pokretač oticaja, analizirane su i temperature, atmosferski pritisak i indeks severno-atlantske oscilacije NAO. Trendovi u godišnjim i sezonskim proticajima su analizirani pomoću Mann-Kendall testa korišćenjem tzv. multi-vremenskog pristupa koji podrazumeva proračun trenda u pokretnim prozorima različite dužine. Rad ima za cilj da pokaže da je vremenski interval bitan parametar za analizu trenda iz razloga što dugoročna periodičnost hidroloških serija utiče na pravac i intenzitet trenda.

2. ANALIZA TRENTA: MANN-KENDALL TEST

Mnoge analize trenda zasnovane su na dobro poznatom Mann-Kendall testu (Douglas i sar., 2000). Ovaj test je neparameterski i zasniva se na poređenju svih podataka u vremenskoj seriji sa podacima koji slede u vremenu. Kendalova statistika se računa na sledeći način (Kendall, 1962; Douglas i sar., 2000):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(Q_i - Q_j), \quad (1)$$

gde su Q_i i Q_j srednji godišnji proticaji u vremenskim koracima i i j , $\text{sign}(Q_i - Q_j)$ je jednako +1 u slučaju kada je Q_i veće od Q_j i -1 ako je suprotno. Ukoliko se pokaže

da je $S > 0$, tada u vremenskoj seriji postoji opadajući trend, za $S < 0$ trend je rastući. Za ovu kontrolnu statistiku matematičko očekivanje i varijansa su sledeći:

$$E(S) = 0, \quad (2)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} = \sigma^2.$$

Ako u seriji ima ponavljanja vrednosti, varijansa statistike S se koriguje na sledeći način:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18}, \quad (3)$$

gde t_i predstavlja broj grupa istih vrednosti u vremenskoj seriji. Na primer, ukoliko u vremenskoj seriji postoji tri para istih vrednosti, tada je $i = 2$ i $t_i = 3$.

Analiza trenda može da dovede do pogrešnog zaključka zbog nestacionarnosti vremenskih serija, odnosno zbog postojanja višegodišnjih vodnih i sušnih ciklusa u serijama. Iz tog razloga neophodno je za ocenu trenda uzeti nekoliko punih ciklusa vremenske serije kako bi trend bio reprezentativan. Dodatni problem u detekciji trenda može da predstavlja zanemarivanje autokorelisanosti serije, što dovodi da smanjenja broja podataka za ocenu trenda (Douglas i sar., 2000). Mann-Kendall test polazi od pretpostavke da su vremenske serije nezavisne, međutim, u mnogim slučajevima se dešava da godišnje serije proticaja taj uslov ne ispunjavaju.

Kako bi Mann-Kendallov test mogao da se primeni na zavisne vremenske serije, Khaliq i sar. (2009) prikazali su metode za odstranjivanje uticaja autokorelisanosti iz hidroloških vremenskih serija kao što su *pre-whitening* metoda, metoda korekcije varijanse i *bootstrap* metoda. Pristup korekcije varijanse, koji je odabran u ovom radu, podrazumeva da serija sa autokorelacijom sadrži N članova, a da efektivan broj članova koji nisu međusobno korelisani manji od N . S tim u vezi, Hamed i Rao (1998) i Yue i Wang (2004), predložili su korekciju varijanse statistike S u Mann-Kendall testu:

$$\text{Var}^*(S) = CF \cdot \text{Var}(S), \quad (4)$$

$$CF_1 = 1 + \frac{2}{N(N-1)(N-2)} \sum_{\tau=1}^{N-1} (N-1)(N-1-\tau)(N-1-2\tau)r_{\tau}^R,$$

$$CF_2 = 1 + 2 \sum_{\tau=1}^{N-1} (1 - N/\tau)r_{\tau},$$

gde su r_τ vrednosti autokorelacione funkcije za korak τ serije proticaja Q , a r_τ^R definiše istu funkciju samo za rangove članova serije. Po preporukama koje su dali Khaliq i sar. (2009), pristup korekcije varijanse je primenljiv za autoregresione procese ne samo prvog reda (tj. procese AR(1)) već i za procese višeg reda AR(p) za $p > 1$.

Nulta hipoteza Mann-Kendall testa je da u seriji nema monotonog trenda. Za testiranje te hipoteze koristi se kontrolna statistika:

$$z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma}, & S > 0 \\ \frac{S+1}{\sigma}, & S < 0 \\ 0, & S = 0 \end{cases} \quad (5)$$

koja približno prati standardnu normalnu raspodelu (Kendall, 1962). Ukoliko je Z_s veće od 1,96, što odgovara pragu značajnosti $\alpha = 0,05$, zaključuje se da u vremenskoj seriji postoji monotoni trend, a u suprotnom da trend ne postoji.

3. ANALIZA TRENTA: MULTI-VREMENSKI PRISTUP

Analize trenda koje se sprovode na hidrološkim vremenskim serijama podrazumevaju da se ocena trenda vrši korišćenjem podataka od prve do poslednje godine u raspoloživoj vremenskoj seriji. Multi-vremenski pristup (eng. *multi-temporal*) predstavlja alternativni način ocenivanja trenda koji obuhvata testiranje više podserija unutar cele raspoložive vremenske serije. Pod podserijom se ovde podrazumeva skup članova serije iz jednog kontinualnog višegodišnjeg perioda. Multi-vremenska analiza obuhvata testiranje trenda u podserijama različite dužine i različitih početaka.

