

Prethodno priopćenje | Preliminary report | UDK 556.53:551.583] (282.24 Drava)
 Primljen [Received]: 1. 4. 2009. | Prihvaćeno [Accepted]: 1. 12. 2009.

TREND I VARIJABILNOST PROTKA I KLIMATSKIH VELIČINA U SLIVU RIJEKE DRAVE

**dr. sc. Marjana Gajić-Čapka,
dipl. ing. fiz.**

Državni hidrometeorološki zavod
Služba za meteorološka
istraživanja
Grič 3, 10000 Zagreb
capka@cirus.dhz.hr

**mr. sc. Ksenija Cesarec,
dipl. ing. kult. teh.**

Državni hidrometeorološki zavod
Hidrološka služba
Mesnička 49, 10000 Zagreb

Promjene hidroloških veličina koje su rezultat promjena klime neposredno utječu na ljude i ekosustave. U ovom radu ispitane su vremenske promjene godišnjih i polugodišnjih vrijednosti srednje temperature zraka i oborinskih parametara te srednjeg protoka na slivu Drave u Hrvatskoj prema podacima meteoroloških postaja Varaždin (1949.-2008.) i Osijek (1926.-2004.) te hidrološke postaje Donji Miholjac za koju postoje podaci protoka od 1926. Cilj je ocijeniti njihove trendove i varijacije tijekom 20. i početkom 21. stoljeća, u klimi koja na globalnoj i regionalnim skalamama pokazuje zatopljenje, dok su oborinski trendovi prostorno manje koherennti i ne pokazuju istosmjerne promjene niti podjednaki intenzitet promjena (IPCC, 2007.). Linearni trendovi srednje godišnje temperature zraka ukazuju na zatopljenje u razdoblju 1949.-2008., statistički signifikantno prema neparametarskom Mann-Kendallovom testu za trend na 5 postotnoj razini signifikantnosti na području gornjeg toka za godinu i polugodišta (Varaždin) i donjeg toka za godinu (Osijek). Prema Sneyersovom progresivnom testu, trend zatopljenja započinje početkom druge polovice devedesetih godina 20., a značajno od početka 21. stoljeća. Istovremeno, kod količina oborine nije prisutna tendencija u istom smjeru i istog intenziteta na gornjem i donjem toku i utvrđeni trendovi nisu statistički značajni. Broj oborinskih dana se značajno smanjuje u hladnom polugodištu od osamdesetih godina prošlog stoljeća (od 1981. u Osijeku i 1988. u Varaždinu) i uz blago povećanje u toplog polugodištu doprinosi negativnom godišnjem trendu. Smanjenje učestalosti oborinskih dana popraćeno je i smanjenjem njihove varijabilnosti. Srednji godišnji protok kod Donjeg Miholjca pokazuje statistički značajan trend smanjenja u oba promatrana razdoblja i rezultat je opadajućeg trenda u oba polugodišta za oba razdoblja, pri čemu je trend smanjenja srednjih protoka toplog polugodišta statistički značajan i javlja se od 1997. Analiza trenda uzastopnih 30-godišnjih podrazdoblja, čiji je početak pomican za 10 godina, ukazuje na paralelno izmjenjivanje pozitivnih i negativnih trendova godišnjih količina oborine (Varaždin) i protoka (Donji Miholjac). U svim promatranim nizovima prisutna je izražena vremenska varijabilnost. Analiza trenda nizova koeficijenta varijacije za 10-godišnje klizne intervale ukazuje na značajno povećanje varijabilnosti količina oborine toplog polugodišta u Varaždinu. Istovremeno je prisutno značajno smanjenje varijabilnosti srednjih godišnjih protoka i značajan porast varijabilnosti srednjih protoka hladnog polugodišta Drave kod Donjeg Miholjca, što je posljedica prirodnih promjena i antropogenog utjecaja.

Ključne riječi:

klimatske promjene, protok, trend, varijabilnost, rijeka Drava (Hrvatska)

1. UVOD

Ispitivanja klimatskih prilika u slivu rijeke Drave, na području Republike Hrvatske (slika 1 – položaj mjernih postaja), koja uključuju prosječni godišnji hod klimatskih veličina i komponenti vodne ravnoteže (slika 2), prema podacima referentnog klimatskog razdoblja 1961.-1990., ukazala su na jaki utjecaj temperature zraka, relativne

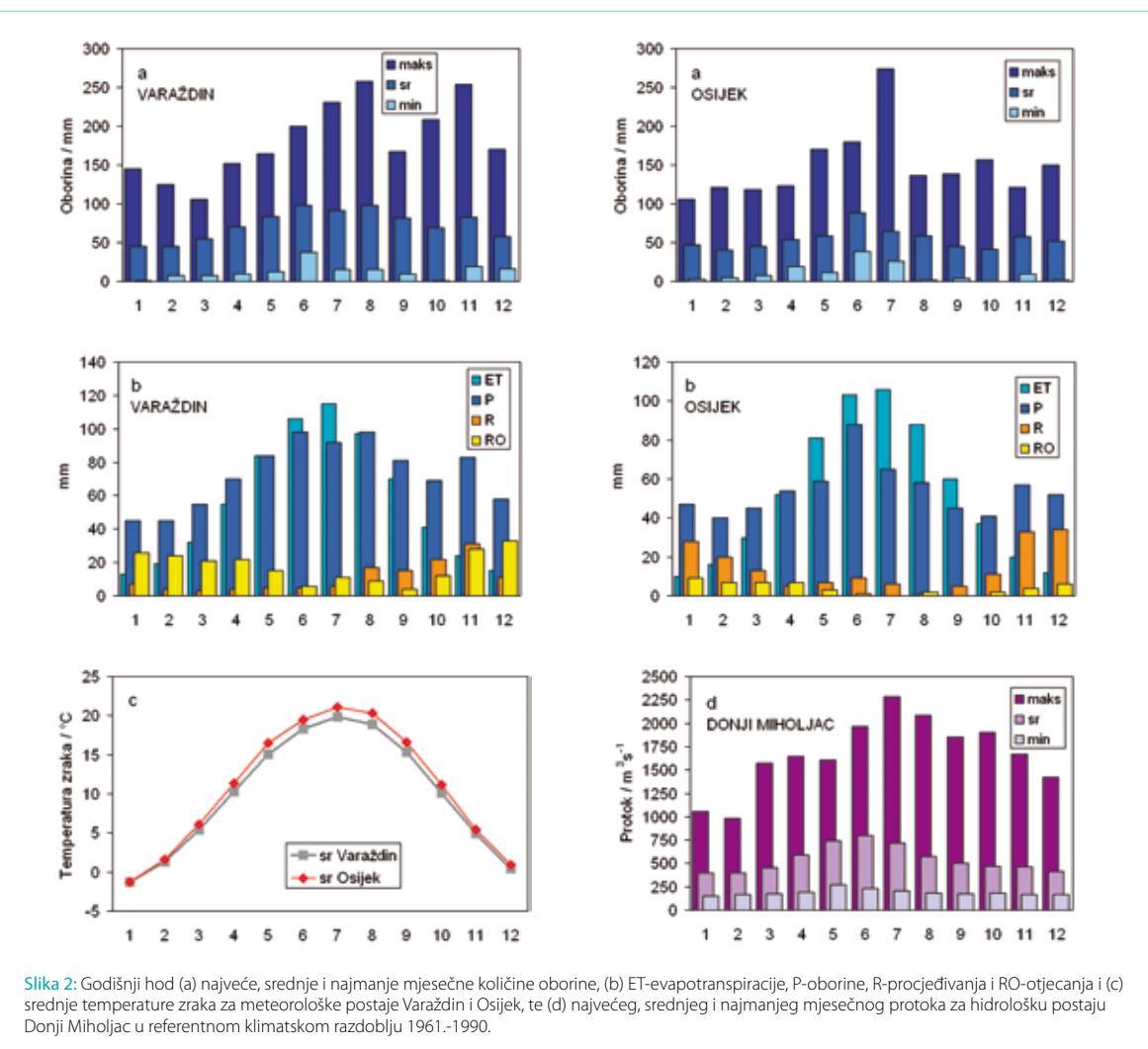
vlažnosti i oborine na komponente vodne ravnoteže, kao i na prevladavajući utjecaj oborine na protok (Gajić-Čapka i Zaninović, 2004.).

