

Izvorni znanstveni članak | Original Scientific Paper | UDK 628.147.2
Primljeno (Received): 28. 5. 2013.; Prihvaćeno (Accepted): 26. 11. 2013..

DNEVNE I VIŠEDNEVNE OBORINE U SREDNJEM I DONJEM TOKU RIJEKE DRAVE - KLIMATSKE KARAKTERISTIKE I PROMJENE

dr. sc. Marjana Gajić-Čapka
Državni hidrometeorološki zavod
Grič 3, 10000 Zagreb
capka@cirus.dhz.hr

Cilj rada je analiza dnevnih i višednevnih količina oborine u slivu Drave na meteorološkim postajama Varaždin i Osijek u razdoblju 1949.-2009., koja je primjenjiva u vodnom i energetskom gospodarstvu. Rad sadrži analizu vjerojatnosti dnevnih količina pomoću gama razdiobe (1961.-2000.), analizu ekstremnih vrijednosti godišnjih maksimuma dnevnih i višednevnih (2-dnevnih i 5-dnevnih) količina pomoću opće razdiobe ekstremnih vrijednosti (1961.-2000.), te analizu trenda odabranih oborinskih parametara i njihove međugodišnje varijabilnosti (koeficijent varijacije) pomoću linearnog trenda i diskusije njihovog pojavljivanja u odnosu na procjenu očekivane vrijednosti za 20-godišnje povratno razdoblje (1949.-2009.). Tijekom godine je varijabilnost dnevnih količina velika i podjednaka na području Varaždina i Osijeka. Češće je pojavljivanje dnevnih količina oborine manjih od srednjaka. Za istu vjerojatnost mogu se očekivati veće dnevne količine u Varaždinu, nego u Osijeku. Godišnji maksimumi najčešći su u toplom dijelu godine, a u hladnom su rijetki ili se uopće ne javljaju. Razlike procjena očekivanih vrijednosti između Varaždina i Osijeka za različita povratna razdoblja smanjuju se s povećanjem povratnog razdoblja i rastu od 1-dnevnih, preko 2-dnevnih do 5-dnevnih maksimuma. Trend smanjenja prisutan je kod dnevnih i višednevnih godišnjih maksimuma oborine u gornjem toku Drave, odnosno sjeverozapadne Hrvatske (Varaždin), dok u donjem toku Drave, odnosno istočne Hrvatske nisu prisutne promjene niti po intenzitetu niti učestalosti sva tri promatrana oborinska parametra (1-dnevne, 2-dnevne i 5-dnevne količine) tijekom promatranog razdoblja.

Ključne riječi: dnevne i višednevne količine oborine, gama razdioba, opća razdioba ekstremnih vrijednosti, trend, varijabilnost

1 UVOD

Analiza ekstremnih vrijednosti klimatskih veličina u klimi koja se mijenja zauzima posebno mjesto u podlogama koje se koriste u odlučivanju o prilagodbi na klimatske promjene u gospodarstvu i društvu. U tom segmentu Svjetska meteorološka organizacija (WMO) je inicirala rad ekspertnog tima¹ na preporukama o istraživanju klimatskih promjena i ekstrema koristeći indekse. Indeksi oborinskih ekstrema računaju se iz dnevnih količina oborine (Rd) i dijele se u dvije glavne kategorije: indeksi koji se temelje na apsolutnim pragovima i oni koji se temelje na percentilima. Prva kategorija odnosi se na broj dana u kojima je pala količina oborine za zadani prag (npr. indeks sušnih dana koji uključuje sve dane s $Rd < 1,0$ mm), dok se druga kategorija indeksa temelji na oborinskim klimatološkim percentilima koji su određeni iz uzorka svih dana s $Rd \geq 1,0$ mm. Vrijednosti apsolutnih ekstrema, kao što je najveća petodnevna količina oborina u godini, često je povezana s ekstremnim događajima koji utječu na društvo i prirodni okoliš. U svakom klimatskom režimu, priroda i čovjek su se prilagodili na lokalne karakteristike klimatske varijabilnosti i lokalna infrastruktura je konstruirana da podnese lokalne ekstreme. Trendovi indeksa su stoga relevantni za usporedbu, na primjer, promjena u sustavima odvodnje i kanalizacije na različitim lokacijama. Nadalje, trendovi utvrđeni na dugogodišnjim mjerenim podacima omogućuju usporedbu sa simuliranim trendovima u sadašnjoj klimi i ocjenu promjena u budućoj klimi.

U ovom radu statističko-klimatološka analiza bavi se dnevnim i višednevnim količinama oborine i njihovim godišnjim ekstremima koji spadaju u vrlo rijetke događaje. Primjena teorije ekstremnih vrijednosti (WMO, 1989.; Faragó & Katz, 1990.; Coles, 2001.) dopunjuje znanja o intenzitetu i učestalosti ovih rijetkih oborinskih događaja koji leže na krajevima njihove razdiobe vjerojatnosti, npr. koji se događaju jednom u 20 ili 50 godina. Međutim, u nekim inženjerskim primjenama zahtijevaju se procjene događaja koji su bez presedana u raspoloživim podacima, npr. događaji koji se javljaju jednom u sto ili tisuću godina (ekstremni kvantili statističke razdiobe). I dok su nizovi motrenja dugi samo oko 50 godina, procijenjene vrijednosti za povratna razdoblja dulja od 100 godina treba uzeti s oprezom. Uvođenje parametara razdiobe ekstrema u analize klimatskih promjena preporučeno je i diskutirano u radu Klein Tank i dr. (2009.), a na sekularnim nizovima indeksa oborinskih ekstrema u Hrvatskoj primijenjeno je u radu Gajić-Čapka i Cindrić (2011.).