Vizuelizaciju trendova vremenske serije za različite podserije prvi su predstavili McCabe i Wolock (2002) koji su za ocenu trenda koristili Kendalovu „tau“ neparametarsku korelacionu statistiku. Ovakav pristup primenjen je u analizi trenda maksimalnih godišnjih proticaja u Nemačkoj (Petrow i sar., 2009) i Švajcarskoj (Schmocker-Fackel i Naef, 2010). Hannaford i sar. (2013) analizirali su serije srednjih godišnjih i maksimalnih proticaja putem multi-vremenskog pristupa, obuhvativši pritom veliki broj manjih slivova u Evropi. Gru-

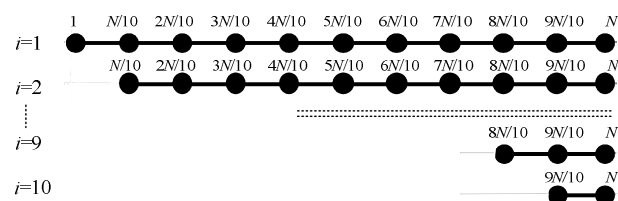
pisali su serije proticaja po slivovima i regionima, gde su u okviru svake grupe izvršili standardizaciju članova serije. Srednje standardizovane vrednosti proticaja uglavčavali su metodom LOESS. Takvim pristupom pokazali su da na trend vremenske serije u velikoj meri utiču višegodišnji ciklusi godišnjih proticaja. Za određivanje značajnosti trenda koristili su Mann-Kendallov test.

U ovom radu analiza trenda vrši se prema prethodno iznetim principima tako što se proticaji u slivu standardizuju i potom osrednjavaju. Standardizovana serija Z se dobija osrednjavanjem serija proticaja dužine N za grupu od m stanica:

$$Z_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{Q_{j,k} - \bar{Q}_k}{\sigma_{Q_k}}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

gde je $Q_{j,k}$ vrednost na stanici k u j -oj godini ($j = 1, 2, \dots, N$), \bar{Q}_k je višegodišnja srednja vrednost proticaja na stanici k i σ_{Q_k} je standardna devijacija godišnjih proticaja na stanici k .

Prateći iskustva Hannaford i sar. (2013), trend proticaja računat je za podserije dobijene kombinacijom različitih segmenata. Serija je podeljena na 10 jednakih segmenata, a u prvom koraku ($i = 1$) podserije se formiraju počevši od prvog člana. Trend u proticajima računa se najpre za prvi segment tj. segment od prvog člana do člana $N/10$ (slika 1). Sukcesivno se nastavlja kombinovanje segmenata po sledećem redosledu: od 1 do $2N/10$, od 1 do $3N/10$, ..., i konačno od 1 do N . U drugom koraku ($i = 2$) odbacuje se prvi segment do člana $N/10$, a zatim se nastavlja sukcesivno računanje trendova podserija: od $N/10$ do $2N/10$, od $N/10$ do $3N/10$, ..., i od $N/10$ do N . Postupak se nastavlja do desetog koraka ($i = 10$) kada preostaje poslednja podserija od $9N/10$ do N .



Slika 1. Shema za računanje trenda vremenskih serija po multi-vremenskom pristupu

Primenom multi-vremenskog pristupa u analizu trenda se uvode dodatni parametri, kao što su dužina vremenske serije i položaj analiziranog segmenta vremenske serije unutar celog vremenskog raspona. Krajnji cilj ove

analize je da pokaže da na pravac i intenzitet trenda utiču periodične višegodišnje smene sušnih i vodnih ciklusa u slivu.

4. REZULTATI

Srednji sezonski i godišnji proticaji na hidrološkim stanicama Zagreb i Sremska Mitrovica na reci Savi u periodu od 1926. do 2005. su analizirani kako bi se demonstrirala prikazana metodologija. Standardizovane serije Z (jed. 6) godišnjih i sezonskih proticaja su dobijene na osnovu odgovarajućih serija proticaja na stanicama Zagreb i Sremska Mitrovica i prikazane su na slici 2. Na istim dijagramima prikazane su i uglačane serije (Z_{Loess}) dobijene korišćenjem lokalne regresione tehnike LOESS sa vremenskim prozorom glačanja od 16 godina.

Uglačane serije na slici 2 upućuju na postojanje dugoročne periodične komponente srednjih godišnjih i sezonskih proticaja. Značaj ovih višegodišnjih ciklusa može se proceniti kroz udeo uglačane serije u varijansi osmotrene serije (Gudmundsson i sar. 2011):

