

Primljen / Received: 31.12.2013.

Ispravljen / Corrected: 21.6.2014.

Prihvaćen / Accepted: 15.7.2014.

Dostupno online / Available online: 1.8.2014.

# Trendovi indikatora hidroloških promjena

## Autori:



**Darko Barbalić**, dipl.ing.građ.

Hrvatske vode

Zavod za vodno gospodarstvo

[darkob@voda.hr](mailto:darkob@voda.hr)



Prof.dr.sc. **Neven Kuspilić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

[kuspa@grad.hr](mailto:kuspa@grad.hr)

Prethodno priopćenje

**Darko Barbalić, Neven Kuspilić**

## Trendovi indikatora hidroloških promjena

U radu se opisuje provedena analiza indikatora hidroloških promjena na slivu Dunava u Hrvatskoj primjenom neparametarskih metoda, i to Theil-Senovog procjenitelja veličine trenda te Mann-Kendallovog testa značajnosti trenda. Analizom su otkriveni zabrinjavajući trendovi smanjenja svibanjskih i lipanjskih protoka, koji na većem dijelu sliva znače produženje sezone malih voda što može uzrokovati značajne negativne posljedice kako za ekosustave tako i za korištenje voda. Vidljivo je da je nužno povećati otpornost i adaptibilnost upravljanja vodama na promjene ove vrste kako bi se što djelotvornije uspjele zadovoljiti potrebe korisnika vode.

### Ključne riječi:

sliv rijeke Dunav, indikatori hidroloških promjena, analiza trenda, Mann-Kendallov test značajnosti trenda

Preliminary note

**Darko Barbalić, Neven Kuspilić**

## Trends of Indicators of Hydrological Alterations

For Indicators of Hydrological Alterations, nonparametric analysis of trend magnitude using Theil-Sen method and Mann-Kendall trend significance test has been performed in the Danube river basin in Croatia. Analysis have shown disturbing decreasing of May and June monthly flows resulting in extended low water season with possible negative impact on ecosystems and water usage. It is obvious that increase of water management resilience and adaptability is needed to fulfil more efficiently requirements of water users.

### Key words:

Danube river basin, indicators of hydrological changes, trend analysis, Mann-Kendall test, trend significance

Vorherige Mitteilung

**Darko Barbalić, Neven Kuspilić**

## Trends der Indikatoren hydrologischer Schwankungen

In dieser Arbeit sind Analysen der Indikatoren hydrologischer Schwankungen des Donaubeckens in Kroatien durchgeführt. Dazu sind nichtparametrische Methoden, insbesondere die Trendstärkeschätzung nach Theil-Sen und der Trendtest nach Mann-Kendall, angewandt. Unter anderem sind beunruhigende Trends eines reduzierten Durchflusses im Mai und Juni festgestellt, die zu einer verlängerten Tiefwassersaison führen, und somit bedeutende Folgen für das Ökosystem und die Wassernutzung haben können. Daher muss eine größere Widerstands- und Anpassungsfähigkeit im Wassermanagement vorgesehen werden, um trotz Schwankungen dieser Art, die Ansprüche der Wasserversorgung und des Ökosystems so effektiv wie möglich zu erfüllen.

### Schlüsselwörter:

Donaubecken, Indikatoren hydrologischer Schwankungen, Trendanalyse, Mann-Kendall-Trendtest

## 1. Uvod

Već se godinama vode rasprave širom svijeta, pa tako i u Hrvatskoj, o mogućim značajnim promjenama vodnog režima kao posljedice klimatskih promjena, promjena korištenja zemljišta na slivu, prekomjernog korištenja voda i slično. Te su rasprave naročito učestale nakon niza sušnih godina koje su pratili ekstremni poplavni događaji od 2010. naovamo. Analize promjena komponenata vodnog režima širom svijeta intenzivno se provode već duže vrijeme i gotovo ih je nemoguće izbrojati. Ipak, kao karakteristične navode se neke kojima su pokrivena veća područja, uglavnom Europe i Sjeverne Amerike, [1-8]. U Hrvatskoj je pak, do sada, publiciran relativno mali broj analiza promjena vodnog režima, a i ta istraživanja su uglavnom bila prostorno vrlo ograničena, npr. [9, 10, 11]. U sklopu šireg istraživanja karakteristika "indikatora hidroloških promjena", [12, 13] provedena je i analiza njihovih trendova na području sliva rijeke Dunav u Hrvatskoj u zadnjih tridesetak godina.

Hidrološke promjene, bez obzira na razlog njihova nastanka, utječu i mijenjaju ekološko stanje voda čije je očuvanje i zaštita jedna od prioritarnih zadaća upravljanja vodama. Identifikacija značenja pojedinih hidroloških značajki za opstojnost i dobro stanje ekosustava s jedne strane te utvrđivanje mogućih trendova njihovih promjena s druge strane, pridonosi točnijem planiranju i učinkovitijoj održivoj zaštiti voda. U ovom trenutku još uvijek nisu potpuno jasni odnosi između određene hidrološke karakteristike i bioloških pokazatelja kojima se opisuje ekološko stanje voda, iako se može reći da u većini slučajeva s povećanjem hidrološke promjene u odnosu na prirodno stanje raste i rizik za očuvanjem dobrog ekološkog stanja [14]. Sve su to razlozi zašto se analiza razvija u dva koraka:

- utvrđivanjem je li pokazatelj hidrološkog režima izrazit
  - karakterističan - naglašen na prostoru rasprostiranja određene biološke zajednice, kada se pretpostavlja da održavanje staništa u dobrom stanju značajno ovisi o nepromjenljivosti takve hidrološke karakteristike, ili je riječ o pokazatelju hidrološkog režima koji je i prirodno vrlo promjenljiv na prostoru staništa kada su se i biološke zajednice koje na tom prostoru žive adaptirale i manje su osjetljive na promjene;
- utvrđivanjem da li promjene pojedinih pokazatelja hidrološkog režima upućuju (dugoročno) na to da se mogu očekivati takve promjene koje mogu prouzročiti trajno narušavanje ekološkog stanja voda i koje su to mjere kojima bi se negativni utjecaj hidroloških promjena na ekološko stanje mogao minimizirati. Treba naglasiti da je određivanje pouzdane veze između stupnja hidroloških promjena i njihovog utjecaja na ekosustave vrlo kompleksna i multidisciplinarna aktivnost za koju je potrebno provesti niz istraživanja, pa ovaj drugi korak nadmašuje okvire ovog rada. Ipak rezultati ovog rada mogu biti jedna od podloga za takva istraživanja.

Dakle, glavna je namjena ovih indikatora i analiza identificirati značajne elemente i promjene hidrološkog režima koji su bitni sa stajališta održanja i zaštite ekološkog stanja voda. Međutim, pojedini indikatori se primjenjuju i u standardnoj hidrološkoj praksi kao deskriptori vodnog režima za potrebe analiza mogućnosti i utjecaja korištenja voda i analizu potreba i aktivnosti vezanih uz zaštitu od njenog štetnog djelovanja, što čini i rezultate ovog rada interesantnima sa stajališta većine aspekata vodnoga gospodarstva.

## 2. Podaci i metode

"Indikatore hidroloških promjena", [12, 13], tablica 1., čini grupa od 33 parametra za koja se smatra da vrlo dobro opisuju karakteristike vodnog režima koje najviše utječu na ekološko stanje voda.