2 PODATCI I METODA

U ovoj analizi korišteni su podatci dnevnih količina oborine s glavnih meteoroloških postaja Varaždin ($H = 167$ m nm, $\varphi = 46^{\circ} 16' 58''$ N, $\lambda = 16^{\circ} 21' 50''$ E) i Osijek ($H = 328$ m nm, $\varphi = 45^{\circ} 32' N$, $\lambda = 18^{\circ} 44' E$) u razdoblju 1949.-2009. Oborinske prilike su ispitane pomoću razdiobe učestalosti dnevnih količina oborine za godinu pridruživanjem teorijske razdiobe empiričkim podacima i analizom ekstremnih vrijednosti primijenjenoj na godišnje maksimalne dnevne, dvodnevne i petodnevne količine. Pojava ekstremnih količina jedan je od osnovnih rizičnih čimbenika sigurnosti i planiranja dobrog i ekonomičnog rada hidrotehničkih sustava.

Dnevne količine oborine se dobivaju svakodnevnim mjerenjima u redovnoj mreži meteoroloških postaja u jutarnjem klimatološkom terminu mjerenja u 7 sati po mjesnom vremenu i odnose se na količinu palu u prethodna 24 sata. Ukoliko je oborina pala u tragovima, za količinu oborine zapisuje se 0,0 mm. Izmjerljiva količina oborine odnosi se na količine jednake ili veće od 0,1 mm. Ovisno o korisnicima i njihovim potrebama, mogu se analizirati različite kategorije dnevnih količina oborine. Standardni klimatološki pragovi su 0,1 mm, 1,0 mm, 5,0 mm, 10,0 mm, 20,0 mm, 50,0 mm. U ovoj analizi razdioba (vjerojatnosti pojavljivanja) dnevnih količina oborine razmatraju se nizovi podataka koji obuhvaćaju sve dnevne količine oborine $R \geq 0,1$ mm u razdoblju 1961.-2000. za obje promatrane lokacije; Varaždin i Osijek.

Nizovima dnevnih količina oborine pridružena je gama razdioba koja je ograničena najnižom vrijednošću (nula) (slika 1). Teorijska funkcija vjerojatnosti gama razdiobe dobro opisuje razdiobu učestalosti količina oborine (Thom, 1966.; Vuković, 1996.). Parametri oblika i skale su procijenjeni metodom maksimalne vjerojatnosti. Upotrebom dobivenih procjena parametara gama razdiobe proračunate su kumulativne vjerojatnosti gama razdiobe (percentili) za svaku izmjerenu vrijednost dnevne količine oborine Rd . Vrijednost percentila dovoljno detaljno opisuje izvanrednost određene opažene vrijednosti nekog meteorološkog elementa na promatranoj lokaciji, pa se koristi pri ocjeni izvanrednosti neke pojave u odnosu na prosječne klimatske prilike.

U ovom radu su za Varaždin i Osijek izračunati parametri gama razdiobe dnevnih količina oborine te decili (P10, P20, P30, P40, P50, P60, P70, P80, P90) kao i percentili (tablica 1) koji se koriste kao granične vrijednosti pri određivanju intervala normalnosti pojave (Juras i Juras, 1987.), te su pomoću njih definirane klase kišovitosti oborinskih dana:

$Rd < P2$	oborinski dan ekstremno sušan
$P2 < Rd < P9$	oborinski dan vrlo sušan
$P9 < Rd < P25$	oborinski dan sušan
$P25 < Rd < P75$	oborinski dan u granicama normale
$P75 < Rd < P90$	oborinski dan kišan
$P91 < Rd < P98$	oborinski dan vrlo kišan
$Rd > P98$	oborinski dan ekstremno kišan

1 Expert Team on Climate Change Detection and Indices of the World Meteorological Organisation (Peterson et al., 2001; WMO, 2004), Commission for Climatology (WMO/CCL) and World Climate Research Programme, Climate Variability and Predictability (WCRP/CLIVAR)

Informacija o vjerojatnosti pojavljivanja dnevnih količina oborine po mjesecima proširena je analizom maksimalnih dnevnih, dvodnevni i petodnevni količina oborine koje posebice mogu biti meteorološki rizičan faktor za projektiranje i održavanje hidrotehničkih sustava. Prikazano je pojavljivanje godišnjih maksimuma navedenih količina po mjesecima, što je jedan od faktora racionalnije organizacije sustava obrane od velikih voda tijekom godine, a time i zaštite hidroelektrana i okoliša.

Promatrani oborinski parametri (1-dnevne, 2-dnevne i 5-dnevne količine oborine), koji ukazuju na intenzitet oborinskih ekstrema, jedni su od indeksa oborinskih ekstrema koje je definirao Ekspertni tim za detekciju klimatskih promjena i indekse u okviru aktivnosti Svjetske meteorološke organizacije (Folland et al, 1999.; Peterson et al. 2001.; WMO, 2004.; Klein Tank, 2009.).