$$\Phi_Z = \frac{\sigma_{Z_{loess}}^2}{\sigma_Z^2}, \quad (7)$$

gde je $\sigma_{Z_{loess}}^2$ varijansa uglačane standardizovane serije proticaja, dok je σ_Z^2 varijansa osmotrene standardizovane serije. U razmatranom primeru udeo varijanse uglačane serije godišnjih proticaja $Z(Q)$ iznosi 36,2%; za zimске proticaje $Z(Q_I)$ taj udeo je 35,2% i za letnje proticaje $Z(Q_{III})$ 33,2%. Najveće učešće varijanse uglačane serije u ukupnoj varijansi je za prolećne proticaje $Z(Q_{II})$ gde iznosi 37,8%, a najmanje je tokom jeseni ($Z(Q_{IV})$) kada je 28,3%. Veliko učešće uglačane serije korespondira sa većim prisustvom determinističke komponente kao što su trend i periodičnost. U radu Stojkovića i sar. (2014a) izvršena je identifikacija periodične komponente u ovim serijama i njenih značajnih frekvencija pomoću Furijeove analize, pri čemu je utvrđeno da značajna perioda godišnjih proticaja iznosi 40 godina. Način određivanja značajnih perioda pomoću Furijeve analize je prikazan detaljno u radovima Radića i Mihalovićeve (2006), Busuladžića (2007) i Stojkovića i sar. (2012). U slučaju sezonskih proticaja identifikovane su značajne periode od 40, 16 i 8 godina. Ostatak vremenske serije (tj. razlika između originalne i uglačane serije) predstavlja stacionarnu stohastičku komponentu sa izraženom autokorelacijom (Stojković i sar. 2013). Ova komponenta se modelira linearnim stohastičkim modelima tipa ARMA (videti npr. Tošić i sar. 2003).

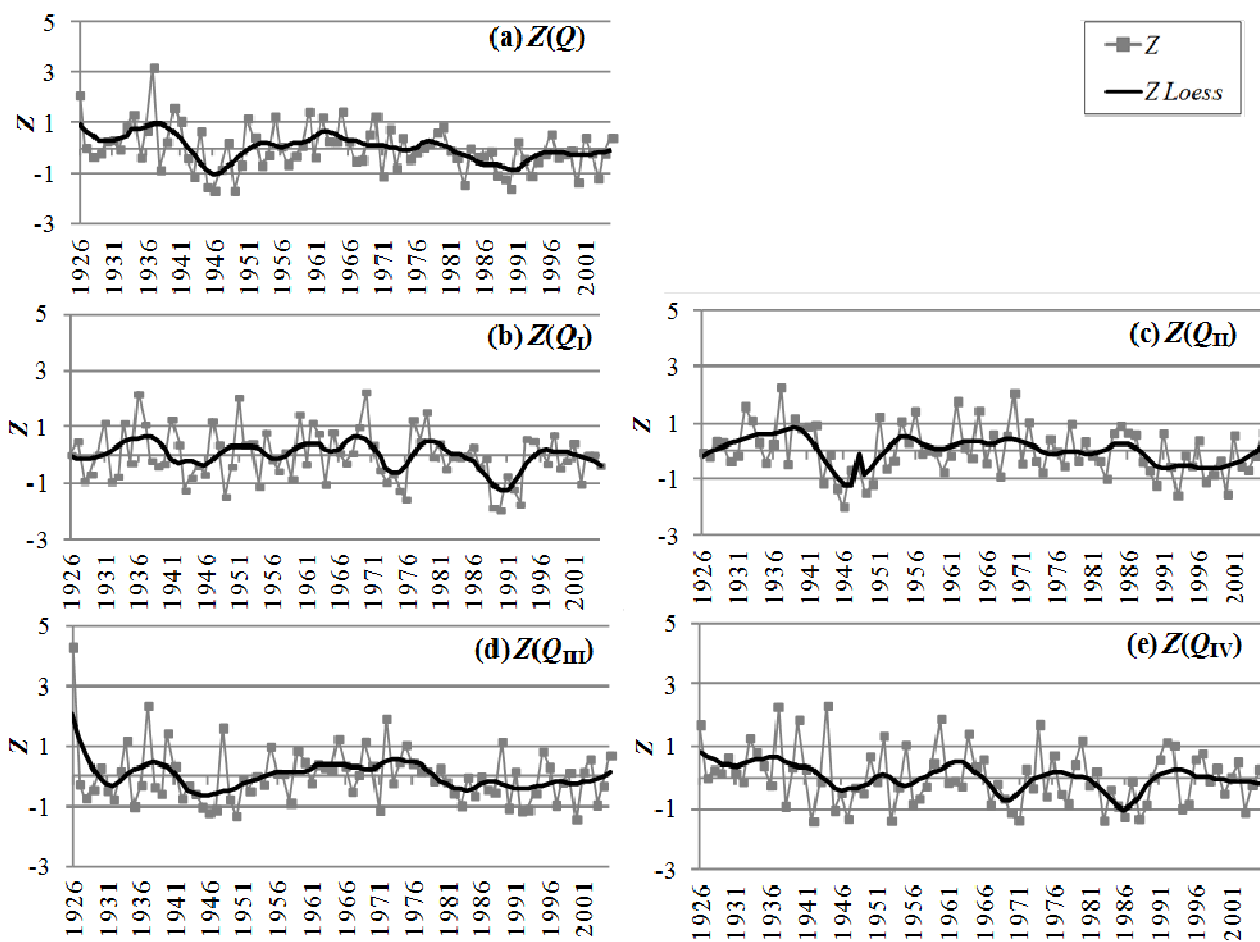
Trend srednjih sezonskih i godišnjih proticaja je ocenjen korišćenjem Mann-Kendall testa bez uključivanja efekta serijske korelacije prilikom određivanja varijanse statistike S po jednačini (3) i sa uključivanjem ovog efekta korišćenjem korekcionog faktora CF_2 po jednačini (4). U godišnjim i sezonskim serijama proticaja na reci Savi je registrovana značajna autokorelacija pri čemu autokorelaciona funkcija pokazuje oscilatorno ponašanje na manjim i većim pomacima. Iz navedenog razloga za detekciju trenda u godišnjim i sezonskim proticajima merodavno je $z_{s,corr}$. U tabeli 1 prikazani su rezultati testiranja trenda za sezonske i godišnje proticaje.