Tablica 1. Indikatori hidromorfoloških promjena

INDIKATORI HIDROLOŠKIH PROMJENA [12, 13]	
GRUPA INDIKATORA	PARAMETAR
Mjesečne hidrološke veličine	1.0 srednji godišnji protok*
	1.1 srednji mjesečni protok, siječanj
	1.2 srednji mjesečni protok, veljača
	....
	1.11 srednji mjesečni protok, studeni
	1.12 srednji mjesečni protok, prosinac
Veličina i trajanje godišnjih ekstrema	2.1 protok malovodnog perioda trajanja 1 dan
	2.2 protok velikovodnog perioda trajanja 1 dan
	2.3 protok malovodnog perioda trajanja 3 dana
	2.4 protok velikovodnog perioda trajanja 3 dana
	2.5 protok malovodnog perioda trajanja 7 dana
	2.6 protok velikovodnog perioda trajanja 7 dana
	2.7 protok malovodnog perioda trajanja 30 dana
	2.8 protok velikovodnog perioda trajanja 30 dana
	2.9 protok malovodnog perioda trajanja 90 dana
	2.10 protok velikovodnog perioda trajanja 90 dana
Vremenski raspored ekstrema	3.1 datum godišnjeg maksimuma
	3.2 datum godišnjeg minimuma
Učestalost i trajanje visokih i niskih pulseva**	4.1 godišnji broj visokih pulseva
	4.2 godišnji broj niskih pulseva
	4.3 srednje trajanje visokih pulseva u godini (dana)
	4.4 srednje trajanje niskih pulseva u godini (dana)
Brzina i čestina promjene stanja	5.1 srednja vrijednost svih pozitivnih razlika između dnevnih vrijednosti protoka
	5.2 srednja vrijednost svih negativnih razlika između dnevnih vrijednosti protoka
	5.3 broj hidroloških promjena***

\* U originalnoj metodologiji srednji se godišnji protok ne ubraja u indikatore hidroloških promjena, ali je uvršten kao jedan od najuobičajenijih općih hidroloških deskriptora

\*\* Niski pulsevi su definirani kao periodi kada protok padne ispod protoka trajanja 75 %, dok su visoki pulsevi periodi kada protok poraste iznad protoka trajanja 25 %

\*\*\* Ovim indikatorom su zamijenjena dva indikatora iz originalne metodologije (broj opadajućih i broj rastućih dijelova hidrograma)

Zajedno s metodom "Range of Variability Approach" postali su jedna od najčešće primjenjivanih hidroloških metoda za ocjenu promjena vodnog režima koje mogu značajnije utjecati na ekosustave [15].

Grupe indikatora 1 i 2 predstavljaju pokazatelje uobičajene u hidrološkoj praksi (srednji mjesečni protoci i srednji protoci malovodnih i visokovodnih perioda različitih trajanja) pa nisu detaljnije obrazloženi, dok su za grupe indikatora 3, 4 i 5 prikazani primjeri na hidrogramu stanice Županja na rijeci Savi za 1984. godinu. Krivulja trajanja potrebna za definiranje pragova visokih i niskih pulseva (grupa indikatora 4) izračunana je na osnovi tridesetogodišnjeg razdoblja i to od 1980. do 2009. godine.

Zbog ograničenog prostora, u jednadžbama 1 do 12 korištena je Iversonova notacija prema kojoj:

$$[P] = \begin{cases} 1 & \text{za } P = \text{True} \\ 0 & \text{za } P \neq \text{True} \end{cases}$$

### Grupa indikatora 1: Mjesečne hidrološke veličine

Indikatori grupe 1 predstavljaju srednje mjesečne protoke i matematički se mogu formulirati na sljedeći način:

$$IHA_{1,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1)$$

gdje je:

- $IHA_{1,m}$  - indikator grupe 1, za mjesec  $m$  ( $m^3/s$ )
- $M$  - redni broj mjeseca u godini,  $1 \leq m \leq 12$
- $n$  - broj dana u mjesecu  $m$
- $Q_i$  - srednji dnevni protok ( $m^3/s$ )  $i$ -tog dana  $m$ -tog mjeseca

### Grupa indikatora 2: Veličina i trajanje godišnjih ekstrema

Indikatori grupe 2 predstavljaju srednje protoke malovodnih i velikovodnih perioda trajanja 1, 3, 7, 30 i 90 dana. Za malovodne indikatore ove grupe vrijedi:

$$IHA_{2,m} = \min \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=k}^{k+n-1} Q_i \right\} \quad \forall 1 \leq k \leq 365 - (n+1) \quad (2)$$

gdje je:

- $IHA_{2,m}$  - indikator grupe 2 za malovodne periode ( $m^3/s$ ),  $m \in \{1, 3, 5, 7, 9\}$
- $n$  - trajnost malovodnog perioda (dana),  $n \in \{1, 3, 7, 30, 90\}$
- $Q_i$  - srednji dnevni protok ( $m^3/s$ )  $i$ -tog dana godine

Za velikovodne indikatore ove grupe definicija je analogna:

$$IHA_{2,m} = \max \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=k}^{k+n-1} Q_i \right\} \quad \forall 1 \leq k \leq 365 - (n+1) \quad (3)$$

gdje je:

- $IHA_{2,m}$  - indikator grupe 2 za velikovodne periode ( $m^3/s$ ),  $m \in \{2, 4, 6, 8, 10\}$
- $n$  - trajnost velikovodnog perioda (dana),  $n \in \{1, 3, 7, 30, 90\}$
- $Q_i$  - srednji dnevni protok ( $m^3/s$ ),  $i$ -tog dana godine

### Grupa indikatora 3: Vremenski raspored ekstrema

Indikatori grupe 3 predstavljaju unutargodišnji redni broj dana pojave ekstrema pa se mogu matematički definirati na sljedeći način:

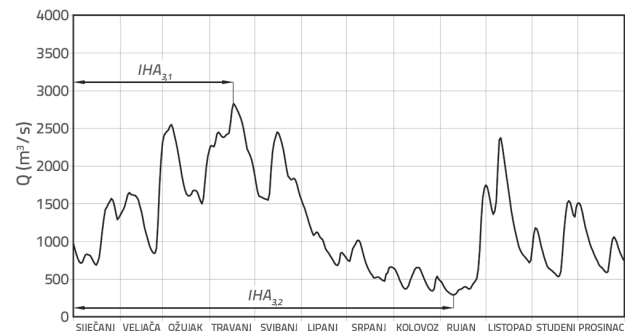
$$IHA_{3,1} = i [Q_i = Q_{\max}] \quad (4)$$

$$IHA_{3,2} = i [Q_i = Q_{\min}] \quad (5)$$

gdje su:

- $IHA_{3,1}$  i  $IHA_{3,2}$  - indikatori hidroloških promjena grupe 3
- $i$  - redni broj dana tijekom godine ( $1 \leq i \leq 365$ )
- $Q_i$  - srednji dnevni protok ( $m^3/s$ ),  $i$ -tog dana godine
- $Q_{\max}$  - maksimalni srednji dnevni protok zabilježen tijekom godine ( $m^3/s$ )
- $Q_{\min}$  - minimalni srednji dnevni protok zabilježen tijekom godine ( $m^3/s$ )

Na slici 1. dan je grafički prikaz  $IHA_{3,1}$  i  $IHA_{3,2}$ .