Proračun očekivanih ekstremnih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine za različita povratna razdoblja, odnosno vjerojatnosti pojavljivanja, proveden je pomoću opće razdiobe ekstremnih vrijednosti. Rezultati ispitivanja prilagođavanja više razdioba (Gumbelova, Galtonova, Frechetova, Pearson III i log Pearson III) maksimalnim dnevnim količinama oborine u Hrvatskoj istaknuli su opću razdiobu ekstremnih vrijednosti (GEV distribution) (Jenkinson, 1969.; WMO, 1989.; Coles, 2001.) kao najprihvatljiviju (Gajić-Čapka i Čapka, 1997.; Gajić-Čapka, 2000.). U ovom radu u proračunima se koriste nizovi godišnjih maksimuma Varaždina i Osijeka iz razdoblja 1961.-2000. Obzirom na korištenu duljinu niza podataka od 40 godina, realno je koristiti procjene za povratna razdoblja koja nisu dulja od približno dvostruke duljine originalnog niza podataka kako bi se dobile pouzdane procjene (Klein Tank et al., 2009.) i što se može koristiti u projektiranju hidrotehničkih objekata (Sevruk & Geiger, 1981.; Faragó & Katz, 1990.; Gajić-Čapka, 1999.; Durrans & Brown, 2000.).

Za opću razdiobu ekstremnih vrijednosti Jenkinson je dao opći oblik troparametarske razdiobe ekstrema koji zadovoljava postulat stabilnosti (Jenkinson, 1955.):

$$P(x) = \exp\left[-e^{-y(x)}\right] \quad (1)$$

gdje je $P(x)$ vjerojatnost da je godišnji ekstrem najviše jednak x , a $y(x)$ je reducirana varijata:

$$y = -\ln \ln \frac{1}{P(x)} \quad (2)$$

Jenkinsonovo opće rješenje postulata stabilnosti ima oblik:

$$x = x_o + \alpha \frac{1 - e^{-ky}}{k} \quad (3)$$

Veličina x_o je vrijednost koja se može očekivati jednom godišnje uz $y = 0$, α je nagib krivulje (3) u točki $x = x_o$, $y = 0$ i k je parametar zakrivljenosti.

Opće rješenje uključuje sva tri tipa graničnih slučajeva koje su utvrdili Fisher i Tippet (1927.), a koji su određeni pomoću vrijednosti parametra k .

U slučaju $k > 0$ krivulja (3) teži konačnoj vrijednosti

$$x_{\max} = x_o + \frac{\alpha}{k}$$

U slučaju $k = 0$ krivulja (3) ima oblik pravca $x = x_o + \alpha y$ i teži u beskonačnost. Razdioba ekstrema se tada naziva Gumbelovom razdiobom.

U slučaju $k < 0$ krivulja (3) nema gornje granice, a donja asimptota iznosi

$$x_{\min} = x_o - \frac{\alpha}{k}$$

Povratno razdoblje $T(x)$ definirano je kao srednji vremenski razmak koji proteče između dva premašaja vrijednosti x i može se pisati kao:

$$\frac{1}{T} = 1 - P(x) \quad (4)$$

iz čega proizlazi relacija:

$$y = -\ln \ln \frac{T}{T-1} \quad (5)$$

Veza između procijenjenoga ekstrema x i pripadnoga povratnog razdoblja T dana je izrazom:

$$x = x_o + \alpha \frac{1 - \left\{ \ln \left[T / (T-1) \right] \right\}^k}{k} \quad (6)$$

Procjene parametara razdiobe izračunate su metodom maksimalne vjerojatnosti iz uzoraka koji su nizovi izmjerenih godišnjih maksimuma analiziranih oborinskih parametara.

Analiza vremenskih nizova godišnjih maksimalnih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine i koeficijentata varijacije, kao mjere međugodišnje varijabilnosti, provedena je za dugogodišnje razdoblje 1949.-2009. Prva informacija o vremenskim promjenama dobivena je iz linearnog trenda. Statistička signifikantnost trenda ispitana je neparametarskim Mann Kendallovim rang testom za trend (Sneyers, 1990.). Vremenski nizovi koeficijentata varijacije izračunati su za uzastopna 30-godišnja klizna razdoblja s korakom od jedne godine (1949.-1978, 1950.-1979,.....,1981.-2010.). Kako maksimalne dnevne i višednevne oborine spadaju u rijetke događaje, za čiju se vjerojatnost pojavljivanja primjenjuje opća razdioba ekstremnih vrijednosti, daljnja diskusija izmjerenih ekstrema tijekom godina provedena

Tablica 1: Osnovna statistika i parametri razdiobe dnevnih količina oborine – Rd_{min} izmjerena (mm), Rd_{maks} izmjerena (mm), broj podataka (n), srednjak (sr - mm), standardna devijacija (sd - mm), koeficijent varijacije (c_v), koeficijent asimetrije (c_s), parametar oblika (a), parametar skale (b) i vrijednosti percentila (mm) za Varaždin i Osijek. Razdoblje 1961.-2000.

Parametri	Varaždin		Osijek	
	empirička razdioba	gama razdioba	empirička razdioba	gama razdioba
Rd_{min}	0,1		0,1	
Rd_{maks}	131,3		101,2	
n	5470		5491	
sr	6,4	6,4	4,8	4,8
sd	8,9	7,9	6,8	6,2
c_v	1,40	1,24	1,43	1,29
c_s	3,00	2,48	3,54	2,58
a		0,6512		0,5989
b		9,7571		7,9908

Percentili	Varaždin		Osijek		
	Varaždin	Osijek	Varaždin	Osijek	
P90	16,2	12,5	P98	30,3	23,8
P80	10,5	7,9	P91	17,1	13,2
P70	7,3	5,4	P75	8,7	6,5
P60	5,1	3,7	P25	1,1	0,7
P50	3,5	2,5	P9	0,2	0,1
P40	2,3	1,6	P2	0,0	0,0
P30	1,4	1,0			
P20	0,7	0,5			
P10	0,2	0,1			

je u odnosu na jedan od parametara te razdiobe i to 20-godišnju povratnu vrijednost izračunatu prema 61-godišnjem nizu podataka.