Godišnji hod mjesecnih vrijednosti protoka ima isti oblik kao i godišnji hod količine oborine (slika 2). Na slivu Drave, veći dio godišnje količine padne u toplom polugodištu, od travnja do rujna, i to 60 posto u Varaždinu, 56 posto u Donjem Miholjcu i 57 posto u Osijeku (tablica 1). Prema podacima hidrološke postaje Donji Miholjac, godišnji srednji protok je $545 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ s najnižom vrijednošću u godišnjem hodu zimi (402 m^3s^{-1} u siječnju i u veljači) i najvišom ljeti (800 m^3s^{-1} u lipnju). Prema podacima u tablici 1 uočava se da su srednji mjesecni protoci u sedam mjeseci, od rujna do ožujka, niži od srednjeg godišnjeg protoka za 7 posto u rujnu do 26 posto u siječnju i veljači, a u razdoblju od travnja do kolovoza viši za 6 posto u kolovozu do 47 posto u lipnju.

Hidrološki režim Drave u Hrvatskoj pod utjecajem je uzvodnih meteoroloških prilika, ali isto tako i ljudske aktivnosti, prvenstveno izgradnje hidroelektrana (Bonacci i Oskoruš, 2009.). U ovom radu ispitati će se kakve su promjene srednjeg protoka na Dravi kod Donjeg Miholjca od sredine prve polovice 20. stoljeća, budući da hidrološka



Slika 1: Položaji meteoroloških postaja Varaždin i Osijek i hidrološke postaje Donji Miholjac.



Slika 2: Godišnji hod (a) najveće, srednje i najmanje mjesecne količine oborine, (b) ET-evapotranspiracija, P-oborine, R-procjedivanja i RO-otjecanja i (c) srednje temperature zraka za meteorološke postaje Varaždin i Osijek, te (d) najvećeg, srednjeg i najmanjeg mjesecnog protoka za hidrološku postaju Donji Miholjac u referentnom klimatskom razdoblju 1961.-1990.

Tablica 1: Prosječna godišnja raspodjela mjesecne oborine i protoka u referentnom razdoblju 1961.-1990. izraženo u postocima godišnjih vrijednosti.

Postaje	Hladno polugodište						Toplo polugodište					
	X.	XI.	XII.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.
Varaždin meteorološka	7,9	9,4	6,6	5,1	5,2	6,2	8,0	9,6	11,2	10,4	11,2	9,3
	40,4						59,6					
Donji Miholjac meteorološka	6,2	8,9	8,2	7,6	6,1	7,0	8,2	9,0	11,6	10,1	10,1	7,0
	44,0						56,0					
Osijek meteorološka	6,4	8,8	7,9	7,2	6,2	6,9	8,3	9,0	13,5	10,0	9,0	6,9
	43,4						56,6					
Donji Miholjac hidrološka	86	85	76	74	74	83	108	137	147	132	106	93
	80						120					

mjerjenja postoje od 1926. godine. U klimi koja se mijenja, oborinske promjene mnogo su manje regionalno koherentne nego temperaturne. Oborinske promjene na slivu Drave određene su specifičnim geografskim položajem u klimatski prijelaznoj zoni, gdje atlantski i sredozemni utjecaj slab od zapada prema istoku i jača kontinentalni. Stoga će se u ovom radu ispitati trend i varijabilnost oborinskih parametara i temperature zraka na dvije meteorološke postaje, Varaždin i Osijek, kako bi se dobio uvid u klimatske promjene na hrvatskom dijelu sliva. Pri tome klimatske promjene u Varaždinu imaju odjeka u promjenama hidrološkog režima nizvodno, koje se u ovom radu detektira iz mjerjenja u Donjem Miholjcu. Meteorološka postaja Osijek raspolaže mjerjenjima od kraja 19. stoljeća i vrlo je vrijedan niz podataka u detektiranju klimatskih promjena u Hrvatskoj. U ovom radu rezultati analize osječkih podataka mogu ukazati na prostorne razlike smjera i intenziteta klimatskih promjena, koje imaju utjecaj na hidrološki režim donjeg toka Drave i Dunava.

Ranija analiza trenda vremenskih nizova nekih komponenti vodne ravnoteže u razdoblju 1900.-1995. na području donjeg sliva rijeke Drave prema podacima Osijeka utvrdila je trend smanjenja oborine i relativne vlažnosti i istovremeno porast temperature zraka tijekom 20. stoljeća (Zaninović i Gajić-Čapka, 2000.). Njihov kombinirani utjecaj rezultirao je statistički signifikantnim porastom evapotranspiracije dovodeći do signifikantnog smanjenja otjecanja i sadržaja vode u tlu kod godišnjih vrijednosti i vrijednosti toplog polugodišta.

U radu Pandžić i sur. (2008.) analizirani su trendovi temperature zraka i nekih komponenti vodne ravnoteže proračunatih Palmerovom metodom za 24 meteorološke postaje u Hrvatskoj u razdoblju 1951.-2000. Rezultati su pokazali pozitivan trend 25-godišnjih kliznih srednjaka temperature zraka na području cijele Hrvatske tijekom druge polovice 20. stoljeća. Oborinski klizni srednjaci pokazuju značajnije nepravilne cikličke varijacije i blagi negativni linearni trend. Negativni trend sadržaja vode u tlu posljedica je postupnog smanjenja razlike procjeđivanja vlage u tlo i gubitka iz tla. Posljedica pozitivnog trenda evaporacije je negativni trend otjecanja. Analiza trenda mjerjenih protoka provedena je za rijeku Savu i ustanovljen je negativan trend koji autori tog rada pripisuju uglavnom globalnom klimatskom

zatopljenju, napominjući i veliku važnost godišnje raspodjele oborine u krajevima s višim vrijednostima otjecanja. Oni ne diskutiraju mogući utjecaj aktivnosti čovjeka na protok u slivu.

U okviru analize odnosa temperature zraka i temperature vode Dunava i njegovih pritoka (Bonacci i sur., 2008. a.; 2008. b.) ispitana je i trend srednje, minimalne i maksimalne temperature zraka za meteorološke postaje Zagreb-Grič i Osijek u razdoblju 1900.-2005.

Utvrđen je trend porasta srednjih i minimalnih godišnjih temperatura zraka za obje postaje, dok za maksimalne godišnje temperature zraka gotovo ne postoje promjene u promatranoj razdoblju. Autori primjenjuju RAPS (Rescaled Adjusted Partial Sums) metodu (Garbrecht i Fernandez, 1994.) za preliminarno vizualno pregledavanje vremenskih nizova i definiranje trenutka promjene smjera trenda za sve nizove bez obzira na statističku značajnost trendova, koja u toj analizi nije ispitana. Za područje toka Drave uočavaju početak porasta srednje godišnje temperature zraka 1988. godine. Rezultati analize trenda u skladu su s promjenama koje su dobivene u okviru istraživanja temperaturnih trendova i varijacija (1901.-2004.) za Hrvatsku (MZOPUG, 2006.). Prema progresivnoj analizi vremenskih nizova (Sneyers, 1990.) porast srednjih godišnjih temperatura zraka, prema podacima Zagreb-Griča i Osijeka, počinje 1991., statistički značajno u Zagrebu od 2001.

Navedene promjene klimatskih veličina i komponenti vodne ravnoteže odnose se na promjene godišnjih vrijednosti, kao prvog indikatora promjena. Kako su one rezultat promjena tijekom godine, važna su ispitivanja tih promjena na polugodišnjoj (Gajić-Čapka i Cesarec, 2008.) i sezonskoj skali (Vučetić i Cesarec, 2009.), ovisno o razmatranju odjeka tih promjena na hidrološki režim, te biološka ili kemijska svojstva voda ili tala, odnosno vodno, poljoprivredno i energetsko gospodarstvo.