Tabela 1. Trend standardizovanih godišnjih i sezonskih proticaja na reci Savi: Mann-Kendall test statistika z_s i $z_{s,corr}$

Sezona	z_s	$z_{s,corr}$
Godina	2,039	1,855
Zima	0,935	0,825
Proleće	0,724	1,572
Leto	0,253	0,269
Jesen	1,433	1,431

Tabela 2. Trend standardizovanih godišnjih i sezonskih proticaja u slivu Dunava: Mann-Kendall test statistika z_s i $z_{s,corr}$

reka / stanica	god/sezona	z_s	$z_{s,corr}$
r. Dunav st. Oršava	Godina	0,264	0,223
	Zima	-0,417	-0,369
	Proleće	0,761	0,712
	Leto	0,445	0,403
	Jesen	-0,376	-0,417
r. Tisa st. Senta	Godina	-1,418	-1,125
	Zima	-2,351	-2,078
	Proleće	-0,324	-0,272
	Leto	-0,685	-0,599
	Jesen	-1,009	-1,063
r. V. Morava st. Lj. Most	Godina	0,457	0,387
	Zima	0,841	0,762
	Proleće	0,649	0,740
	Leto	-0,597	-0,628
	Jesen	-0,501	-0,486
r. Lim st. Prijepolje	Godina	1,550	1,315
	Zima	1,153	1,012
	Proleće	0,821	0,749
	Leto	1,890	1,936
	Jesen	0,585	0,689

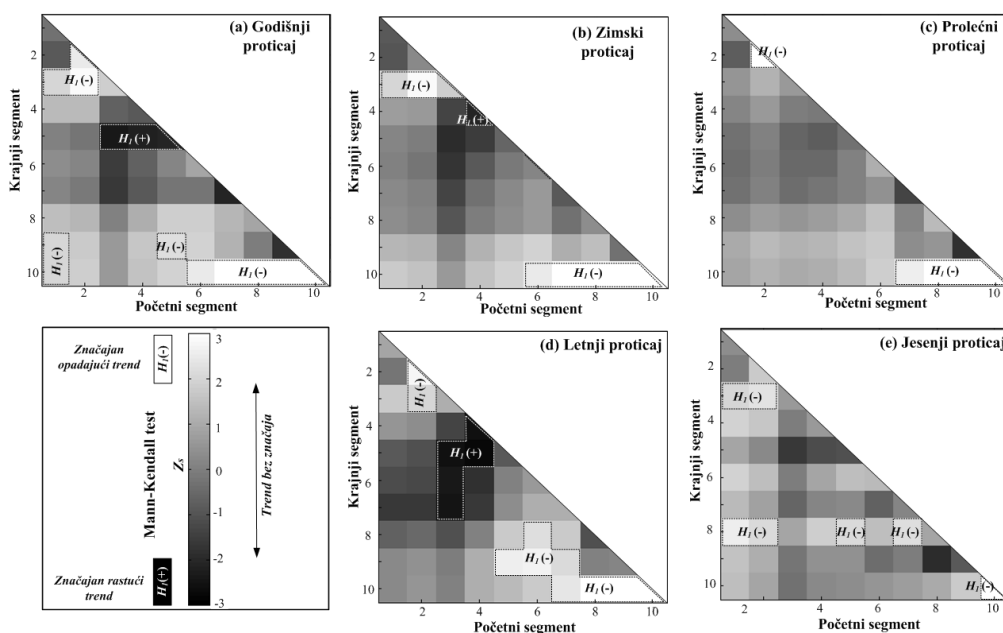


Slika 2. Standardizovane serije Z i uglaćane serije Z_{Loess} srednjih godišnjih i sezonskih proticaja na reci Savi: (a) godišnji proticaj $Z(Q)$, (b) zimski proticaj $Z(Q_I)$, (c) prolećni proticaj $Z(Q_{II})$, (d) letnji proticaj $Z(Q_{III})$ i (e) jesenji proticaj $Z(Q_{IV})$.