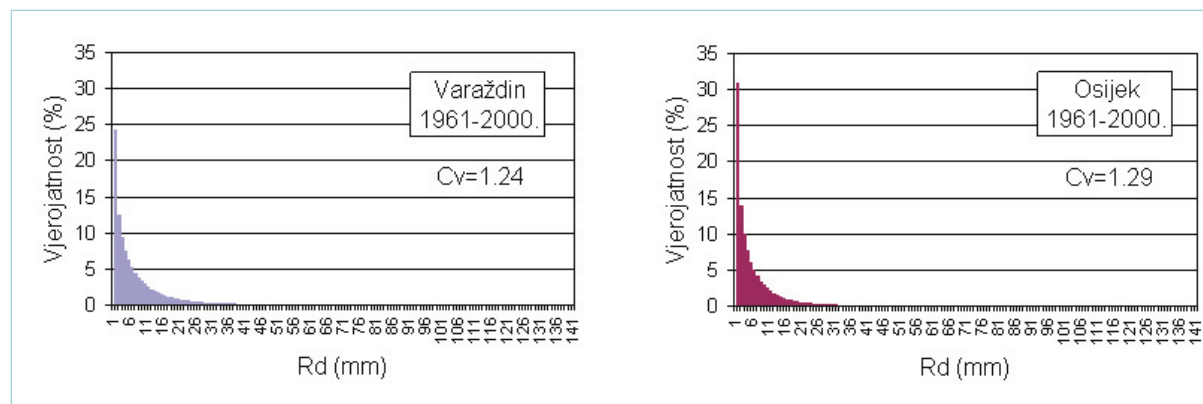
3 REZULTATI

3.1 Dnevne količine oborine

Na gornjem toku sliva Drave u Hrvatskoj, prema podacima Varaždina u razdoblju 1961.-2000., dnevne količine iznosile su do 74,4 mm, osim jedne dnevne količine koja znatno odstupa i iznosi 131,3 mm, a izmjerena je 28.8.1974. U donjem toku, prema podacima Osijeka, pale dnevne količine oborine iznosile su do 101,2 mm (10. 6. 1968.).

Velika varijabilnost dnevnih količina oborine daje veliku asimetriju razdiobe, pa su vrijednosti parametra oblika gama razdiobe a male. Usporedba srednjaka i medijana (P50) ukazuje da je centralna vrijednost smještena od srednjaka prema nižim vrijednostima, što znači da je češće pojavljivanje dnevnih količina oborine manjih od srednjaka. Srednjoj vrijednosti dnevnih količina oborine u Varaždinu pripada percentil P66, a u Osijeku P67, pa je vjerojatnost da dnevna količina oborine ne premaši srednju vrijednost 66 odnosno 67%. Iz tablice 1 mogu se očitati vrijednosti količina oborine za dane percentile, što omogućuje ocjenu kategorije oborinskog dana ili vjerojatnost pojavljivanja neke pale dnevne količine oborine. Prema percentilima gama razdiobe, za istu vjerojatnost mogu se očekivati veće dnevne količine oborine u gornjem toku Drave (Varaždin), nego u donjem (Osijek). Tako npr. za percentil 98 (donja granica ekstremno kišnog dana) razlika iznosi 22%. U Varaždinu su dnevne količine oborine u rasponu od 1,1 mm do 8,7 mm u granicama normalnih vrijednosti, a u Osijeku to su od 0,7 do 6,5 mm. Dani s dnevnim količinama 8,8 - 17,1 mm u Varaždinu i 6,6 - 13,2 mm u Osijeku su u kategoriji kišni, oni s količinama 17,2 - 30,3 u Varaždinu i 13,3 - 23,8 mm u Osijeku u kategoriji vrlo kišni, a s više od 30,3 mm u Varaždinu i više od 23,8 mm u Osijeku (2% slučajeva) u kategoriji ekstremno kišni. Dani u kojima je količina oborine manja od 1 mm predstavljaju sušne dane. Prema izračunima decila može se očekivati da će u 20% slučajeva dnevne količine oborine biti veće od 10,5 mm u Varaždinu i veće od 7,9 mm u Osijeku, te u 10% slučajeva veće od 16,2 mm u Varaždinu i veće od 12,5 mm u Osijeku.

Karakteristika dnevnih količina oborine tijekom godine je vrlo veliki raspon. Prostorna usporedba vremenske promjenjivosti dnevnih količina oborine moguća je pomoću koeficijenta varijacije koji ukazuje, da je prema izmjerenim podacima u Varaždinu i Osijeku, varijabilnost na slivu podjednaka ($c_v = 1,40$ odnosno $c_v = 1,43$), dakle između promatranih lokacija razlikuje se oko 3%.



Slika 1: Gama razdioba dnevnih količina oborine za Varaždin i Osijek. Razdoblje: 1961.-2000.

Tablica 2: Apsolutne maksimalne 1-dnevne (Rd_{maks}), 2-dnevne ($R2d_{maks}$) i 5-dnevne ($R5d_{maks}$) količine oborine (mm) i broj godišnjih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih maksimuma (n) za Varaždin i Osijek. Razdoblje: 1961.-2000.