2. PODACI I METODA

Analiza vremenskih nizova u slivu Drave provedena je za srednje godišnje i srednje polugodišnje protok mjerene na hidrološkoj postaji Donji Miholjac ("0"=88,57 m n.m., $\Phi=45^{\circ}48'$ N, $\lambda=18^{\circ}21'$ E) te za količinu oborine, broj oborinskih dana ($R_d \geq 0.1$ mm) i dnevni intenzitet oborine za meteorološke postaje Varaždin ($H=167$ m n.m., $\Phi=46^{\circ}18'$ N, $\lambda=16^{\circ}23'$ E) i Osijek ($H=328$ m n.m., $\Phi=45^{\circ}32'$ N, $\lambda=18^{\circ}44'$ E) za dva razdoblja: 1926.-2008. (Donji Miholjac i Osijek) i 1949.-2008. (Donji Miholjac, Varaždin i Osijek). Za svaki parametar, za svaku godinu, izračunato je odstupanje od njegovog srednjaka za 30-godišnje klimatsko razdoblje 1961.-1990., koje Svjetska meteorološka organizacija preporučuje kao referentno za sadašnju klimu. To omogućuje uvid u dugoročne vremenske promjene odstupanja od prosjeka. Na takve nizove podataka odstupanja primijenjena

je analiza trenda. Takav način prikaza omogućuje regionalne usporedbe trendova za različita klimatska područja.

Linearni trendovi procijenjeni su za godišnje vrijednosti te za toplo (IV.-IX.) i hladno (X.-III.) polugodište, a signifikantnost njihovih promjena testirana je neparametarskim Mann-Kendallovim testom sa slijedovima (Mitchell i sur., 1966., Sneyers, 1990.). Za svaki element x_i ili za svaki rang y_j , koji mu je pridružen kada su elementi poredani po rastućim vrijednostima, broj n_i elemenata y_j koji mu prethode ($i > j$) računa se tako da je $y_i > y_j$. Veličina testa t dana je s jednadžbom:

$$t = \sum_i n_i$$

Za nizove kod kojih je dobiven signifikantan trend pomoću Mann-Kendallovog koeficijenta t , primjenjena je progresivna analiza vremenskih nizova pomoću statistike $u(t)$ kako bi se odredio početak pojave (Sneyers, 1990.). Vrijednosti testa t , imaju normalnu razdiobu za dugačke nizove i njihov srednjak i variancu su:

$$E(t) = \frac{n(n-1)}{4}$$

$$\text{var}(t) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

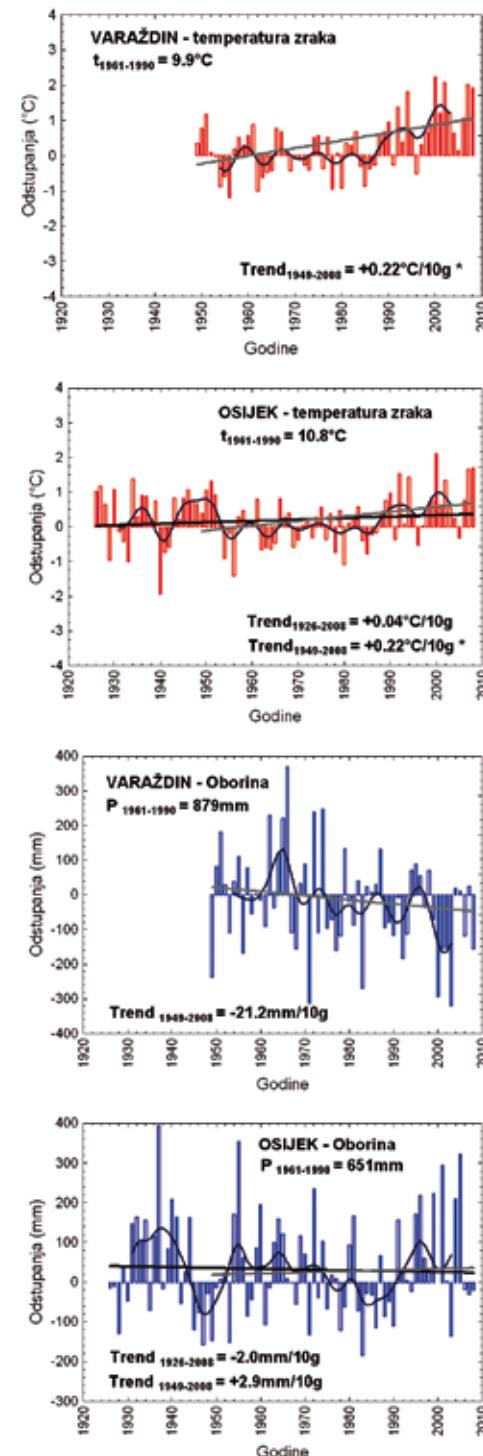
Oni omogućuju određivanje standardizirane vrijednosti:

$$u(t) = \frac{t - E(t)}{\sqrt{\text{var}(t)}}$$

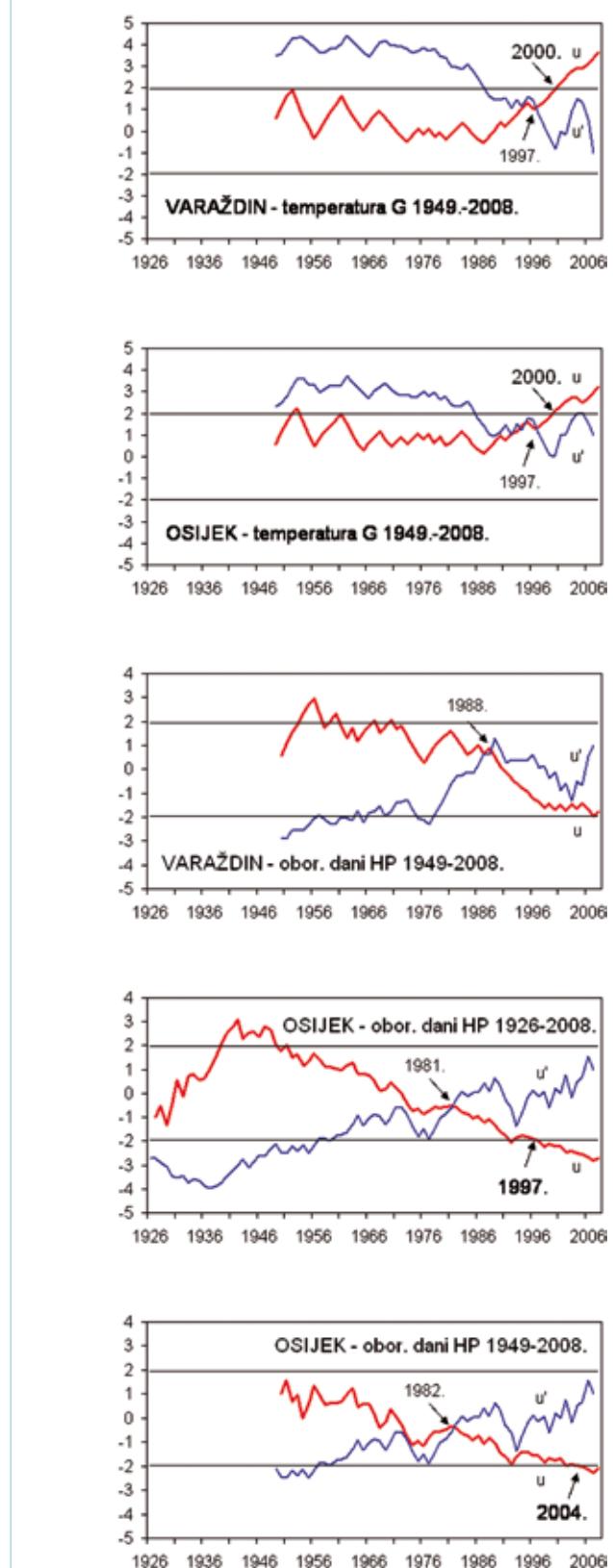
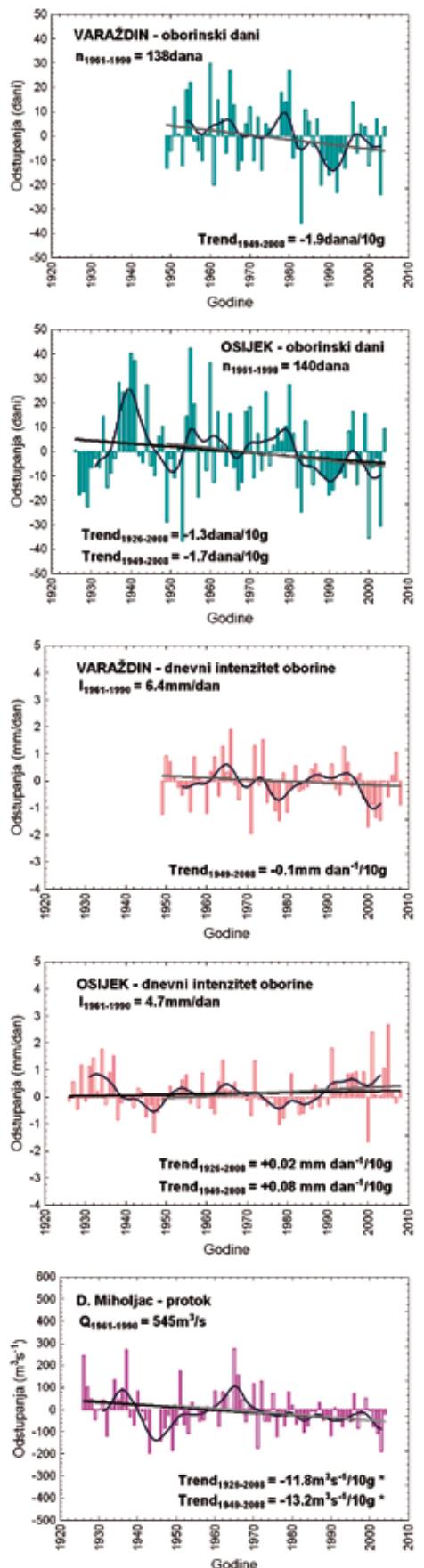
Pozitivna vrijednost $u(t)$ ukazuje na rastući trend, dok negativna vrijednost $u(t)$ ukazuje na padajući trend. Za utvrđivanje početka mogućeg trenda, $u(t)$ se računa za sve i , od prvog do posljednjeg člana, stvarajući progresivni niz testa unaprijed. Niz testa $u'(t)$ unazad stvara se na isti način, računajući ga od posljednjeg prema prvom članu. Ako nema trenda, krivulje $u(t)$ i $u'(t)$ se sijeku nekoliko puta, dok u slučaju prisutnosti trenda, točka u kojoj se sijeku predstavlja početak trenda koji postaje signifikantan na 5-postotnoj razini u slučaju kada apsolutna vrijednost $u(t)$ prelazi vrijednost 1,96.