Slika 1. Hidrogram s grafički naznačenim vrijednostima indikatora  $IHA_{3,1}$  i  $IHA_{3,2}$  za 1984. godinu

### Grupa indikatora 4: Učestalost i trajanje visokih i niskih pulseva

Četiri indikatora ove grupe su definirana na sljedeći način:

$$IHA_{4,1} = \sum_{i=1}^{364} [Q_i \leq Q_{25\%} < Q_{i+1}] \quad (6)$$

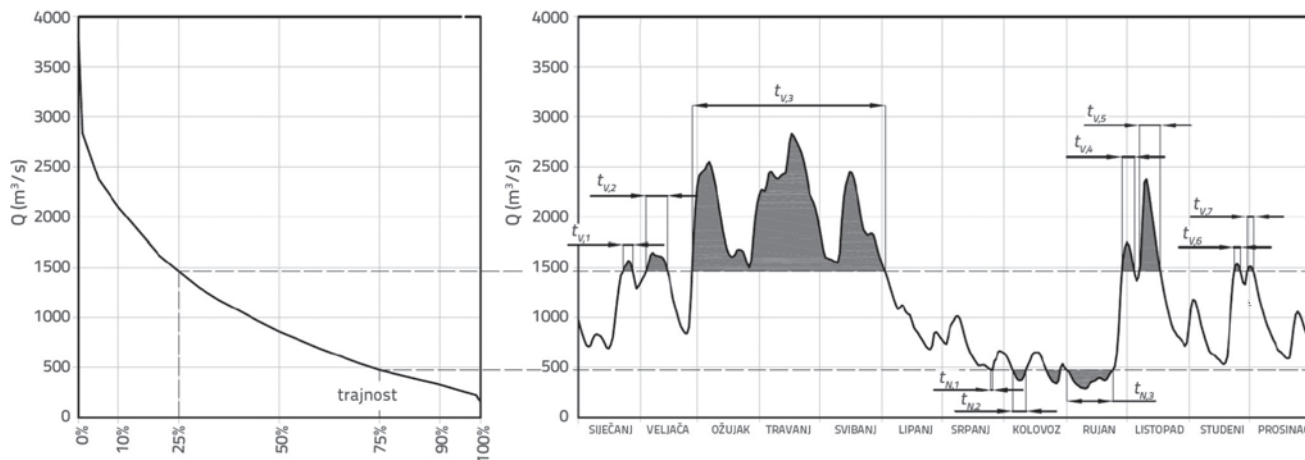
$$IHA_{4,2} = \sum_{i=1}^{364} [Q_i \geq Q_{75\%} > Q_{i+1}] \quad (7)$$

$$IHA_{4,3} = \frac{1}{IHA_{4,1}} \sum_{i=1}^{365} [Q_i > Q_{25\%}] \quad (8)$$

$$IHA_{4,4} = \frac{1}{IHA_{4,2}} \sum_{i=1}^{365} [Q_i < Q_{75\%}] \quad (9)$$

gdje su:

- $IHA_{4,1}$  i  $IHA_{4,2}$  - broj visokih i niskih pulseva
- $IHA_{4,3}$  i  $IHA_{4,4}$  - prosječno trajanje visokih i niskih pulseva (dana)
- $i$  - redni broj dana tijekom godine ( $1 \leq i \leq 365$ )
- $Q_i$  - srednji dnevni protok ( $m^3/s$ ),  $i$ -tog dana godine



Slika 2. Višegodišnja krivulja trajanja i hidrogram s grafički naznačenim visokim i niskim pulsevima za 1984. godinu

- $Q_{25\%}$  - protok trajnosti 25 % ( $m^3/s$ )
- $Q_{75\%}$  - protok trajnosti 75 % ( $m^3/s$ )

Na slici 2. je prikazano 7 visokih pulseva i 3 niska pulsa koji su zabilježeni tijekom 1984. godine s naznačenim trajnostima.

**Grupa indikatora 5: Brzina i čestina promjene stanja**

Tri indikatora ove grupe su definirana na sljedeći način:

$$IHA_{5,1} = \frac{\sum_{i=1}^{364} (Q_{i+1} - Q_i) [Q_i < Q_{i+1}]}{\sum_{i=1}^{364} [Q_i < Q_{i+1}]} \tag{10}$$

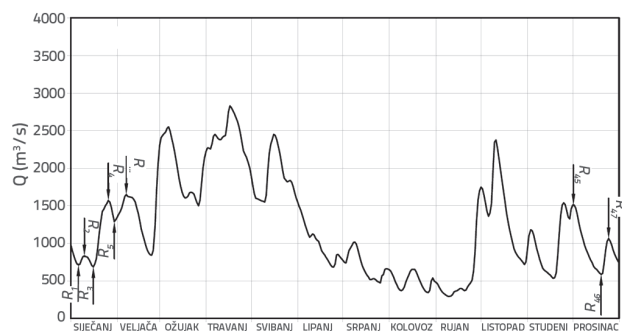
$$IHA_{5,2} = - \frac{\sum_{i=1}^{364} (Q_{i+1} - Q_i) [Q_i > Q_{i+1}]}{\sum_{i=1}^{364} [Q_i > Q_{i+1}]} \tag{11}$$

$$IHA_{5,3} = \sum_{i=2}^{364} [(Q_{i+1} - Q_i)(Q_i - Q_{i-1}) < 0] \tag{12}$$

gdje je:

- $IHA_{5,1}$ ,  $IHA_{5,2}$  - indikatori hidroloških i  $IHA_{5,3}$  promjena grupe 5 ( $m^3/s$ )
- $i$  - redni broj dana tijekom godine ( $1 \leq i \leq 365$ )
- $Q_i$  - srednji dnevni protok ( $m^3/s$ ),  $i$ -tog dana godine

Na slici 3. su prikazane hidrološke promjene ( $R_1$  do  $R_{16}$ ) zabilježene 1984. godine. Analizom su obuhvaćene hidrološke stanice na slivu rijeke Dunav uvrštene u hidrološku bazu podataka HIS 2000 Državnog hidrometeorološkog zavoda. Za obradu je odabrano recentno tridesetogodišnje razdoblje i to od 1980. do 2009. godine kako bi se stekao uvid u novije promjene te dio rezultata obrada iskoristio za potrebe Planova upravljanja vodnim područjima [16] koji imaju čvrsto propisanu šestogodišnju dinamiku pripreme.



Slika 3. Hidrološke promjene tijekom 1984. godine

S obzirom na to da pojedini indikatori opisuju hidrološke fenomene koji se javljaju na prijelazu iz jedne kalendarske godine u drugu, kako bi se izbjegle pogreške u analizi, početak računske godine je odabiran ovisno o indikatoru slično kako je to opisano u [17] za indikator 3.1.



Slika 4. Položaj vodomjernih postaja

Tablica 2. Popis vodomjernih postaja

1	DONJA DUBRAVA, DRAVA	29	KUPLJENOVO, KRAPINA	57	LAZINA BRANA, KUPČINA
2	BOTOVO, DRAVA	30	ZABOK STEPENICA, KRAPINICA	58	CRNI LUG, BELA VODA
3	NOVO VIRJE-SKELA, DRAVA	31	GUBAŠEVO 1, HRVATSKA	59	SMREČJE STEPENICA, GEROVČICA
4	TEREZINO POLJE, DRAVA	32	HRUŠEVEC, VUČELNICA	60	LOKVE, LOKVARKA
5	ŽELJEZNICA, BEDNJA	33	JAKOVLJE, DEDINA	61	MRZLE VODICE, MRZLICA
6	TUHOVEC, BEDNJA	34	DONJA BISTRA, BISTRA	62	PAVLOVAC, ČESMA
7	LUDBREG, BEDNJA	35	ZAGREB, VRAPČAK	63	NARTA, ČESMA
8	MURSKO SREDIŠĆE, MURA	36	KUPARI, KUPA	64	ČAZMA, ČESMA
9	GORIČAN, MURA	37	HRVATSKO, KUPA	65	VELIKO TROJSTVO, BJELOVATSKA
10	JENDRAŠIČEK, TRNAVA	38	LADEŠIĆ DRAGA, KUPA	66	BJELOVAR, BJELOVATSKA
11	MLAČINE, GLIBOKI POTOK	39	KAMANJE, KUPA	67	MARKOVAC, VELIKA RIJEKA
12	KOPRIVNICA, KOPRIVNICA	40	BRODARCI, KUPA	68	LONJICA MOST, LONJA
13	NOVIGRAD PODR., KOMARNICA	41	ZAMOST II, ČABRANKA	69	POPOVEC, KAŠINA
14	MIKLEUŠ, VOČINKA	42	IZVOR KUPICE, KUPICA	70	VLAHINIČKA, VLAHINIČKA
15	ČAČINCI, VOJLOVICA	43	BROD NA KUPI, KUPICA	71	GRAČENICA, GRAČENICA
16	ČAČINCI, KRAJINA	44	MORAVICE, DOBRA	72	KUTINSKE ČAIRE, KUTINA
17	PODSUSED ŽIČARA, SAVA	45	LUKE, DOBRA	73	KUTINA, KUTINA
17	SLUNJ UZVODNI, KORANA	46	TURKOVIĆI, GORNJA DOBRA	74	MUNIJE, ILOVA
18	ZAGREB, SAVA	47	LEŠĆE TOPLICE, DOBRA	75	RAŠENICA, ILOVA
19	JASENOVAC, SAVA	48	DONJE STATIVE, DOBRA	76	VELIKO VUKOVJE, ILOVA
20	ŽUPANJA, SAVA	49	GOMIRJE, RIBNJAK	77	BASTAJI, RIJEKA
21	ZELENJAK I, SUTLA	50	BRESTOVAC, VITUNJČICA	78	DARUVAR, TOPLICA
22	KORETIĆI, BREGANA	51	LUKETIĆI, KORANA	79	BADLJEVINA UZVODNO, BIJELA
23	BREGANA REMONT, BREGANA	52	VELJUN, KORANA	80	SUNJA, SUNJA
24	SVINJARIĆI, BREGANICA	53	VELEMERIĆ, KORANA	81	CERNIK, ŠUMETLICA
25	HAMOR, LIPOVAČKA GRADNA	54	TUŠILOVIĆ, RADONJA	82	POŽEGA, ORLJAVA
26	SAMOBOR, GRADNA	55	MRZLO POLJE, MREĀNICA	83	PLETERNICA MOST, ORLJAVA
27	PUŠĆA DONJA, PUŠĆA	56	STRMAC, KUPČINA	84	PLETERNICA, LONDĐA
28	ZLATAR BISTRICA, KRAPINA				