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	god
Varaždin													
Rd_{maks}	28,3	45,7	51,9	70,3	64,4	70,0	72,5	131,3	63,8	51,8	56,5	39,5	131,3
n		1	1	2	3	4	8	7	6	4	2	2	40
$R2d_{maks}$	37,4	51,1	55,0	80,7	67,2	82,5	110,1	137,6	94,5	76,9	70,0	62,1	137,6
n				1	2	5	10	7	6	4	5		40
$R5d_{maks}$	51,4	71,8	79,9	102,5	96,7	101,9	188,1	197,2	138,9	105,3	103,8	88,6	197,2
n			1	1		3	7	9	3	5	9	2	40
Osijek													
Rd_{maks}	39,3	24,9	30,6	45,4	50,6	101,2	85,7	51,7	66,3	36,6	35	35	101,2
n			2	5	10	9	7	4	1				40
$R2d_{maks}$	65,5	45,4	39,3	50,5	60,8	101,8	90,4	81,1	77,2	39,6	50,3	46,9	101,8
n	1		2	4	12	8	2	4	2	1	1		40
$R5d_{maks}$	82,9	66,4	58,1	58,4	61,6	104,3	130,2	111,3	79,5	64,9	79,1	62,8	130,2
n	1	1	3	3	13	6	6	1	2	2	1		40

3.2. Godišnje maksimalne 1-dnevne, 2-dnevne i 5-dnevne količine oborine

3.2.1 Učestalost pojavljivanja tijekom godine

Godišnje maksimalne dnevne količine oborine predstavljaju najveću dnevnu količinu oborine izmjerenu tijekom pojedine kalendarske godine. Godišnje maksimalne dvodnevne i petodnevne količine oborine izračunate su iz dnevnih količina oborine za dvodnevno i petodnevno razdoblje klizanjem po jedan dan tijekom godine i izdvajanjem najveće količine za pojedinu kalendarsku godinu.

Apsolutne maksimalne 1-dnevne, 2-dnevne i 5-dnevne količine oborine i broj godišnjih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih maksimuma (n) zabilježenih u pojedinom mjesecu u promatranih 40 godina naveden je u **tablici 2** i na **slici 2**. Godišnji maksimumi na području gornjeg toka Drave (Varaždin) najčešće se mogu očekivati u srpnju i kolovozu za sve tri kategorije, s time da se 5-dnevni godišnji maksimum podjednako često javlja i u studenom. U analiziranom razdoblju 2-dnevni i 5-dnevni godišnji maksimumi vrlo su se rijetko ili se uopće nisu javili od prosinca do svibnja. U donjem dijelu sliva

(Osijek) godišnji maksimum za sve tri kategorije najčešće se mogu očekivati od svibnja do srpnja, dok su u hladnom dijelu godine rijetki ili se uopće ne javljaju.

3.2.2 Procjene godišnjih maksimalnih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine

Na osnovi 40-godišnjih nizova (1961.-2000.) izmjerenih godišnjih maksimalnih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine dobivene su teorijske krivulje ekstrema za Varaždin i Osijek:

$$\text{Varaždin } Rd_{maks} = 46.2 + 13.39 (1 - e^{-0.01y}) / (0.01)$$

$$\text{Varaždin } - R2d_{maks} = 57.4 + 18.22 (1 - e^{-0.10y}) / (0.10)$$

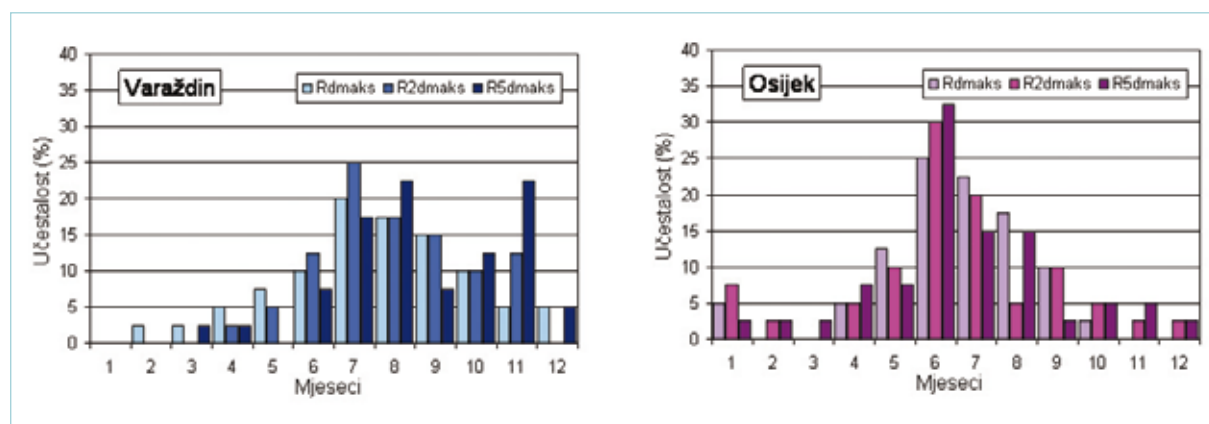
$$\text{Varaždin } - R5d_{maks} = 78.6 + 21.18 (1 - e^{-0.01y}) / (0.01)$$

$$\text{Osijek } - Rd_{maks} = 33.0 + 9.54 (1 - e^{0.22y}) / (-0.22)$$

$$\text{Osijek } - R2d_{maks} = 39.1 + 11.4 (1 - e^{0.18y}) / (-0.18)$$

$$\text{Osijek } - R5d_{maks} = 52.7 + 12.63 (1 - e^{0.08y}) / (-0.08)$$

Iz ovih jednadžbi moguće je uvažavajući odnos reducirane varijate y i povratnog razdoblja T izračunati maksimalne količine oborine za koje je vjerojatno da će biti premašene jednom u T godina.