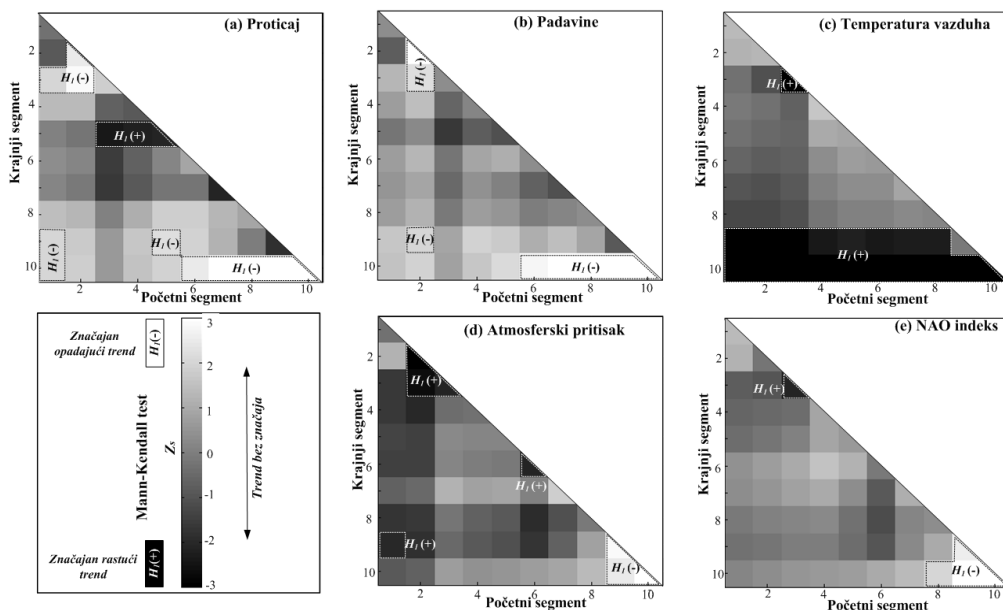
Rezultati u tabeli 1 pokazuju da serija godišnjih proticaja sadrži značajan trend na pragu značajnosti 5%. Kada se uzme u obzir serijska korelacija, trend godišnjih proticaja nije značajan na pragu značajnosti 5%. Svi sezonski proticaji pokazuju opadajući trend koji nije značajan na datom pragu značajnosti.

Da bi se utvrdilo da li su rezultati ispitivanja trenda na reci Savi u skladu sa dugoročnim promenama godišnjih i sezonskih proticaja u širem regionu, ispitani su i trendovi na Limu, Velikoj Moravi i Dunavu. Rezultati Mann-Kendall testa na navedenim rekama tokom godine i sezona prikazani su u tabeli 2. Rezultati pokazuju da su trendovi u godišnjim proticajima na stanici Oršava, Ljubičevski Most i Prijepolje opadajući, mada nisu značajni na pragu značajnosti 5%. Najintenzivniji opadajući trend godišnjih proticaja je utvrđen na reci Lim koja je

deo sliva Save. Na stanici Oršava je dobijen blagi opadajući trend, a razlog se nalazi u činjenici da Sava, kao glavna pritoka Dunava, poseduje izražen opadajući trend dok reka Tisa i uzvodni deo Dunava na stanicama Beč i Nađmaroš poseduju manje ili veće rastuće trendove (Stojković i sar., 2012). Sezonski proticaji poseduju trendove po generalnom obrascu: tokom leta i jeseni trendovi su opadajući, tokom zime i proleća trendovi su promenljivi ali obično rastući. Nasuprot tome, na reci Tisi trendovi su opadajući tokom zime i proleća dok su rastući tokom leta i jeseni. Ovi rezultati su u skladu sa rezultatima drugih studija prema kojima su trendovi godišnjih proticaja u jugoistočnoj Evropi opadajući (Pekarova i sar., 2003; Labat, 2006; Stahl i sar., 2010), a da su najizraženiji u slivu Save što je pokazano na stanicama Zagreb i Sremska Mitrovica, kao i na stanici Prijepolje na slivu koja pripada Savskom slivu.



Slika 3. Multi-vremenska Mann-Kendall statistika z_s za reku Savu: (a) godišnji proticaj $Z(Q)$, (b) zimski proticaj $Z(Q_I)$, (c) prolećni proticaj $Z(Q_{II})$, (d) letnji proticaj $Z(Q_{III})$ i (e) jesenji proticaj $Z(Q_{IV})$



Slika 4. Multi-vremenska Mann-Kendall statistika z_s za hidrometeorološke parametre: (a) godišnji proticaj, (b) suma godišnjih padavina, (c) srednji godišnji atmosferski pritisak, (d) srednja godišnja temperatura vazduha i (e) srednje godišnji indeks NAO

U primeni alternativnog multi-vremenskog pristupa koji koristi podserije sa različitim počecima i dužinama, ukupni vremenski interval standardizovanih proticaja na reci Savi od 1926. do 2005. godine podeljen je na

deset segmenata od kojih svaki segment ima dužinu od 8 godina. Segmenti se kombinuju u podserije prema slici 1. Na slici 3 prikazani su rezultati multi-vremenske analize trenda pomoću testa Mann-Kendall; na ovoj

slici nijanse sive boje predstavljaju vrednosti kontrolne statistike z_s za podserije koje počinju od segmenta naznačenog na apscisi i završavaju se sa segmentom naznačenom na ordinati. Zbog male dužine pojedinih podserija, u ovom pristupu nije uzet u obzir efekat serijske korelacije na varijansu Mann-Kendallove statistike S .

Grafička prezentacija statistike z_s na slici 3 za različite podserije ukazuje na postojanje periodičnog ponašanja trenda. Značajni trendovi u srednjim sezonskim i godišnjim proticajima prikazani su na slici 3, tako što su uokvirene podserije za koje je prihvaćena hipoteza H_1 da postoji značajan trend na pragu značajnosti 5%. Značajan rastući trend godišnjih i sezonskih proticaja je detektovan na središnjim segmentima vremenske serije, dok je na krajnjim segmentima registrovan opadajući trend.