U cilju uklanjanja kratkoročnih fluktacija i jasnijeg isticanja promjena na dužoj vremenskoj skali, šum je odstranjen iz nizova podataka pomoću otežanog 11-godišnjeg binomnog kliznog srednjaka kao filtera koji se često koristi u analizi klimatske varijabilnosti (Böhm i sur., 2001.). Broj članova kliznog srednjaka mora biti neparan, kako bi se omogućila simetrija oko središnje vrijednosti i isključio pomak u fazi. Jedanaest godina je srednji ritam sunčevih pjega i 11-godišnji klizni srednjak se koristi za ispitivanje s njima povezanim varijacijama terestičke klime (Mitchell i sur., 1966.).

Ispitivanje promjena varijabilnosti provedeno je analizom vremenskih nizova koeficijenta varijacije (c_i) svih parametara u uzastopnim dekadama (1926.-1935., 1927.-1936., ..., 1999.-2008.).



Slika 3: Vremenski nizovi temperature zraka, tri oborinske veličine i protoka, pridruženi linearni trendovi i otežani 11-godišnji binomni klizni srednjaci za GODINU u razdoblju 1926.-2008. za meteorološku postaju Osijek i hidrološku postaju Donji Miholjac i u razdoblju 1949.-2008. za meteorološku postaju Varaždin.



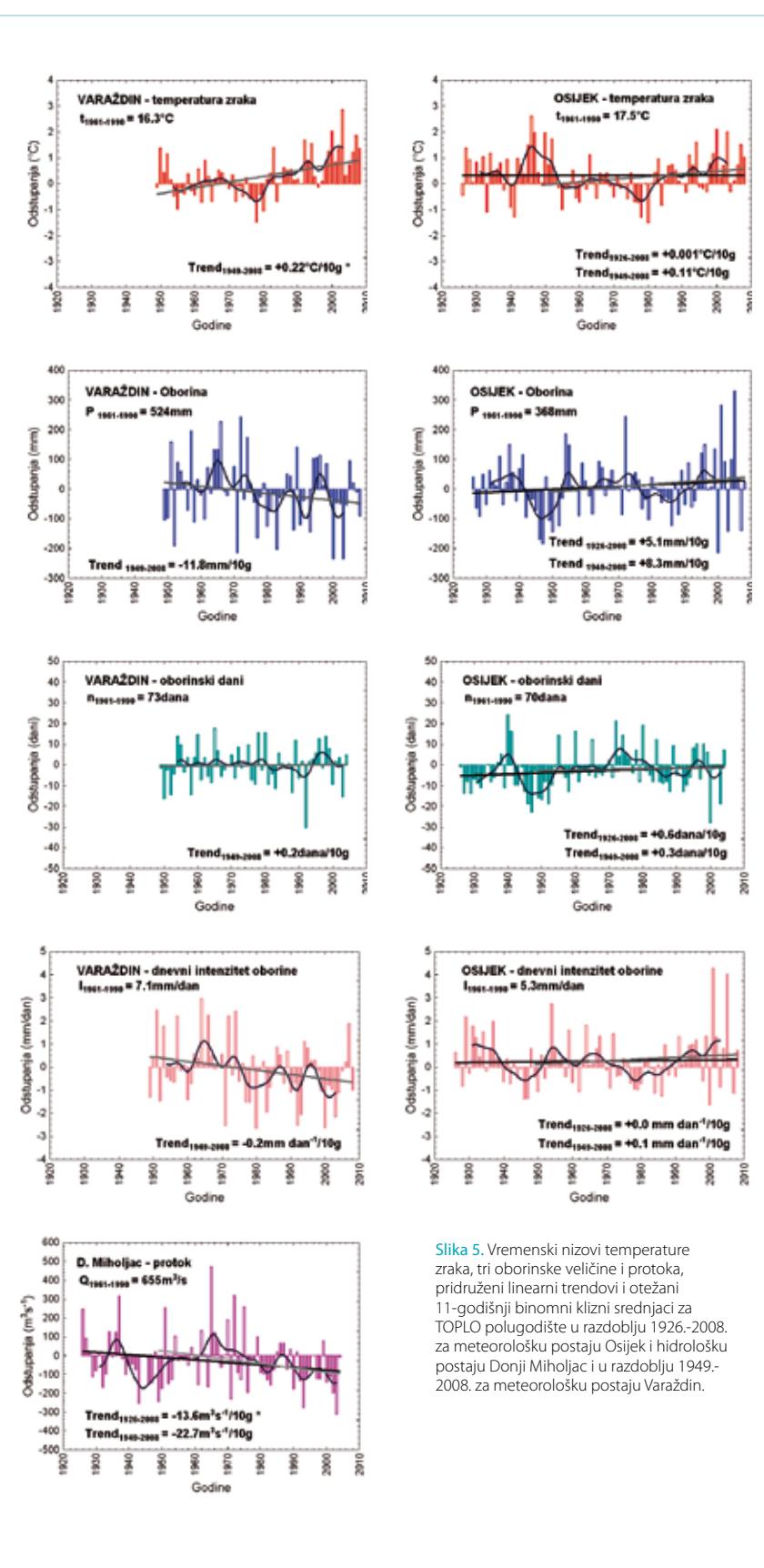
Slika 4: Test za progresivni trend: niz unaprijed $u(t)$ (crveno) i niz unazad $u'(t)$ (plavo) za vremenske nizove promatranih klimatskih veličina koje prema Mann-Kendallovom testu za trend imaju statistički značajan trend na 5%-noj razini značajnosti.