Slika 2: Učestalost (%) godišnjih maksimalnih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine tijekom godine za Varaždin i Osijek. Razdoblje: 1961.-2000.

Tablica 3: Osnovna statistika nizova godišnjih maksimuma 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine (R_{red} -srednjak, sd -standardna devijacija, c_v -koeficijent varijacije, R_{maks} -najveća izmjerena količina oborine, T -pripadno povratno razdoblje prema općoj razdiobi ekstremnih vrijednosti za Varaždin i Osijek. Razdoblje: 1961.-2000.

	R_{red} (mm)	sd (mm)	c_v	R_{maks} (mm)	T (god)
Varaždin					
Rd	53,4	17,6	0,33	131,3	711
$R2d$	65,9	20,7	0,31	137,6	331
$R5d$	90,2	28,7	0,32	197,2	319
Osijek					
Rd	41,1	17,2	0,42	101,2	74
$R2d$	47,9	18,1	0,38	101,8	46
$R5d$	61,1	19,1	0,31	130,2	148

Vrijednosti parametara x_0 (Rd_0 , $R2d_0$ i $R5d_0$), a i k nalaze se u **tablici 3**, kao i vrijednosti procijenjenih maksimalnih količina oborine koje se mogu očekivati jednom u povratnom razdoblju od 10, 20, 50 i 100 godina, odnosno za koje se pretpostavlja da će biti premašene s malom vjerojatnošću od 10, 5, 2 odnosno 1%. Prema pripadnim vrijednostima standardnih devijacija, također navedenih u **tablici 3**, mogu se odrediti intervali povjerenja u kojima se ovi procijenjeni maksimumi kreću uz zadanu pogrešku. Ovisno o stupnju sigurnosti s kojim se žele procijenjeni ekstremi oborine uvrstiti u projektne i tehnološke proračune, mogu se koristiti intervali povjerenja $x \pm sd$ na približno 68% razini povjerenja, $x \pm 1,28sd$ na približno 80% razini povjerenja i $x \pm 1,65sd$ na približno 90% razini povjerenja, gdje se x zamjenjuje s Rd_{maks} , $R2d_{\text{maks}}$ odnosno $R5d_{\text{maks}}$ ovisno o promatranom parametru.

U **tablici 3** dani su osnovni statistički parametri nizova maksimalnih godišnjih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine. Za sve tri kategorije oborine odstupanja godišnjih maksimuma od godine do godine su podjednaka u Varaždinu (31-33%), dok je u Osijeku međugodišnja varijabilnost najmanja kod 5-dnevnih godišnjih maksimuma (31%) i podjednaka za 1-dnevne i 2-dnevne maksimume (42% odnosno 38%). U promatranom 40-godišnjem razdoblju 1961.-2000. zabilježeni godišnji apsolutni maksimumi u Varaždinu izrazito se rijetko

javljuju, jednom u nekoliko stotina godina, ali s njima treba računati. Izmjereni godišnji apsolutni maksimumi u Osijeku također su rijetka pojava i mogu se očekivati jednom u 74 godine (1-dnevni maksimum) i jednom u 46 godina (2-dnevni maksimum), odnosno jednom u oko 150 godina (5-dnevni maksimum).

Parametri zakrivljenosti k (**tablica 4**) imaju pozitivne vrijednosti kod procjena za Varaždin, te krivulje procjena teže konačnoj vrijednosti. Međutim, kod 1-dnevnih i 5-dnevnih maksimuma, gdje je parametar k približno jednak nuli, a krivulja približno pravac, procjene za velika povratna razdoblja su precijenjene te je realno uzimati u obzir procjene za povratna razdoblja do 100 godina. U Osijeku parametar k ima negativne vrijednosti u razdiobama za sve tri kategorije maksimalne oborine. To je prvenstveno posljedica podatka koji značajno odstupaju od ostatka skupa, ali ga treba uvažiti, jer je posljedica kišne epizode koja se dogodila u razmatranom razdoblju (**slika 3**). Krivulja procjena ne teži konačnoj vrijednosti pa su stoga procjene za velika povratna razdoblja precijenjene.