Multi-vremenska analiza trenda je primenjena i na meteorološke vremenske serije na stanicama Ljubljana kako bi se ocenio uticaj ovih parametara na oticaj sa sliva reke Save i proverilo šta je glavni pokretač pojave trenda u oticaju. Sume godišnjih padavina, srednje godišnje temperature vazduha, srednji godišnji atmosferski pritisak i NAO indeks za vreme 1926-2005 korišćeni su za analizu trenda čiji su rezultati prikazani na slici 4.

Sa slike 4 se uočava da se znak trenda godišnjih proticaja (4a) poklapa sa znakom trenda suma godišnjih padavina (4b). Ova pojava je naročito uočljiva za podseriju na poslednjem segmentu koja ima izražene opadajuće trendove. Trend godišnje temperature vazduha pokazuje suprotnu tendenciju u odnosu na padavine i proticaje (4c). Izražen rastući trend temperatura može da se uoči u svim podserijama koje uključuju poslednja dva segmenta tj. period 1990-2005. Multi-vremenski trendovi atmosferskog pritiska (4d) i NAO indeksa (4e) međusobno koincidiraju. Razlog se nalazi u činjenici da NAO indeks predstavlja izvedenu veličinu iz atmosferskog pritiska između severnog i južnog dela severne hemisfere koji utiče na pravac, frekvenciju i lokaciju kišnih oblaka u atmosferi iznad Evrope.

5. DISKUSIJA

Trend srednjih godišnjih proticaja je istraživan u mnogim studijama, ali metodologija koja se primenjuje može da ima značajan uticaj na donošenje zaključaka. Rezultati multi-vremenskog pristupa u analizi trenda u godišnjim protocima na Savi demonstriraju da znak i

nagib trenda zavise od dužine vremenske serije i pozicije podserije u odnosu na celu seriju. Pored toga, pokazano je da serije proticaja na stanicama Zagreb i Sremska Mitrovica mogu dovesti do različitog zaključka ukoliko se analiza trenda sprovede sa efektom serijske korelacije i bez uključenja ovog efekta.

Rezultati multi-vremenske analize pokazuju da su trendovi u oticaju u skladu sa trendovima relevantnim meteoroloških veličina. Mnoge studije se pokazale da varijabilnost rečnog oticaja predstavlja rezultat atmosferske cirkulacije koje utiče na raspodelu padavina nad Zemljom (Hurrell 1995; Rodriguez-Puebla i sar. 1998; Rambu i sar. 2002; Danilovich i sar. 2007; Bouwer i sar. 2008). Ovaj fenomen uzrokuje smanjenje padavina i srednjih godišnjih oticaja u južnoj Evropi, što se ogleđa i u opadajućim trendovima reke Save naročito u poslednjoj dekadi. Ovi rezultati su u skladu sa registrovanim trendovima u južnoj i istočnoj Evropi (Stahl i sar. 2010). Stahl i sar. (2010) su utvrdili da centralna i severna Evropa daje suprotne trendove godišnjih proticaja u odnosu na južnu Evropu gde su registrovali opadajuće trendove.

Dugogodišnja periodičnost meteoroloških parametara predstavlja bitan faktor koji vodi ka varijabilnosti godišnjih proticaja i utiče na trend. Zhang i sar. (2007) tvrde da na raspodelu padavina ne može imati uticaj samo atmosferska cirkulacija, već smatraju da je antropogeni faktor u vidu povećanja globalne temperature doveo do povećanja sume godišnjih padavina na severnoj hemisferi kao i do smanjenja padavina u tropskim regijama. Labat i sar. (2004) su pronašli vezu između globalnih temperatura vazduha i oticaja tako da povećanje temperature za 1°C vodi ka povećanju globalnih oticaja za 4%.

U slivu reke Save opadajući trendovi godišnjih proticaja su praćeni istovetnim trendovima suma godišnjih padavina i rastućim trendovima temperatura vazduha. Ova tendencija je naročito izražena u poslednjoj dekadi kada su identifikovani značajni opadajući trendovi proticaja. Rezultati regionalnih klimatskih modela upućuju da se očekuje dalje opadanje suma godišnjih padavina u južnoj Evropi (ICPDR 2012). Za teritoriju Srbije postoje rezultati EBU-POM klimatskog modela sa A1B i A2 scenarijima gasova staklene bašte koji upućuju da se do 2100. godine očekuje smanjenje suma godišnjih padavina za 13-16 mm i povećanje temperatura vazduha za 2-4°C (Djurdjević and Rajković, 2010). Na bazi ocene trenda i projekcija padavina i temperatura vazdu-

ha, na reci Savi možemo očekivati opadajuće trendove proticaja u budućnosti. Pored toga, na bazi utvrđene periodičnosti godišnjih proticaja može se očekivati smena vlažnih i sušnih perioda u slivu u budućnosti (Stojković i sar., 2014b).

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je analiza varijabilnosti proticaja na reci Savi. Analizirane su vremenske serije sezonskih i godišnjih proticaja za period 1926-2005. Ovom prilikom je analiziran trend vremenske serije i njena periodičnost. Kako bi se izbegao efekat prostorne zavisnosti hidroloških serija na različitim stanicama iste reke, analizirane su objedinjene serije dobijene osrednjavanjem standardizovanih vremenskih serija na pojedinim stanicama. Analiza trenda je sprovedena korišćenjem multi-vremenskog pristupa na bazi neparametarskog Mann-Kendall testa. Objedinjene serije sezonskih i godišnjih proticaja su uglačane metodom LOESS kako bi se izolovala dugogodišnja periodična komponenta.