U analizu je uključen i značajan broj stanica na kojima je, najčešće uslijed rata, došlo do dužeg ili kraćeg prekida mjerenja uz uvjet da su se mogli formirati vremenski nizovi sa 25 ili više članova. Metode koje su odabrane za analizu trendova u ovom radu odlikuje visok stupanj robusnosti, pa su tako primjenjive i za nizove s prekidima. Radi toga prekinuti nizovi nisu nadopunjavani. Na osnovi postavljenih kriterija za daljnju analizu izdvojene su 84 vodomjerne stanice. Položaj tih vodomjernih stanica prikazan je na slici 4., a njihov je popis predočen u tablici 2.

Prilikom preliminarne analize rezultata uočeno je da je prijelaz na kontinuirano motrenje limnigrafima, koji se na velikom broju stanica dogodio u razmatranom razdoblju, nezanemarivo utjecao na izračun nekih od indikatora (ova pojava je opisana u npr. [18]). Kako bi se izbjegle moguće nehomogenosti uzrokovane ovim fenomenom, vremenske su serije dnevnih podataka za analizu nakon uvođenja limnigrafa formirane na osnovi razine vode izmjerene u 7 sati, a ne na osnovi srednje vrijednosti svih satnih protoka. Kako bi se bolje stekao uvid u promjene vodnog režima koje nisu

vezane na direktni antropogeni utjecaj neposredno uzvodno (hidrotehničke građevine i sustavi), osim analize za sve stanice, provedena je i dodatna analiza za skup "referentnih" stanica s uvjetno prirodnim režimom. Kao polazna osnova za podjelu stanica poslužile su prikupljene podloge (registar hidrotehničkih građevina i aktivnosti na vodama) te rezultati analiza za ocjenu značaja hidromorfoloških promjena provedenih u prvom Planu upravljanja vodnim područjima [16]. S obzirom na to da se pokazalo kako je zanemariv broj stanica na slivovima bez ikakvih hidromorfoloških promjena, konačni odabir je proveden na osnovi stručne prosudbe, vodeći računa da najveće hidrološke promjene uzrokuju akumulacije, retencije te veći sustavi obrane od poplava, dok se utjecaj nekih manjih pojedinačnih građevina u velikom broju slučajeva može zanemariti (iako one mogu narušiti dobro stanje voda iz drugih razloga). Pri tome se vodilo računa o smanjenju utjecaja građevina uzvodno od stanice s porastom međusliva, o kumulativnom efektu većeg broja građevina na slivu te o promjenama uzvodno od granica Hrvatske.

Dosad su se u hrvatskoj hidrološkoj praksi za analizu i procjenu značajnosti trendova najčešće primjenjivale metode zasnovane na linearnoj korelaciji. U ovom radu primijenjene su tzv. robusne, neparametarske metode jer se radi o indikatorima s nepoznatim tipovima distribucije vjerojatnosti i nepotpunim nizovima. Tako su veličine trendova određene primjenom Theil-Senovog procjenitelja [8, 19, 20]:

$$\beta = \text{Median} \left\{ \frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \right\} \quad \forall i > j \quad (13)$$

gdje je:

- $\beta$  - Theil-Senov procjenitelj veličine trenda
- $x_i$  - i-ti član niza
- $t_i$  - trenutak kada je zabilježen i-ti član niza
- $ij$  - indeksi.

Značajnost trenda je određena primjenom Mann-Kendallovog testa. Tim se testom nulta hipoteza nepostojanja trenda definira kao nepostojanje monotone promjene vremenskog niza, odnosno:

$$H_0 : p(x_i > x_j) = 0,5 \quad \forall i > j \quad (14)$$

Mann-Kendalova statistika računa se na sljedeći način:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j > x_k) \quad (15)$$

gdje je:

$S$  - Mann-Kendall-ova statistika, a

$$\text{sgn}(x_j > x_k) = \begin{cases} +1 & \text{za } x_j > x_k \\ 0 & \text{za } x_j = x_k \\ -1 & \text{za } x_j < x_k \end{cases}$$

U slučaju da ne postoji trend (monotona promjena), očekivana vrijednost statistike  $S$  je 0, a varijanca iznosi

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (16)$$

pri čemu je:

- $q$  - broj grupa s istim vrijednostima
- $t_p$  - broj članova niza u p-toj grupi s istim vrijednostima

Ako je niz dovoljno dug (25 i više članova), iz Mann-Kendallove statistike  $S$  može se na sljedeći način proračunati statistika  $Z$  koja se podvrgava standardnoj normalnoj distribuciji:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{za } S > 0 \\ 0 & \text{za } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{za } S < 0 \end{cases} \quad (17)$$

Svakako treba uzeti u obzir da statistički točna interpretacija prihvaćanja nulte hipoteze testa nije "dokaz da trend ne postoji" nego zaključak "da se s odgovarajućom pouzdanošću,

a na temelju korištenog uzorka ne može zaključiti da trend postoji". Takva nemogućnost donošenja definitivnog zaključka o (ne)postojanju trenda svojstvena je i svim drugim testovima. U radu je odabrana uobičajena 5%-tna pouzdanost testa.

Izražena autokorelacija vremenskog niza može negativno utjecati na pouzdanost ocjene značajnosti trenda takvog niza. Postoje različiti pristupi izdvajanju stvarnog trenda iz takvog niza kako bi se omogućila pouzdanija procjena njegove značajnosti i veličine, o čemu je publicirano više radova kao npr. [19, 21, 22] i drugi. U ovom je radu primijenjena procedura TFPW (trend-free pre-whitening, "uklanjane utjecaja autokorelacije s prethodnim uklanjanjem trenda") prikazana u [19], a korištena u [8, 20] i mnogim drugim. Navedena procedura se sastoji od sljedećih koraka:

1. proračuna se Theil-Senov procjenitelj veličine trenda  $b$  izmjenjenog vremenskog niza,
2. ukloni se trend iz izmjenjenog vremenskog niza korištenjem izraza  $x'_i = x_i - bt_i$  gdje je  $x'_i$  član niza kojemu je uklonjen trend
3. proračuna se serijski korelacijski koeficijent s korakom 1,  $r_t$  niza  $\{x'\}$  i odredi njegova značajnost (5 %).