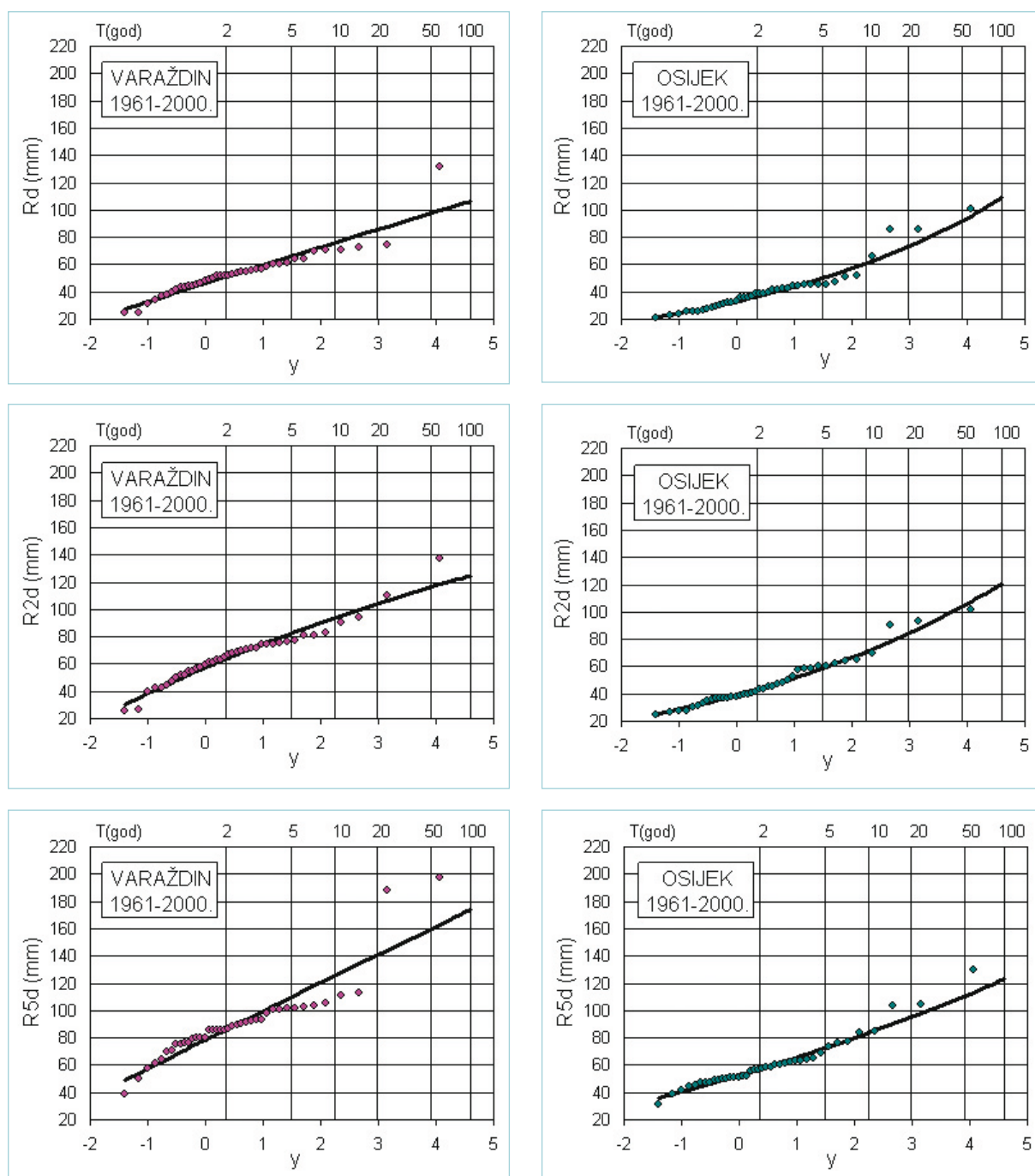
3.3 Klimatske promjene maksimalnih dnevnih i višednevnih oborina

Godišnje maksimalne 1-dnevne, 2-dnevne i 5-dnevne količine oborine (1949.-2009.) pokazuju veliku međugodišnju varijabilnost koja pokazuje padajući trend u gornjem toku (Varaždin), dok u donjem toku (Osijek) varijabilnost raste. Prema linearnom trendu prisutno je smanjenje kod sva tri oborinska parametra u Varaždinu, statistički signifikantno na 5% razini povjerenja samo kod godišnjih maksimuma 5-dnevnih količina (**slika 4a**), a u Osijeku gotovo nema promjena (**slika 4b**).

Tijekom promatrane 61 godine pojavilo se nekoliko vrijednosti palih količina koje odskakuju od ostalih vrijednosti (engl. *outliers*) u vremenskim nizovima sva tri oborinska parametra na obje postaje. Daljnja diskusija odnosi se na izmjerene ekstreme u odnosu na procijenjenu 20-godišnju povratnu vrijednost. Ta projektna vrijednost za promatrane lokacije za sva tri oborinska parametra

Tablica 4: Parametri razdiobe (x_0 , a i k) i procijenjene godišnje maksimalne 1-dnevne, 2-dnevne i 5-dnevne količine oborine (x_T) pomoću opće razdiobe ekstremnih vrijednosti za povratna razdoblja T od 10, 20, 50 i 100 godina, te pripadne standardne devijacije (sd_T) za Varaždin i Osijek. Razdoblje: 1961.-2000.