3. REZULTATI

Na hrvatskom dijelu sliva Drave prisutno je zatopljenje, koje se od onog zapaženog od početka 20. stoljeća nastavlja i u prvoj dekadi 21. st. Od sredine 20. st. do 2008. god. porast srednjih godišnjih temperatura zraka se pojačao, statistički je značajan i podjednakog je intenziteta u gornjem i donjem toku ($+0,22^{\circ}\text{C}/10\text{g}$) (slika 3 i 4). Prema Sneyersovom progresivnom testu za trend zatopljenje započinje 1997., a značajno 2000. Positivan godišnji trend temperature zraka rezultat je zatopljenja u oba polugodišta. Ono je jače i statistički signifikantno u gornjem toku i podjednakih iznosa u oba polugodišta (Varaždin: $t_{TP} = +0,22^{\circ}\text{C}/10\text{g}$ i $t_{HP} = +0,21^{\circ}\text{C}/10\text{g}$) (slika 5 i 6). U donjem toku trend temperature zraka je u oba polugodišta manje izražen (Osijek: $t_{TP} = +0,11^{\circ}\text{C}/10\text{g}$ i $t_{HP} = +0,16^{\circ}\text{C}/10\text{g}$).

Kod oborina zapaža se ranije spomenuto svojstvo oborinskih promjena, a to je prostorna heterogenost. Duž toka Drave nije prisutan statistički značajan trend količina oborine. Varaždin ima trend smanjenja godišnjih količina ($P_g = -21,2\text{mm}/10\text{g}$), a Osijek blagi porast ($P_g = +2,9\text{mm}/10\text{g}$) (slika 3). U toplom polugodištu promjene su istog smjera kao i godišnje (slika 5), dok se u hladnom polugodištu na oba područja oborina smanjuje (slika 6).

Broj oborinskih dana ima negativan trend u hladnom polugodištu (Varaždin: $-2,5 \text{ dana}/10\text{g}$ i Osijek: $-2,0 \text{ dana}/10\text{g}$) i značajno se smanjuje od 1980-ih (od 1981. u Osijeku i 1988. u Varaždinu) (slika 4 i 6) i uz vrlo blago povećanje u toplom polugodištu (slika 5) doprinosi negativnom godišnjem trendu učestalosti oborine (slika 3).



Slika 5. Vremenski nizovi temperature zraka, tri oborinske veličine i protoka, pridruženi linearni trendovi i otežani 11-godišnji binomni klizni srednjaci za TOPLO polugodište u razdoblju 1926.-2008. za meteorošku postaju Osijek i hidrološku postaju Donji Miholjac i u razdoblju 1949.-2008. za meteorošku postaju Varaždin.

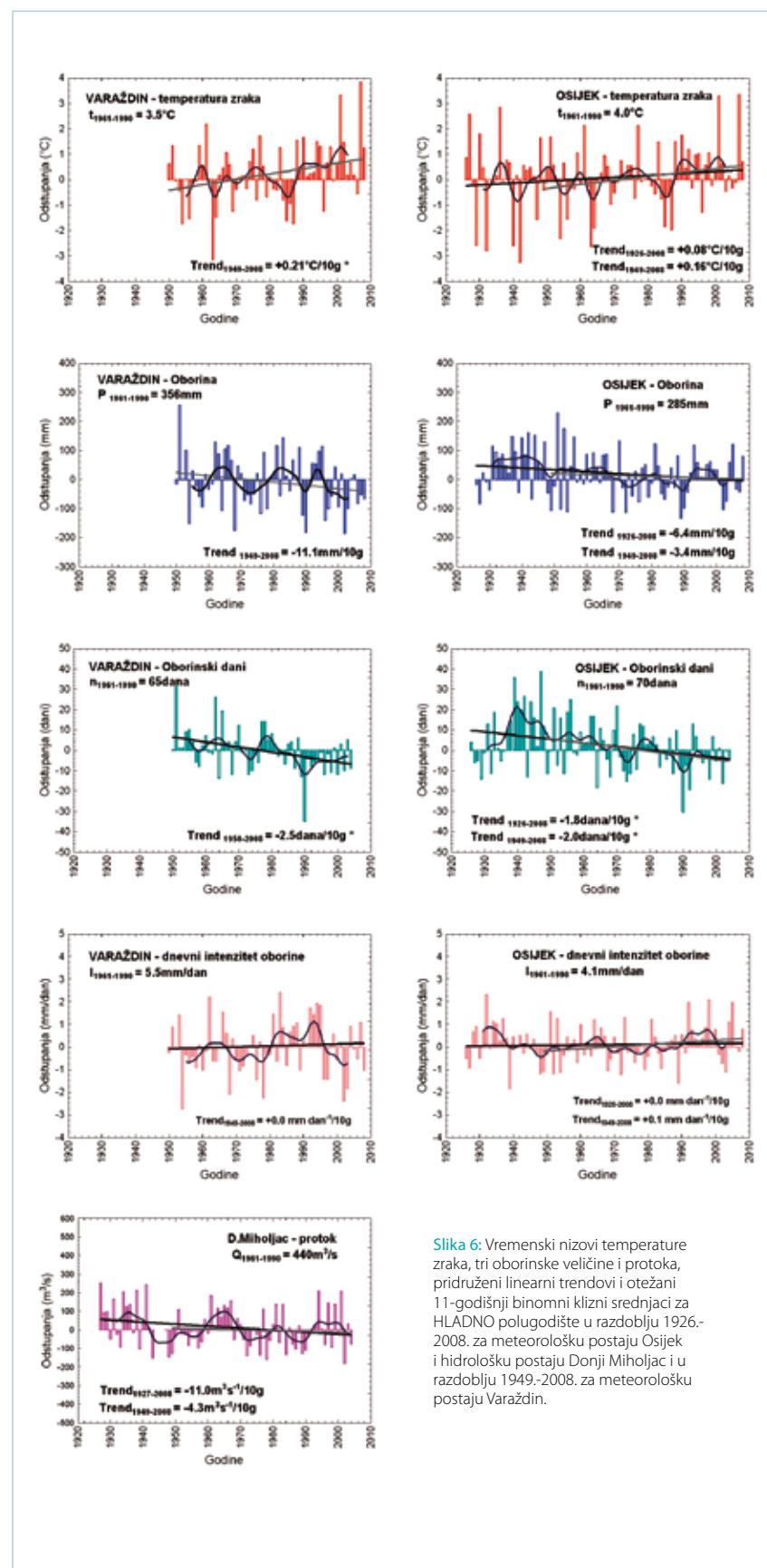
Dnevni intenzitet oborine, rezultat izračuna omjera količina oborine i broja oborinskih dana, nema gotovo nikakav trend.

Srednji godišnji protok pokazuje statistički značajan trend smanjenja u oba promatrana razdoblja ($Q_{G1926-2008} = -11,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10g$ i $Q_{G1949-2008} = -13,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10g$)

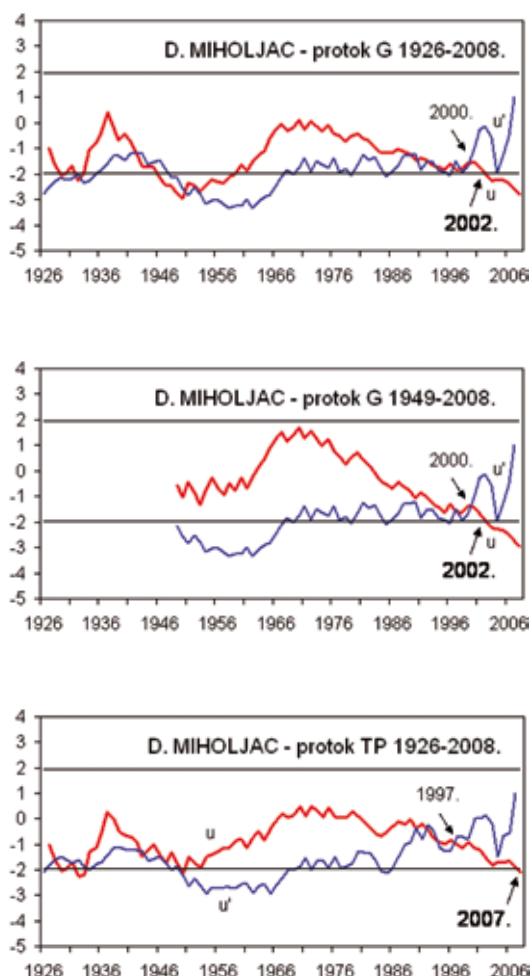
i to od 2000. godine (slika 3 i 7). To je rezultat opadajućeg trenda protoka u oba polugodišta za oba razdoblja