Na osnovi rezultata prethodnih koraka:

- a) Ako  $r_t$  nije statistički značajan, analiza značajnosti trenda se provodi s izmjerenim nizom  $\{x\}$ ,
- b) Ako je  $r_t$  statistički značajan, analiza značajnosti trenda provodi se s nizom  $\{x'\}$  kojem je najprije uklonjen utjecaj autokorelacije i onda dodan trend prema izrazu  $x''_i = x'_i - r_t x'_{i-1} + bt_i$ .

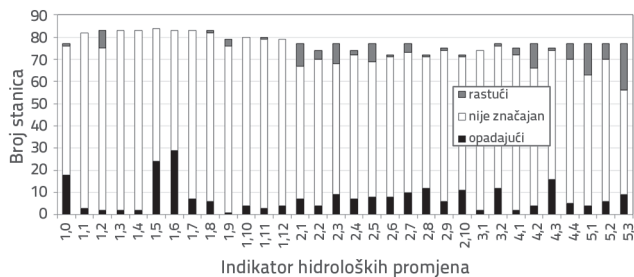
Nakon što su provedene prikazane analize, na neočekivano velikom broju stanica su zabilježeni značajni trendovi nekih od indikatora. S druge strane, jasno je da se ne može govoriti o potpunoj međusobnoj statističkoj neovisnosti svih stanica, odnosno postavilo se pitanje reprezentativnosti skupa rezultata na pojedinim stanicama ("lokalnih") za šire područje ("regionalno"). Jednostavnije rečeno, postavlja se pitanje kolika je vjerojatnost da se na tolikom broju stanica pojave slučajno i istodobno značajni trendovi. Primijenjena je metoda procjene "regionalne značajnosti" (field significance, global significance) trenda opisana u [4, 23]. Princip na kome je zasnovana navedena metoda relativno je jednostavan ali zahtjevan sa stajališta proračuna. Svodi se na to da se za sve stanice na isti način provodi slučajno uzorkovanje iz početnog niza tako da se formira vrlo velik broj (za potrebe ovog rada 2000) novih nizova jednakih karakteristika kao i početni. Budući da je uzorkovanje provedeno na isti način za sve stanice, očuvan je i stupanj njihove međusobne povezanosti. Nakon toga, za svaku od ovih grupa nizova određuje se broj stanica sa značajnim trendom na jednak način te se formira empirijska distribucija vjerojatnosti pojave značajnog trenda na određenom broju stanica. Na osnovi te empirijske distribucije vjerojatnosti može se odrediti i vjerojatnost pojave početnog odnosno zabilježenog

broja stanica sa značajnim trendom. U ovom slučaju, kao granica prihvatljivosti odabrana je u praksi uobičajena vjerojatnost od 5 %. Naravno treba naglasiti da ovako formirana empirijska distribucija može biti primijenjena samo za konkretan slučaj, odnosno za uzorak iz kojeg je formirana. Ova analiza provedena je kako za pozitivne tako i za negativne trendove.

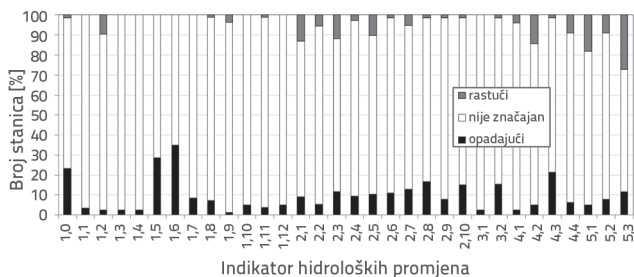
Za grupu indikatora 1, srednji godišnji i srednji mjesečni protoci, provedena je još i usporedba statistički značajnih trendova s tridesetogodišnjim trendovima u prošlosti, odnosno provjereno je jesu li u povijesti, otkada postoje mjerenja, na pojedinim stanicama zabilježeni veći trendovi.

### 3. Rezultati

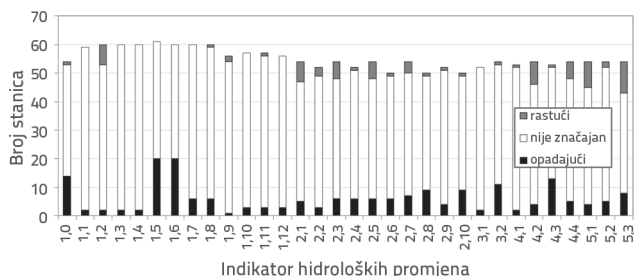
Opisanom metodologijom, ovisno o indikatoru, analizom su obuhvaćene između 72 i 84 (u prosjeku 78) vodomjerne stanice. Ako se ne provodi uklanjanje utjecaja autokorelacije, rezultati su kako slijedi (slike od 5. do 8.).



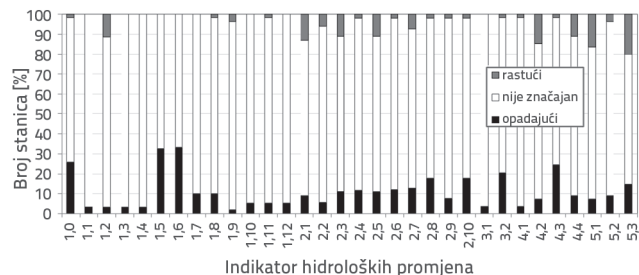
Slika 5. Značajni trendovi na svim stanicama (broj stanica)



Slika 6. Značajni trendovi na svim stanicama (postotak stanica)



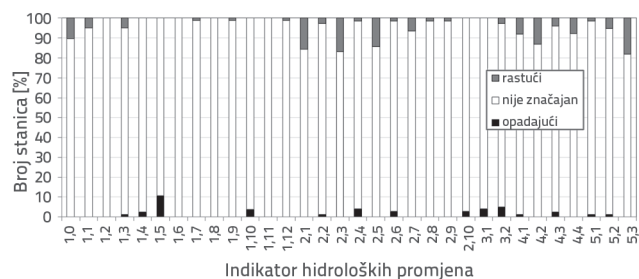
Slika 7. Značajni trendovi na stanicama s malim antropogenim utjecajem (broj stanica)



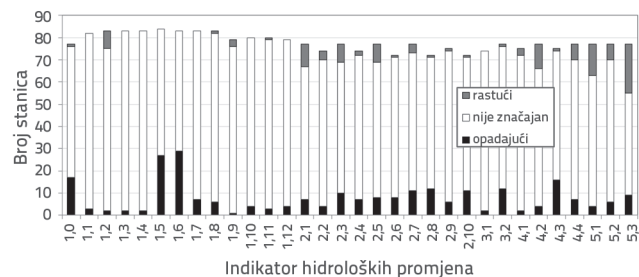
Slika 8. Značajni trendovi na stanicama s malim antropogenim utjecajem (postotak stanica)

U većini slučajeva koeficijent autokorelacije nije bio značajan, a češće se pojavljivao kod parametara vezanih za male vode, što se i očekivalo (slika 9).

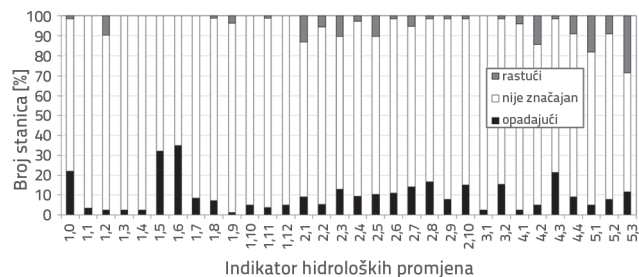
Nakon provođenja postupka TFPW, rezultati su neznatno izmijenjeni (slike 10. do 13.).