Pokazano je da deterministička komponenta koja se sastoji iz trenda i dugoročne periodične komponente objašnjava 28,3–37,8% ukupne varijanse serije. Trend sezonskih i godišnjih proticaja je opadajući, ali je značajan jedino trend godišnjih proticaja na pragu značajnosti 5%. Ukoliko se uzme u obzir serijska korelacija tada trend godišnjih proticaja nije značajan. Multi-vremenska analiza trenda je pokazala da na intenzitet i pravac trenda utiče dužina vremenske serije i položaj podserije unutar cele serije. Rezultati pokazuju da je trend godišnje vremenske serije za period 1926-1970 rastući, a da je najintenzivniji opadajući trend na krajnjim segmentima vremenske serije.

Veza između godišnjih proticaja i meteoroloških parametra utvrđena je korišćenjem meteoroloških serija na stanici Ljubljana. Usporedna analiza trenda korišćenjem multivremenskog pristupa je pokazala da postoji značajan opadajući trend padavina i rastući trend temperatura vazduha. U isto vreme, trend godišnjih proticaja je opadajući.

Ocena trenda u hidrološkim serijama je bitna za planiranje u vodoprivredi. Na osnovu trenda se donose zaključci o budućim tendencijama hidrološke serije. Dugogodišnja periodičnost hidrometeoroloških serija, koja diktira smenu vlažnih i sušnih perioda, se retko koristi kao sredstvo za određivanje dugoročnih tendencija.

Važnost dugoročnih promena na reci Savi je ilustrovana procentom varijanse osmotrene serije od 28,3 do 37,8% koji je obašnjen uglačanom serijom. Ako bi se trend i periodična komponenta prikazale kao funkcija vremena, mogle bi se ekstrapolirati u budućnost. Na osnovu ekstrapolovane determinističke komponente mogu se pripremati operativni planovi i strategije u vodoprivredi u cilju adaptacija na klimatske promene.

ZAHVALNOST

Istraživanje u ovom radu sprovedeno je uz pomoć Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja republike Srbije u okviru projekta "Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije TR 37005".

LITERATURA

- [1] Bouwer LM, Vermaat JE, Aerts JCJH: Regional sensitivities of mean and peak river discharge to climate variability in Europe, *Journal of Geophysical Research* 113: D19103. 2008
- [2] Bower D, Hannah DM, McGregor GR: Techniques for assessing the climatic sensitivity of river flow regimes. *Hydrol. Process.* 18 (13): 2515–2543. 2004
- [3] Danilovich I, Wrzesinski D, Nekrasova L: Impact of the North Atlantic Oscillation on river runoff in the Belarus part of the Baltic Sea basin. *Nordic Hydrology* 38 (4-5): 413-423. 2007
- [4] Busuladžić H: Analiza strukture vremenske serije potrošnje vode u Sarajevskom vodovodnom sistemu. *Vodoprivreda.* 39 (4): 173-179. 2007.
- [5] ICPDR: Danube Study – Climate Change Adaptation, Final Report. International Commission for the Protection of the Danube River, Vienna, Austria. 2012
- [6] Djurdjević V, Rajković B: Development of the EBU-POM coupled regional climate model and results from climate change experiments. In: Mihajlovic T. D. and Lalic B (eds.) *Advances in Environmental Modeling and Measurements*, Nova Publishers, Hauppauge NY, ISBN 978-1-60876-599-7, pp. 23-32. 2010
- [7] Douglas EM, Vogel RM, Kroll CN: Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology* 240(1-2): 90-105. 2000