($Q_{TP1926-2008} = -13,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10g$, $Q_{TP1949-2008} = -22,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10g$, $Q_{HP1927-2008} = -11,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10g$ i $Q_{HP1949-2008} = -4,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10g$

(slika 5 i 6). Pri tome trend smanjenja srednjih protoka toplog polugodišta statistički je značajan i javlja se od 1997. (slika 7). U radu Bonacci i Oskoruš (2008.) također je utvrđen opadajući trend srednjih godišnjih protoka u dugogodišnjem razdoblju 1926.-2006. Na temelju vizualne RAPS metode oni uočavaju opadajući trend od 1971. godine. Napominju da se to djelomično može povezati s početkom rada tri hrvatske hidroelektrane (HE Varaždin 1975., HE Čakovec 1982. i HE Dubrava 1989.) kao i slovenske HE Zlatoličje, a da se istovremeno ne smiju zanemariti utjecaji klimatskih promjena i varijabilnosti. Razlike koje se javljaju u godini od koje počinje značajna promjena trenda u ova dva rada, rezultat je primjenjenih metoda. Prema autorima RAPS metode (Garbrecht i Fernandez, 1994.), pristup vizualizacijom pomoću RAPS metode može koristiti za preliminarno vizualno ispitivanje vremenskog niza, kako bi se dobio osjećaj za podatke i/ili dalje usmjerilo na kasnije statističke testove i analize. Progresivni test za trend (Sneyers, 1990.), primjenjen u ovom radu, testira smjer promjene i ukazuje na početak statistički značajne promjene trenda.

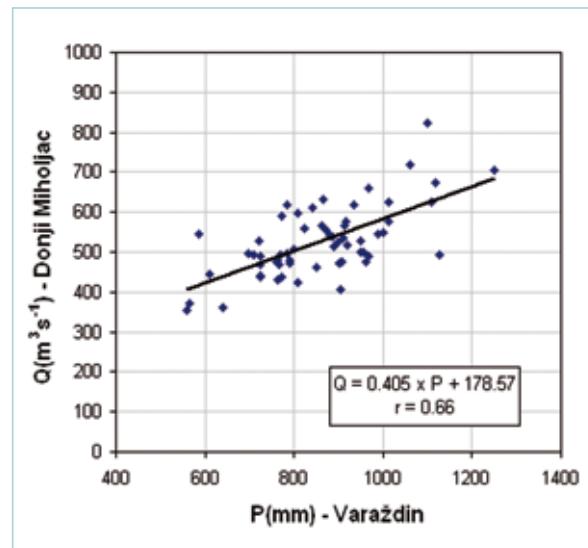


Slika 6: Vremenski nizovi temperature zraka, tri oborinske veličine i protoka, pridruženi linearni trendovi i otežani 11-godišnji binomni klizni srednjaci za HLADNO polugodište u razdoblju 1926-2008, za meteorološku postaju Osijek i hidrološku postaju Donji Miholjac 1949-2008, za meteorološku postaju Varaždin.

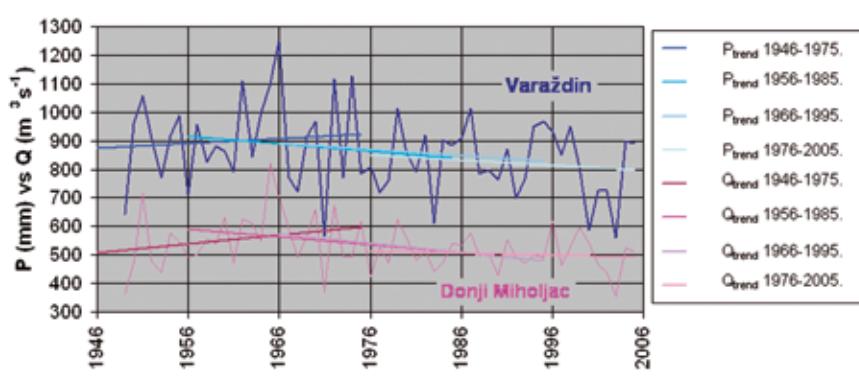


Slika 7: Test za progresivni trend: niz unaprijed $u(t)$ (crveno) i niz unazad $u'(t)$ (plavo) za vremenske nizove srednjih protoka koji prema Mann-Kendallovom testu za trend imaju statistički značajan trend na 5%-noj razini značajnosti.

Analiza trenda uzastopnih 30-godišnjih podrazdoblja, čiji je početak pomican za 10 godina, ukazuje na paralelno izmjenjivanje pozitivnih i negativnih trendova godišnjih količina oborine (Varaždin) i protoka (Donji Miholjac) (slika 8). Tijekom cijelog promatranog razdoblja prisutna je velika i istosmjerna međugodišnja varijabilnost obje veličine. Utjecaj oborinskog parametra na protok procijenjen je jednostavnom linearnom regresijom između srednjih godišnjih količina oborine u Varaždinu i srednjih godišnjih protoka kod Donjeg Miholjca (Wilks, 2006.). Izračun je dao pozitivan odnos i grafički prikaz nalazi se na slici 9. Koeficijent linearne korelacije iznosi 0,66 i za niz od 60 parova podataka daje statistički značajnu vezu na razini $\alpha=0,05$. Prema vrijednosti koeficijenta determinacije $R^2=0,4367$ slijedi da se 44 posto varijabilnosti protoka može objasniti varijabilnošću oborine.

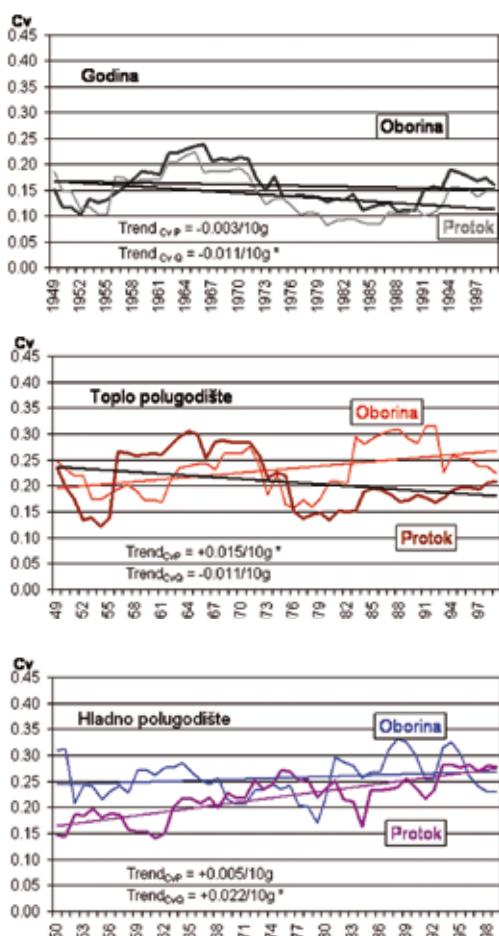


Slika 9: Odnos godišnjih količina oborine (P) u Varaždinu i srednjih godišnjih protoka (Q) kod Donjeg Miholjca s pravcem regresije i koeficijentom korelacije (r) u razdoblju 1949.-2008.