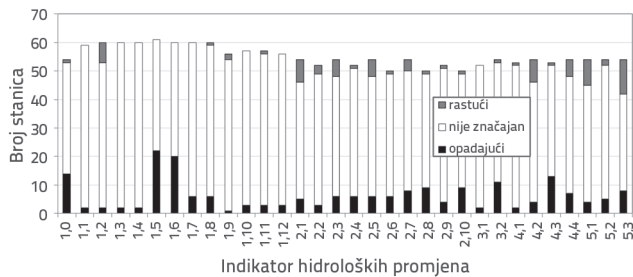
Slika 9. Broj stanica na kojima su zabilježeni statistički značajni (5%) koeficijenti autokorelacije s pomakom 1



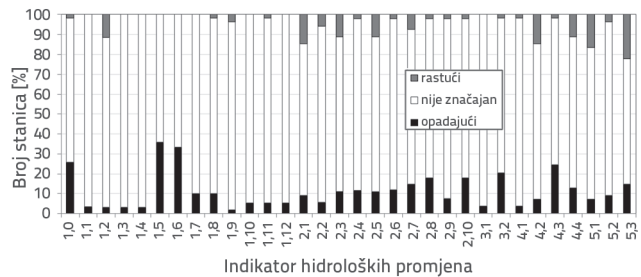
Slika 10. Značajni trendovi na svim stanicama nakon procedure TFPW (broj stanica)



Slika 11. Značajni trendovi na svim stanicama nakon procedure TFPW (postotak stanica)



Slika 12. Značajni trendovi na stanicama s malim antropogenim utjecajem nakon TFPW (broj stanica)

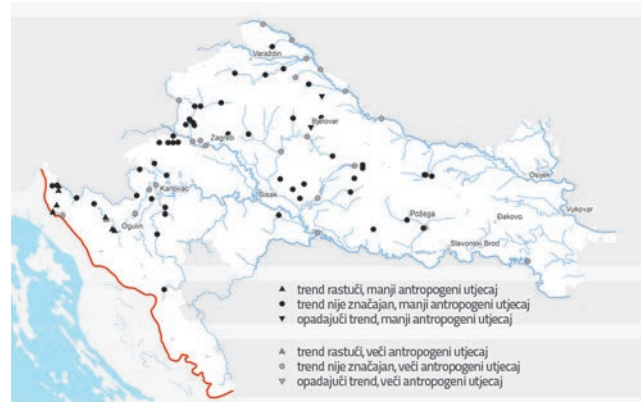


Slika 13. Značajni trendovi na stanicama s malim antropogenim utjecajem nakon TFPW (postotak stanica)

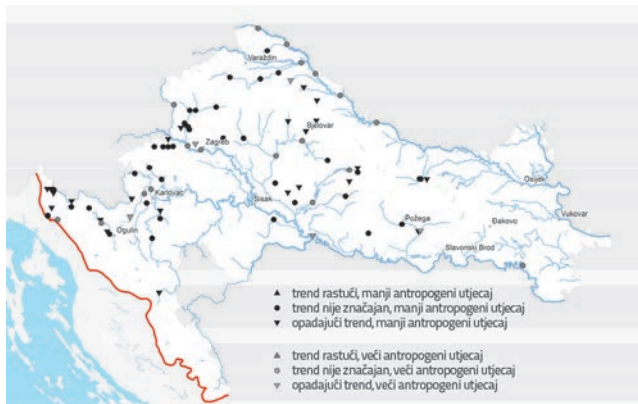
Prostorni položaj stanica sa značajnim trendom za karakteristične indikatore prikazan je kartografski na slikama 14. do 19.



Slika 14. Srednji godišnji protoci (indikator 1.0)



Slika 15. Srednji mjesečni protoci, veljača (indikator 1.2)



Slika 16. Srednji mjesečni protoci, svibanj (indikator 1.5)



Slika 17. Srednji lipanjski protoci (indikator 1.6)

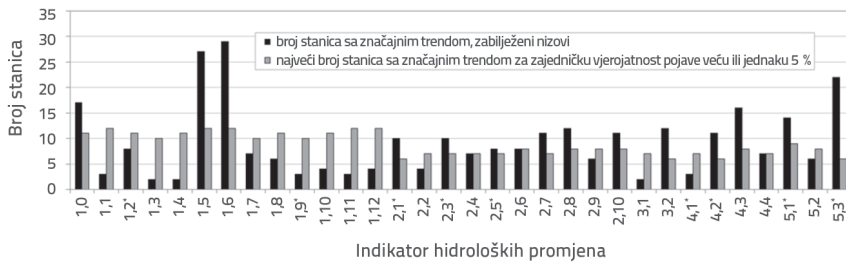


Slika 18. Trajanje visokih pulseva (indikator 4.3)

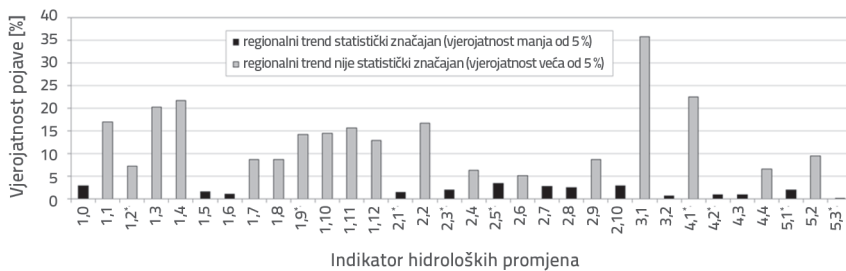


Slika 19. Broj hidroloških promjena (indikator 5.3)

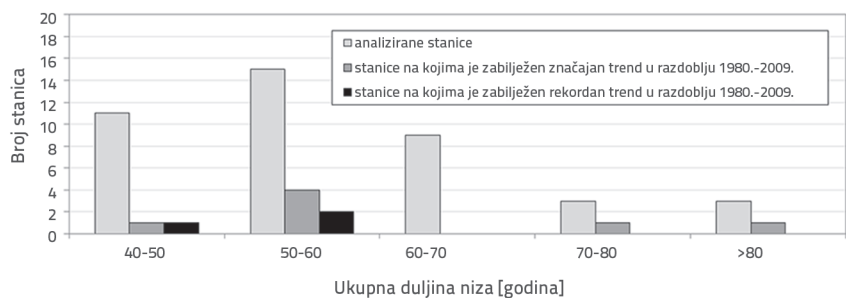




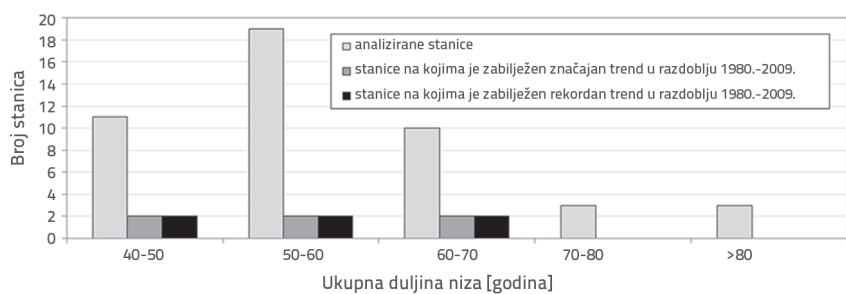
Slika 20. Odnos broja zabilježenih i statistički značajnih trendova



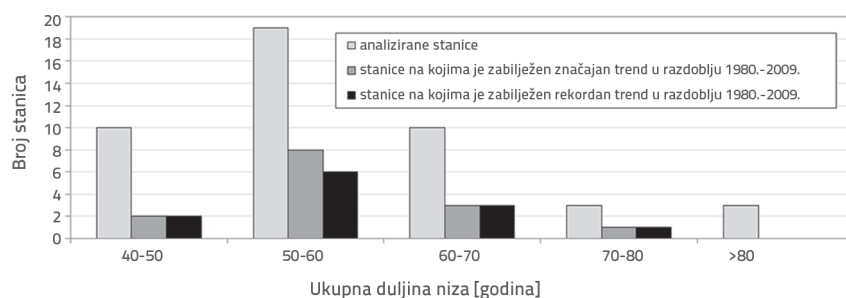
Slika 21. Empirijska vjerojatnost pojave zabilježenog broja trendova s njihovom statističkom značajnošću



Slika 22. Rekordni trendovi, srednji godišnji protoci



Slika 23. Rekordni trendovi, srednji mjesečni protoci, veljača



Slika 24. Rekordni trendovi, srednji mjesečni protoci, svibanj

Na slici 20. prikazan je broj stanica na kojima je zabilježen trend te minimalni broj stanica na kojima je potrebno detektirati trend kako bi zajednička vjerojatnost pojave bila manja od 5%. Prikazani su rezultati analize negativnih trendova, osim za one indikatore kod kojih je pojava pozitivnih trendova bila statistički značajnija i koji su označeni zvjezdicom.