- [8] Gudmundsson L, Tallaksen LM, Stahl K, and Fleig AK: Low-frequency variability of European runoff. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15 (9): 2853–2869. 2011
- [9] Hamed KH, Rao AR, A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology* 204 (1-4): 182-196. 1998
- [10] Hannaford J, Buys G, Stahl K, Tallaksen LM: The influence of decadal-scale variability on trends in long European streamflow records. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17 (7): 2717–2733. 2013
- [11] Hurrell JW: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* 269 (5224): 676–679. 1995
- [12] IPCC: Fifth Assessment Report (AR5), Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva 2, Switzerland. 2013
- [13] Kendall MG: Rank Correlation Methods. 3rd ed. Hafner Publishing Company, New York. 1962
- [14] Khaliq MN, Ouarda TBMJ, Gachon P, Sushama L, St-Hilaire A: Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. *Journal of Hydrology* 368 (1-4): 117–130. 2009
- [15] Krasovskaia I: Sensitivity of the stability of river flow regimes to small fluctuations in temperature, *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 41(2): 251-264. 1996
- [16] Krasovskaia I, Sælthun NR: Sensitivity of the stability of Scandinavian river flow regimes to a predicted temperature rise. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques* 42(5): 693-711. 1997
- [17] Labat D: Oscillations in land surface hydrological cycle. *Earth and Planetary Science Letters* 242 (1-2): 143–154. 2006
- [18] Labat D, Godderis Y, Probst JL, Guyot JL: Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources*, 27(6): 631-642. 2004
- [19] McCabe GJ, Wolock DM: A step increase in streamflow in the conterminous United States. *Geophys. Res. Lett.* 29(24): 2185. 2002
- [20] Pekarova P, Miklanek P, Pekar J: Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th–20th centuries. *Journal of Hydrology* 274 (1-4): 62-79. 2003
- [21] Petrow T, Merz B: Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. *Journal of Hydrology* 371 (1-4): 129–141. 2009
- [22] Radić Z, Mihailović V: Teorijske osnove i proširenje oblasti primene strukturne analize dnevnih hidroloških serija. *Vodoprivreda*. 38 (1-3): 3-22. 2006
- [23] Renner M, Bernhofer C: Long term variability of the annual hydrological regime and sensitivity to temperature phase shifts in Saxony/Germany, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(6): 1819–1833. 2011
- [24] Rimbu N, Boroneanț C, Buta C, Dima M: Decadal variability of the Danube river flow in the lower basin and its relation with the North Atlantic Oscillation, *Int. J. Climatol.* 22 (10): 1169–1179. 2002
- [25] Rodriguez-Puebla C, Encinas AH, Nieto S, Garmendia J: Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.* 18 (3): 299–316. 1998
- [26] Rohde R, Muller R, Jacobsen R, Perlmutter S, Rosenfeld A, Wurtele J, Curry J, Wickham C, Mosher S Berkeley Earth Temperature Averaging Process. *Geoinfor. Geostat: An Overview* 1(2): 1-13. 2013
- [27] Schmocker-Fackel P, Naef F: More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850. *J. Hydrol.* 381 (1-2): 1–8. 2010
- [28] Smith TM, Arkin PA, Ren L, Shen S: Improved reconstruction of global precipitation since 1900. *J. Atmospheric and Oceanic Technology* 29 (10): 1505-1517. 2012
- [29] Stahl K, Hisdal H, Hannaford J, Tallaksen LM, Van Lanen HAJ, Sauquet E, Demuth S, Fendekova M, Jodar J: Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. 14 (12): 2367-2382. 2010
- [30] Stojković M, Prohaska S, Plavšić J: Stohastička analiza serija godišnjih proticaja na stanicama na Dunavu, Proc. 16th Conf. of the Serbian Association for Hydraulic Research and Serbian

- Association for Hydrology, ISBN 978-86-7518-159-0, pp. 527-543. 2012
- [31] Stojković M, Prohaska S, Plavšić J: Stochastic modelling of time series of mean annual discharge in the 21st century: Case study of the River Ibar. Proc. Int. Conf. Climate Change Impacts on Water Resources, Belgrade, Serbia, ISBN 978-86-82565-41-3, pp. 55-63. 2013
- [32] Stojković, M., Ilić, A., Prohaska, S., Plavšić, J: Multi-Temporal Analysis of Mean Annual and Seasonal Stream Flow Trends, Including Periodicity and Multiple Non-Linear Regression. Water Resources Management. 28, 12, 4319-7335. 2014a
- [33] Stojković M., Prohaska S., Plavšić, J: Internal Stochastic Structure of Annual Discharge Time Series of Serbia's Large Rivers, Water Research and Management, 4(2). 3-13. 2014b
- [34] Tošić I, Mališić J, Unkašević M: Modeliranje nizova mesečnih suma padavina metodom vremenskih serija. Vodoprivreda 35 (5-6): 313-324. 2003
- [35] Wild M, Grieser J, Schär C: Combined surface solar brightening and increasing greenhouse effect support recent intensification of the global land-based hydrological cycle. Geophysical Research Letters 35 (17): L17706. 2008
- [36] Yue S, Wang CY: The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. Water Res. Manage. 18 (3): 201-218. 2004
- [37] Zhang X, Zwiers FW, Hegerl GC, Lambert FH, Gillett NP, Solomon S, Stott PA, Nozawa T: Detection of human influence on twentieth century precipitation trends. Nature 448 (7152): 461-465. 2007

LONG-TERM CHANGES OF ANNUAL AND SEASONAL FLOWS: A CASE OF THE SAVA RIVER

by

Milan STOJKOVIĆ

Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources, Belgrade, Serbia
Jasna PLAVŠIĆ

University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Serbia

Stevan PROHASKA

Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources, Belgrade, Serbia

Summary

This paper investigates the long-term changes in the hydrological time series. For this purpose, we use the trend analysis. The trend analysis is performed by using the standard Mann-Kendall trend test and by using the multi-temporal approach. The analysis is applied to the standardized and averaged time series of seasonal and annual flow of the river Sava at the stations Zagreb and Sremska Mitrovica for period from 1926 to 2005. It is concluded that the trend of seasonal and annual flow series of the Sava River are downward. The trends of annual flows in the region (Danube, Velika Morava,

Lim) confirm this general pattern according to which the trends of annual flows in south-eastern Europe are downward. The multi-temporal analysis shows that the trend direction and intensity in the sub-series change with the long-term periodicity. The changes in trend direction and intensity depend on the length of the sub-series and the position of the sub-series within the whole time series.

Key words: Mann-Kendall test, multi-temporal trend approach, the river Sava, South-Eastern Europe

Redigovano 18.11.2014.