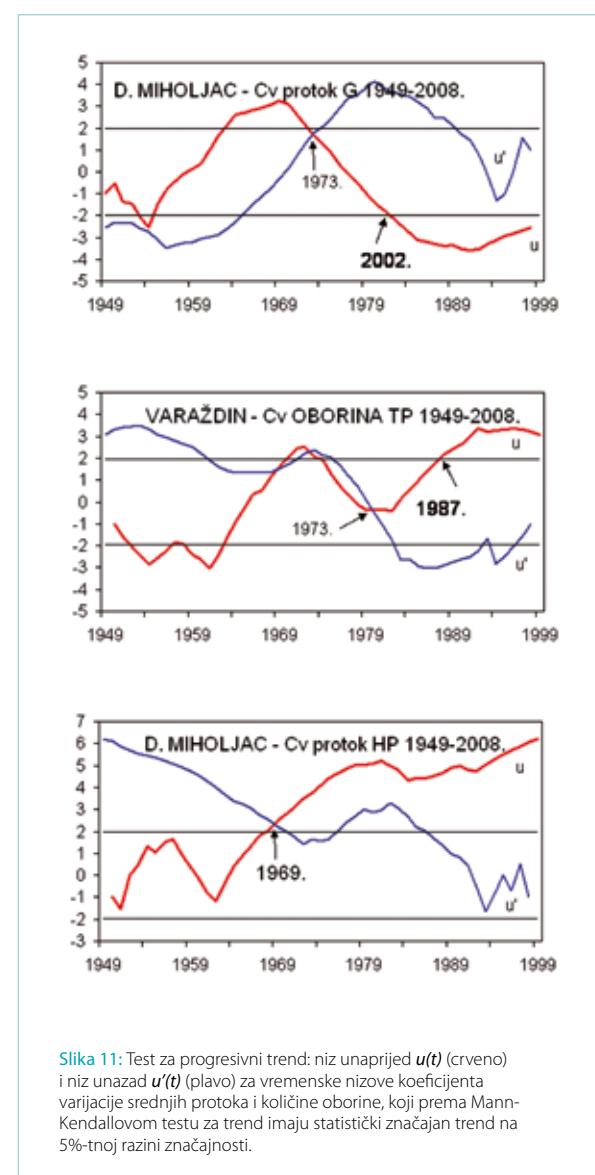


Slika 8: Višedekadni trendovi godišnje količine oborine u Varaždinu i protoka u Donjem Miholjcu.

Količina oborine, kao i srednji protok, pokazuju veliku vremensku varijabilnost. Prema vremenskim nizovima koeficijenta varijacije za 10-godišnje klizne intervale u razdoblju 1949.-2008., varijabilnost godišnje oborine u Varaždinu kreće se od 10 posto do 24 posto i srednjih godišnjih protoka kod Donjeg Miholjca od 8 posto do 22 posto. (slika 10). Kod godišnjih količina oborine u Varaždinu prisutan je neznatan trend smanjenja varijabilnosti (-0,3 %/10g). Međutim, negativan trend varijabilnosti srednjih godišnjih protoka kod Donjeg Miholjca (-1,1 %/10g), koji počinje 1973. godine, postaje statistički značajan 2002. (slika 11). U toploj polugodištu varijabilnost količina oborine se povećava od 1973. i statistički značajno od 1987., ali to se ne odražava na varijabilnost protoka. Dapače, u toploj polugodištu smanjuje se varijabilnost protoka (-1,1 %/10g), što ukazuje na neke druge čimbenike koji utječu na režim protoka. To se vjerojatno



Slika 10: Vremenski nizovi koeficijenta varijacije za 10-godišnje klizne intervale za godinu (G), hladno polugodište (HP) i toplo polugodište (TP) i pripadni linearni trendovi za količine oborine u Varaždinu i srednje protoke u Donjem Miholjcu u razdoblju 1949.-2008. Zvezdica označava značajne trendove na 5% razini.



Slika 11: Test za progresivni trend: niz unaprijed $u(t)$ (crveno) i niz unazad $u'(t)$ (plavo) za vremenske nizove koeficijenta varijacije srednjih protoka i količine oborine, koji prema Mann-Kendalllovom testu za trend imaju statistički značajan trend na 5%-troj razini značajnosti.

može pripisati regulaciji protoka izgradnjom akumulacija i brana u gornjem toku Drave. Na krivulji vremenskog niza varijabilnosti protoka uočava se nagli pad, a zatim manje promjene u dekadnim vrijednostima koeficijenta varijacije od dekade 1971.-1980. u kojoj je izgrađena prva hidroelektrana. U hladnom polugodištu vremenska varijabilnost količina oborine raste s uočljivijom međudekadnom promjenjivošću u drugom dijelu promatranog razdoblja. Istovremeno je prisutan trend porasta varijabilnosti srednjih protoka (+2,2 %/10g), statistički značajan od 1969. (slika 11).

4. ZAKLJUČAK

U radu su analizirane vremenske promjene klimatskih veličina (temperature i oborine) i srednjih protoka u donjem toku rijeke Drave u Hrvatskoj, pomoću analize trenda vremenskih nizova godišnjih i polugodišnjih vrijednosti navedenih parametara i nizova koeficijenta varijacije kao mjere vremenske promjenjivosti.

Na hrvatskom dijelu sliva Drave prisutno je zatopljenje, koje se od onog zapaženog, tijekom 20. stoljeća, nastavlja i u prvoj dekadi 21. st. Od sredine 20. st. do 2008. godine porast srednjih godišnjih temperatura zraka se pojačao, statistički je značajan i podjednakog je intenziteta u gornjem i donjem toku. Duž toka Drave nije prisutan statistički značajan trend količina oborine, koji prema smjeru nije koherentan; trend smanjenja godišnjih količina prisutan je u Varaždinu, a blagi porast u Osijeku. U toplom polugodištu promjene su istog smjera kao i godišnje, dok se u hladnom polugodištu na oba područja oborina smanjuje. Srednji godišnji protok pokazuje statistički značajan trend smanjenja, kao rezultat opadajućeg trenda protoka u oba polugodišta za oba razdoblja (1926.-2008. i 1949.-2008.). Linearna regresija između srednjih godišnjih količina oborine u Varaždinu i srednjih godišnjih protoka kod Donjeg Miholjca je pozitivna i prema vrijednosti koeficijenta determinacije slijedi da se 44 posto varijabilnosti protoka može objasniti varijabilnošću oborine. Tijekom promatranog razdoblja od sredine 20. stoljeća prisutna je velika i uglavnom istosmjerna međugodišnja varijabilnost obje veličine.

Velika varijabilnost godišnjih količina oborine i srednjeg protoka može se vidjeti iz raspona koeficijenta varijacije: 10 posto do 24 posto za količine oborine i 8 posto do 22 posto za protoke. U toplom polugodištu varijabilnost količina oborine se statistički značajno povećava, ali to se ne odražava na varijabilnost protoka. Dapače, u toplom polugodištu smanjuje se varijabilnost protoka. To se jednim dijelom može pripisati regulaciji protoka izgradnjom akumulacija i brana u gornjem toku Drave, kao i varijabilnošću svih ostalih hidroloških parametara na slivu, evapotranspiracije, infiltracije i površinskog otjecanja, koji pak ovise o meteorološkim uvjetima i još više o količini vode u tlu, odnosno "ispunjenošći" sustava. U hladnom polugodištu vremenska varijabilnost količina oborine raste s uočljivom međudekadnom promjenjivošću u drugom dijelu promatranog razdoblja. Istovremeno je prisutan i značajan trend porasta varijabilnosti srednjih protoka. Ovakve promjene polugodišnjih vrijednosti rezultirale su neznatnim trendom smanjenja varijabilnosti godišnjih količina oborine u Varaždinu, ali statistički značajnim negativnim trendom varijabilnosti srednjih godišnjih protoka kod Donjeg Miholjca.

ZAHVALA

Ovo istraživanje dio je znanstvenog projekta *Klimatske varijacije i promjene i odjek u područjima utjecaja* (004-1193086-3035) Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. ■

LITERATURA

- Bonacci, O., Trninić, D., Roje-Bonacci, T. (2008.): Analysis of the water temperature regime of the Danube and its tributaries in Croatia. *Hydrological Processes*, 22(7), 1014–1021.
- Bonacci, O., Trninić, D., Roje-Bonacci, T. (2008.): Analiza odnosa temperature zraka i vode na nekoliko većih rijeka u kontinentalnome dijelu Hrvatske. *Hrvatske vode*, 16(62), 7–19.
- Bonacci, O., Oskoruš, D. (2008.): The influence of three Croatian hydroelectric power plants operation on the river Drava hydrological and sediment regime. U: *XXIVth Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management* (ur. M. Brilly i M. Šraj), Slovenian National Committee for the IHP UNESCO (ISBN: 978-961-91091-2-1), Ljubljana, Slovenija.
- Böhm, R., Auer, I., Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T. & Schöner, W. (2001.): Regional temperature variability in the European Alps: 1760–1998 from homogenized instrumental time series. *Int. J. Climatol.* 21, 1779–1801.
- Gajić-Čapka, M. i Zaninović, K. (2004.): Klimatske prilike slivova Save, Drave i Dunava. *Hrvatske vode*, 49 (12), 297–312.
- Gajić-Čapka, M., Cesarec, K. (2008.): Trends and variability in precipitation and discharge in the Drava River basin, Croatia. *HydroChange 2008, Hydrological changes and managements from headwaters to the ocean*, October 1–3, 2008, Kyoto, Japan, CD, P01-07.
- Garbrecht, J., Fernandez, G.P. (1994.): Visualization of trends and fluctuations in climate records. *Water resources Bulletin*, 30(2), 297–306.
- IPCC (2007.): *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ur. Core Writing Team,