Treba naglasiti da se za indikatore 2.3, 2.5 i 5.3 pokazalo da su za cijeli prostor analize, statistički značajni kako pozitivni tako i negativni trendovi.

Na slici 21., za sve indikatore, prikazana je empirijska vjerojatnost pojave zabilježenog broja trendova s njihovom statističkom značajnošću (zvjezdicom su označeni rastući trendovi).

Osim navedenih analiza, provedena je i usporedba veličine trenda u analiziranom razdoblju sa trendovima zabilježenim u prošlosti. Nažalost, s većim udaljavanjem u prošlost značajno opada kvaliteta mjerenja ali i broj stanica, pa su tako primjerice nizovi dnevnih protoka duži od 80 godina, a bez značajnijih prekida u motrenjima, dostupni samo za nekoliko stanica na velikim rijekama, Savi, Muri i Dravi. Zbog toga je ova analiza provedena samo za srednje godišnje te srednje mjesečne protoke za veljaču, svibanj i lipanj. Za pojedine stanice s dugim nizovima provjereno je postoje li prošla tridesetogodišnja razdoblja u kojima su se javljali veći statistički značajni trendovi. Rezultati su prikazani na slikama 22. do 25.

Iz slika 22. do 25. vidljivo je da je samo na jednoj od stanica koje imaju niz podataka duži od 70 godina, zabilježen rekordan trend u razdoblju od 1980. do 2009., i to za srednje svibanjske protoke. Na gotovo svim stanicama s nizom podataka tijekom 40 do 70 godina na kojima su u periodu 1980. -2009. zabilježeni statistički značajni trendovi srednjih mjesečnih protoka za svibanj ili veljaču, oni su bili rekordni (povijesno najveći zabilježeni).

S druge strane, čini se da recentni trendovi srednjih godišnjih i srednjih mjesečnih protoka za lipanj nisu

ekstremni. Za stanice s najdužim nizovima dnevnih protoka (preko 80 godina) a bez značajnijih prekida u motrenjima, hodovi trendova su prikazani i grafički (slike 26. - 29.). Pri tome su trendovi prikazani u odnosu na zadnju godinu u tridesetogodišnjem nizu.

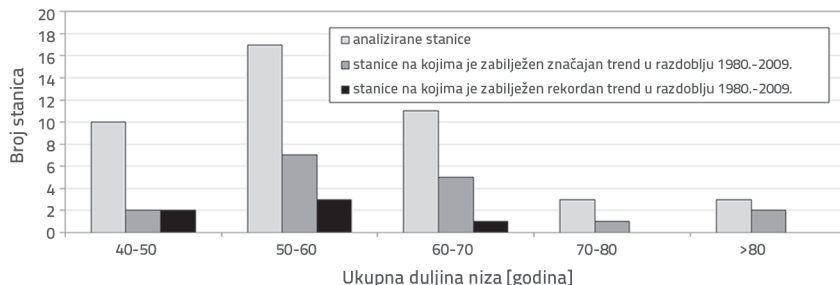
Iako je broj stanica s dugim nizovima motrenja vrlo ograničen i nedostatan za statističko zaključivanje, čini se da se u dugogodišnjim hodovima trendova naziru ciklusi, doduše s periodima znatno dužima od tridesetak godina i s rasponom od približno -2.5 % do +2.5 % godišnje (slike 26. - 29.).

#### 4. Zaključak

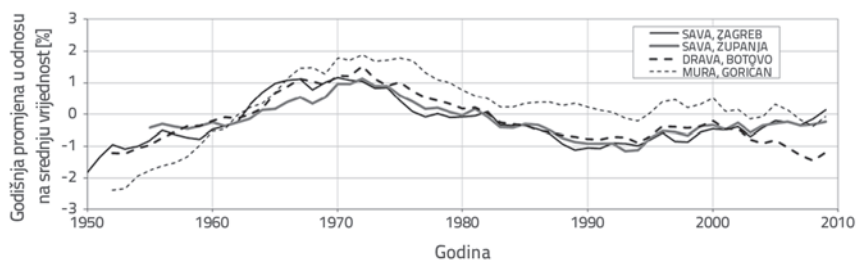
U sklopu ovog rada provedena je analiza trendova indikatora hidroloških promjena na slivu Dunava u Hrvatskoj za posljednje tridesetogodišnje razdoblje. Primjenjen je robusni neparаметarski Mann-Kendallov test, provedeno je uklanjanje efekta autokorelacije pomoću metode TFPW te analiza "regionalnog značaja" trendova. Svakako treba naglasiti da je analizirano razdoblje bilo hidrometrijski vrlo dinamično i to najviše zbog prekida mjerenja na velikom broju postaja uslijed rata te zato što se promijenila tehnologija mjerenja jer su letve zamijenili limnigrafi.

Analizom su otkriveni posebno zabrinjavajući negativni trendovi svibanjskih (indikator 1.5) i lipanjskih (indikator 1.6) protoka, koji na većem dijelu sliva znače i raniji početak (uvod) i produženje sezone malih voda, što može uzrokovati značajne negativne posljedice kako za razvoj ekosustava tako i za korištenje voda (npr. poljoprivrednu proizvodnju). Ovi trendovi su se u velikoj mjeri reflektirali i na cijelu godinu (indikator 1.0). Na 8 stanica u Gorskom kotaru (uzvodni dio sliva Dobre i Kupe) utvrđena su povećanja protoka u veljači (indikator 1.2) ali koja nisu statistički značajna za čitav analizirani prostor.

Srednje trajanje visokih pulseva (epizoda s protokom većim od protoka



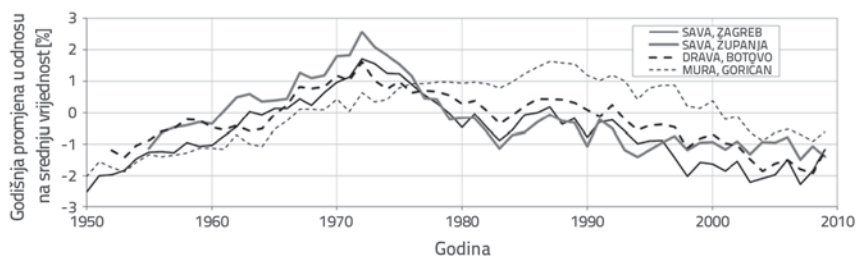
Slika 25. Rekordni trendovi, srednji mjesečni protoci, lipanj



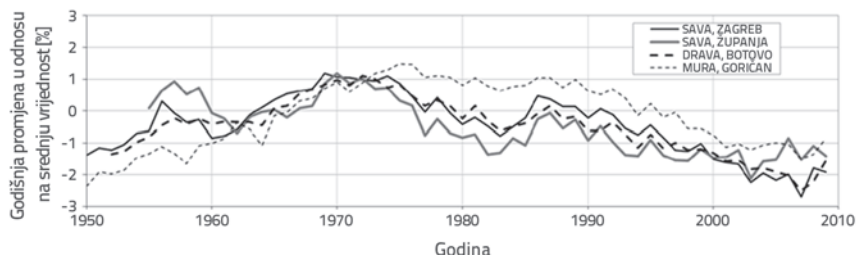
Slika 26. Hod trendova srednjih godišnjih protoka, stanice s dugim nizovima



Slika 27. Hod trendova srednjih mjesečnih protoka, veljača, stanice s dugim nizovima



Slika 28. Hod trendova srednjih mjesečnih protoka, svibanj, stanice s dugim nizovima



Slika 29. Hod trendova srednjih mjesečnih protoka, lipanj, stanice s dugim nizovima

trajanja 25 %, indikator 4.3) opada, a broj niskih pulseva (epizoda s protokom manjim od protoka trajanja 75 %, indikator 4.2) raste. Povećana je i prosječna brzina rasta hidrograma (indikator 5.1) kao i broj hidroloških promjena (indikator 5.3).

U skladu sa svim navedenim detektirano je i smanjenje srednjih protoka malovodnih i velikovodnih perioda (indikator 2.3, 2.5, 2.7, 2.8, 2.10).

Svi ovi indikatori upozoravaju na produženje sušnih perioda tijekom ljeta te na povećanje dinamičnosti hidrograma.

Od opće slike donekle odstupa statistički značajan broj stanica na kojima je utvrđeno povećanje srednjih protoka malovodnih razdoblja kratkih trajanja (indikator 2.1, 2.3 i 2.5) te smanjenje broja hidroloških promjena (indikator 5.3).

Postavlja se pitanje i što je stvarni uzrok navedenih promjena. S obzirom na to da je ovom analizom obuhvaćena samo krajnja realizacija čitavog niza procesa, konačni zaključak nije moguće dati. Ipak većina promjena odgovara često spominjanim scenarijima o klimatskim promjenama, koji predviđaju povećanje suša te intenzivnije i učestalije ekstreme (kao npr. u [24]). Jednako tako i procesi urbanizacije mogu pridonijeti bržem otjecanju i kraćem zadržavanju vode na slivu, na što upućuju rezultati analize. S obzirom na sve to očigledno je da su u posljednjem 30-godišnjem razdoblju na

osnovi rezultata monitoringa utvrđene određene promjene hidrološkog režima, za koje se ne može sa sigurnošću reći jesu li posljedice uobičajenih hidroloških ciklusa ili nekih drugih procesa. Bez obzira na uzroke, to je prijeko potrebno povećati otpornost i adaptibilnost upravljanja vodama u skladu s promjenama ove vrste kako bi se što djelotvornije uspjele zadovoljiti potrebe korisnika vode ali i ekosustava koji ovise o njoj.

Indikatori hidroloških promjena, definirani u [12, 13] te obrađeni u ovom radu, zasnivaju se na protoku. Treba uzeti u obzir da ti indikatori ne predstavljaju konačni zatvoreni skup indikatora nego "jedan od potpunijih skupova". Za analizu hidromorfološkog stanja i promjena iznimno su važni i indikatori zasnovani na razini odnosno dubini vode, pa bi bilo uputno istraživanja nastaviti i u tom smjeru, pogotovo zato što već postoji veliki fond sistematiziranih podataka (HIS 2000).

Da bi se što učinkovitije i brže djelovalo, nužno je unaprijediti monitoring, osobito u prostornom smislu, jer je očigledna prostorna neravnomjernost vodomjernih stanica kojih je vrlo mali broj na istočnom dijelu sliva gdje se mogu očekivati i najveće neusklađenosti u upravljanju vodama (poljoprivreda – ekosustavi).

## LITERATURA

- [1] Kundzewicz, Z.W., Graczyk, D., Maurer, T., Przymusinska, I., Radziejewski, M., Svensson, C., Szwed, M.: Detection of change in world-wide hydrological time series of maximum annual flow, Report 32, GRDC Report Series, 2004.
- [2] McCabe, G.J., Wolock, D.M.: A step increase in streamflow in the conterminous United States, *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, NO. 24, 2185, doi:10.1029/2002GL015999, 2002.
- [3] Douglas, E.M., Vogel, R.M., Kroll, C.N.: Trends in Floods and low Flows in the United States: impact of spatial correlation, *Journal of Hydrology* 240 (2000), pp. 90-105, 2000.
- [4] Burn, D.H., Hag Elnur, M.A.: Detection of hydrologic trend and variability. *J. Hydrol.* 255, pp. 107–122, 2002.
- [5] Pekarova, P., Miklanek, P., Pekar, J.: Long-term trends and runoff fluctuations of European rivers, *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006)*, IAHS Publ. 308, 2006.
- [6] Wang, W., Van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J.K.: Trend And Stationarity Analysis For Streamflow Processes Of Rivers In Western Europe In The 20th Century, *IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance, Rethymno, Greece, 8-10 July 2005*.
- [7] Bormann, H.: Runoff Regime Changes In German Rivers Due To Climate Change, *Erdekunde*, Vol. 64 · No. 3, pp. 257-279, 2010
- [8] Danneberg J.: Changes in runoff time series in Thuringia, Germany – Mann-Kendall trend test and extreme value analysis, *Advances in Geosciences*, 31, pp. 49–56, 2012.
- [9] Trninić, D., Bošnjak, T.: Karakteristični protoci Save kod Zagreba, *Hrvatske vode* 17 (2009) 69/70, pp. 257-268, 2009.
- [10] Gajić-Čapka, M., Cesarec, K.: Trend i varijabilnost protoka i klimatskih veličina u slivu rijeke Drave, *Hrvatske vode* 18 (2010), 71, pp. 19-30, 2009.
- [11] Bonacci, O., Oskoruš, D.: The changes in the lower Drava River water level, discharge and suspended sediment regime, *Environmental Earth Sciences*, Volume 59, Issue 8, pp. 1661–1670, February 2010.
- [12] Richter, B., Baumgartner, J., Powell, J., Braun, P.: A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems, *Conservation Biology*, Volume 10, No 4, 1996.
- [13] Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., Braun, P.: How much water does a river need?, *Freshwater Biology* 37, 231–249, 1997.
- [14] Poff, N.L., Zimmerman, J.K.H.: Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows, *Freshwater Biology* 55, pp. 194–205, 2010.
- [15] Tharme, R.E.: A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers, *River Research and Applications* 19, pp. 397-441, 2003.

- [16] Plan upravljanja vodnim područjima, Vlada Republike Hrvatske, 2013.
- [17] Barbalić, D., Petraš, J.: Sezonska pojavnost velikih voda na slivu Dunava u Hrvatskoj, GRAĐEVINAR 64 (2012) 1, pp. 33-38.
- [18] Bušelić, G., Rubinić, J.: Problems with Consistency of Hydrological Data Series Caused By Different Time Discretization Used in Their Primary Analysis, 2006.
- [19] Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., Cavadias, G.: The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series, Hydrological Processes 16, pp. 1807–1829, 2002.
- [20] Burn, D.H., Cunderlik, J.M., Pietroniro, A.: Hydrological trends and variability in the Liard River basin, Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 49 (1), 53-67, 2004.
- [21] McBride, G.B.: Using Statistical Methods for Water Quality Management: Issues, Problems and Solutions, A John Wiley & sons, 2005.
- [22] Bayazit, M., Önöz, B.: To prewhiten or not to prewhiten in trend analysis?, Hydrological Sciences Journal, 52:4, pp. 611-624, 2007.
- [23] Livezey, R.E., Chen, W.Y.: Statistical field significance and its determination by Monte Carlo techniques, Monthly Weather Rev. 111, pp. 46–59, 1983.
- [24] Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Volume II: Regional Aspects, Europe, IPCC Working Group II Contribution to the IPCC 5th Assessment Report, Accepted Unedited Final Draft Report, 2014