- Pachauri, R.K., Reisinger, A.). IPCC, Geneva, Switzerland.
- Mitchel, J. M. Jr., Dzerdzevskii, B., Flohn, H., Hofmeyr, W.L., Lamb, H.H., Rao, K.N., Wallén, C.C. (1966.): Climatic Change (Report of a working group of the Commission for Climatology). *WMO Tech. Note No. 79*.
- MZOPUG (2006.): Nacionalno izvješće Republike Hrvatske prema okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC), 6.2. Opažene klimatske promjene u Hrvatskoj: 82–86.
- Pandžić, K., Trninić, D., Likso, T., Bošnjak, T. (2008.): Long-term variations in water balance components for Croatia. *Theor. Appl. Climatol.* 95(1-2), 39–51.
- Sneyers, R., (1990.): On the Statistical Analysis of Series of Observations. *WMO Tech. Note No. 143*. Geneve, WMO.
- Vučetić, V., Cesarec, K. (2009.): Research of climate change in the Croatian lowland in the frame of the COST Action 734. U: *Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions* (ur. K. Richardson), Copenhagen, Denmark.
- Wilks, D. S. (2006.): *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Second Edition, Academic Press, London.
- Zaninović, K. i Gajić-Čapka, M. (2000.): Changes in Components of the Water Balance in the Croatian Lowlands. *Theor. Appl. Climatol.* 65(1-2), 111–117.

TREND AND VARIABILITY IN DISCHARGE AND CLIMATE VARIABLES IN THE CROATIAN LOWER DRAVA RIVER BASIN

Abstract. Changes in hydrological values as a result of climate change directly influence people and ecosystems. This paper investigates changes in the annual and half-year values of mean air temperature and precipitation parameters and mean discharges in the Drava River basin in Croatia according to the data of the meteorological stations Varaždin (1949–2008) and Osijek (1926–2004) as well as the hydrological station Donji Miholjac, for which there are existing discharge data since 1926. The objective is to evaluate the trends and variations in the 20th and at the beginning of the 21st century in climate, which at the global and regional scales show warming up, while precipitation trends are spatially less coherent and do not show the same or similarly intense changes (IPCC, 2007). The linear trends in the mean annual air temperatures show increase in the period 1949–2008, which is statistically significant according to the non-parametric Mann-Kendall test with a 5% significance level in the area of the Upper Drava annually and semi-annually (Varaždin) and the Lower Drava annually (Osijek). According to the Sneyers progressive trend test, the warming up starts at the beginning of the second half of the 1990's, and is significant from the beginning of the 21st century. Simultaneously, with regards to precipitation quantities, there is no similar trend or the same intensity present in the Upper and the Lower Drava, with the determined trends not statistically significant. The number of precipitation days significantly decreases in the cold half-year in the 1980's (since 1981 in Osijek and since 1988 in Varaždin), and, with a mild increase in the warm half-year, contributes to the negative annual trend. A decrease in the frequency of precipitation is accompanied by a decrease in their variability. The mean annual discharge at Donji Miholjac shows a statistically significant decreasing trend in both monitored periods and is the result of a decreasing trend in both periods, whereas the decreasing trend in the mean discharges in the warm half-year is statistically significant and appears since 1997. The trend analyses of the successive 30-years sub-periods, with the beginnings shifted by ten years, indicate parallel exchanges of positive and negative annual precipitation trends (Varaždin) and discharges (Donji Miholjac). In all monitored series, there is a present temporal variability. The trend analysis of the variation coefficient series for 10-year intervals indicates a significantly increased variability of precipitation quantities in the warm half-year in Varaždin. At the same time, there is a present significant decrease in the variability of the mean annual discharges and a significant increase in the variability of the mean discharges in the cold half-year for the Drava at Donji Miholjac, which is a consequence of the natural changes and anthropogenic influences.

Key words: climate change, discharge, trend, variability, the Drava River, Croatia

DER TREND UND DIE VARIABILITÄT DER DURCHFLÜSSE UND KLIMAGRÖSSEN IM EINZUGSGEBIET DES FLUSSES DRAU

Zusammenfassung. Die Veränderungen der hydrologischen Größen, die durch die Klimaveränderungen verursacht werden, haben einen unmittelbaren Einfluss auf Menschen und Ökosysteme. In diesem Beitrag werden die zeitlichen Veränderungen von Jahres- und Halbjahreswerten der Luftmitteltemperaturen und Niederschlagsparamater sowie des Mitteldurchflusses im Drau-Einzugsgebiet in Kroatien untersucht anhand von Angaben der meteorologischen Stationen Varaždin (1949-2008) und Osijek (1926-2004) und der hydrologischen Station Donji Miholjac, die die Angaben zu den Durchflüssen seit 1926 hat. Das Ziel ist die Trends und Variationen im Laufe des 20. und am Anfang des 21. Jahrhunderts zu bewerten, in der Zeit der globalen und regionalen Klimaerwärmung, wenn die Niederschlagstrends räumlich weniger kohärent sind und weder Änderungen in gleicher Richtung noch ungefähr gleiche Intensität von Veränderungen aufweisen (IPCC, 2007). Die linearen Trends der mittleren Jahreslufttemperatur weisen auf die Erwärmung im Zeitraum von 1949-2008 hin, was nach dem nonparametrischen Mann-Kendall-Test auf dem Signifikanzniveau von 5% auf dem Gebiet des Oberlaufes der Flusses für die Jahres- und Halbjahreswerte (Varaždin) und auf dem Gebiet des Unterlaufes der Flusses für die Jahreswerte (Osijek) statistisch signifikant ist. Nach dem Sneyers-Trendtest beginnt die Erwärmung Anfang der zweiten Hälfte der 1990er Jahre und wird seit dem Anfang des 21. Jahrhunderts stärker. Gleichzeitig zeigt sich bei den Niederschlagsmengen im Ober- und Unterlauf weder der Trend in der gleichen Richtung noch in der gleichen Intensität, und die festgestellten Trends sind statistisch nicht signifikant. Die Anzahl der Niederschlagstage verringert sich im kalten Halbjahr in den 1980er Jahren (seit 1981 in Osijek und seit 1988 in Varaždin) und trägt mit einer kleinen Erhöhung im warmen Halbjahr zum negativen Jahrestrend bei. Die Verminderung der Häufigkeit von Niederschlagstagen ist auch mit der Verringerung der Variabilität von Niederschlagstagen verbunden. Der mittlere Jahresdurchfluss bei Donji Miholjac zeigt einen statistisch signifikanten Trend der Verringerung in beiden Zeiträumen und ergibt sich aus dem Verringerungstrend in beiden Halbjahren für beide Zeiträume, wobei der seit 1997 eingetretene Trend der Verminderung von mittleren Durchflüssen im warmen Halbjahr statistisch signifikant ist. Die Trendanalyse der aufeinanderfolgenden 30-jährigen Unterzeiträume, deren Beginn um 10 Jahre verschoben worden ist, weist auf ein paralleles Abwechseln von positiven und negativen Trends der Niederschlagsjahresmengen (Varaždin) und Jahresdurchflüsse (Donji Miholjac) hin. In allen beobachteten Reihen ist eine zeitliche Variabilität ausgeprägt. Die Analyse des Trends der Reihen von Variationskoeffizienten für 10-jährige Zeiträume wiest auf eine wesentliche Erhöhung der Variabilität von Niederschlagsmengen im warmen Halbjahr in Varaždin hin. Gleichzeitig zeigt sich eine wesentliche Verminderung der Variabilität von mittleren Jahresdurchflüssen und eine wesentliche Erhöhung der Variabilität von mittleren Durchflüssen des Flusses Drau bei Donji Miholjac im kalten Halbjahr, was die Folge von natürlichen Veränderungen und anthropogenen Auswirkungen ist.

Schlüsselwörter: Klimaveränderungen, Durchfluss, Trend, Variabilität, Fluss Drau (Kroatien)