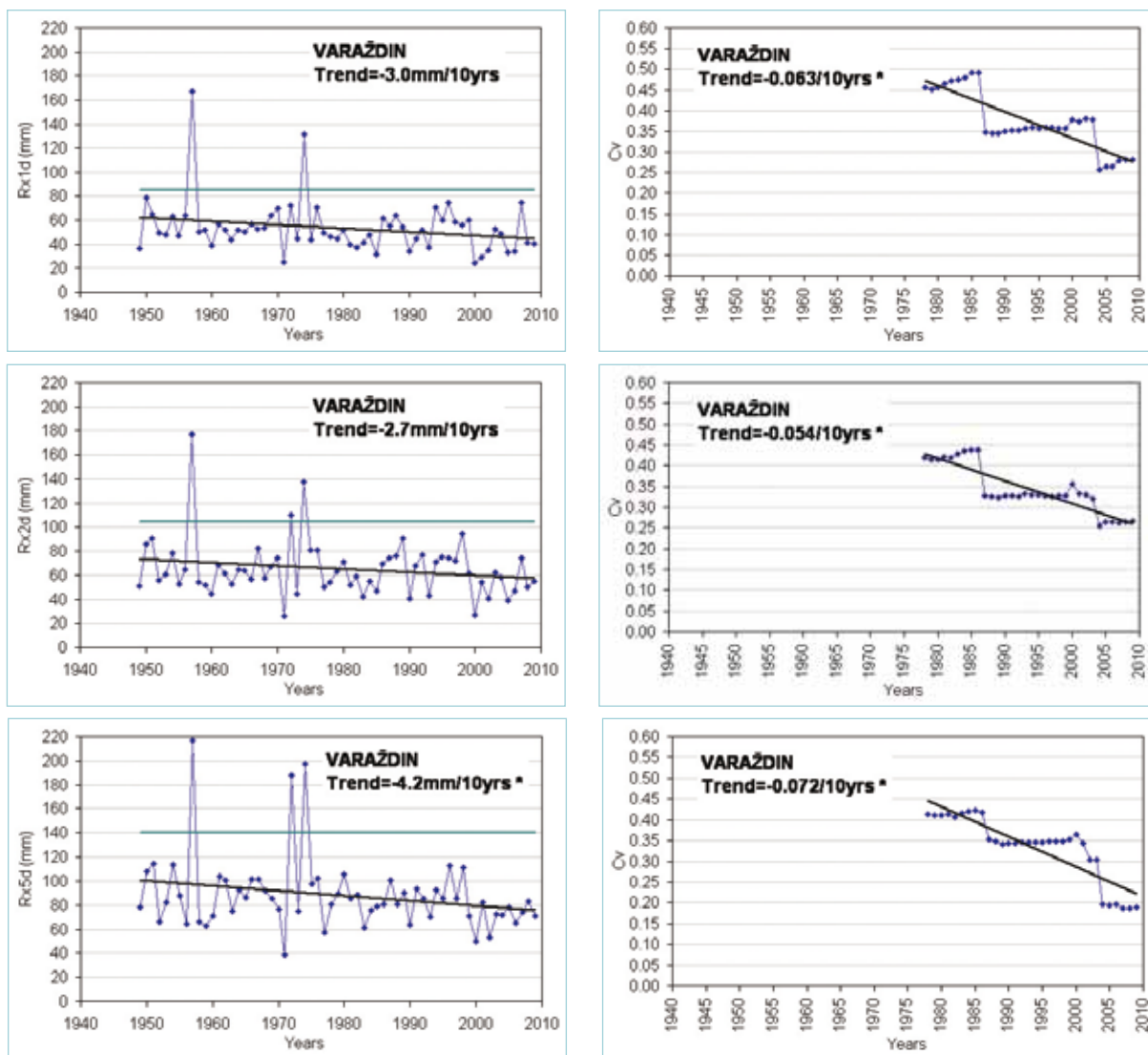
	x_0	a	k	x_{10}	sd_{10}	x_{20}	sd_{20}	x_{50}	sd_{50}	x_{100}	sd_{100}
Varaždin											
Rd	46,2	13,39	0,01	75,8	4,7	85,1	5,7	97,0	7,0	105,9	8,0
$R2d$	57,4	18,22	0,10	93,9	5,7	103,9	6,7	115,7	7,9	123,9	8,7
$R5d$	78,6	21,18	0,01	125,9	7,4	140,9	9,0	160,1	11,0	174,4	12,6
Osijek											
Rd	33,0	9,54	-0,22	60,9	5,2	73,2	7,0	92,4	9,7	109,6	12,2
$R2d$	39,1	11,40	-0,18	70,7	5,9	83,8	7,7	103,6	10,4	120,7	12,8
$R5d$	52,7	12,63	-0,08	83,8	5,2	95,0	6,5	110,4	8,4	122,7	10,0
Varaždin / Osijek											
Rd	1,40			1,24		1,16		1,05		0,97	
$R2d$	1,47			1,33		1,24		1,12		1,03	
$R5d$	1,49			1,50		1,48		1,45		1,42	



Slika 3: Izmjerene maksimalne 1-dnevne, 2-dnevne i 5-dnevne količine oborine (točke) i procjene očekivanih maksimuma (krivulje) pomoću opće razdiobe ekstremnih vrijednosti za Varaždin i Osijek. Razdoblje: 1961.-2000.

označena je zelenom crtom na slikama 4a i 4b. U promatranom 61-godišnjem nizu može se očekivati da tri točke od svakog oborinskog parametra premašuju 20-godišnju povratnu vrijednost. Slika 4a pokazuje da su samo dvije vrijednosti 1-dnevnih maksimuma, te tri vrijednosti 2-dnevnih i 5-dnevnih maksimuma premašile 20-godišnju povratnu vrijednost za Varaždin, i to se dogodilo u prvih 30 godina promatranog razdoblja. U Osijeku, to se dogodilo dva puta češće nego što se očekuje i raspoređeno je u cijelom promatranom razdoblju (slika

4b). Ekstremi koji odskaku ne pokazuju grupiranje tijekom posljednjih dekada, a što bi moglo eventualno ukazati na mogući recentni dekadni trend o kojem se često govori. Ovi rezultati podupiru zaključak o smanjenju dnevnih i višednevnih godišnjih maksimuma oborine u gornjem toku Drave, odnosno sjeverozapadne Hrvatske (Varaždin) i podjednakom pojavljivanju po intenzitetu i učestalosti tijekom cijelog promatranog razdoblja u donjem toku Drave, odnosno istočne Hrvatske.



Slika 4a. Lijevo: Vremenski nizovi godišnjih maksimalnih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine u Varaždinu. Crna crta označava trend, a zelena crta označava 20-godišnju povratnu vrijednost procijenjenu pomoću opće razdiobe ekstremnih vrijednosti. Zvezdica označava trend signifikantan na 5% razini povjerenja. Desno: Vremenski nizovi koeficijenta varijacije godišnjih maksimalnih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine za 30-godišnja razdoblja s pomakom od jedne godine i njihovi trendovi. Zvezdica označava trend signifikantan na 5% razini povjerenja.

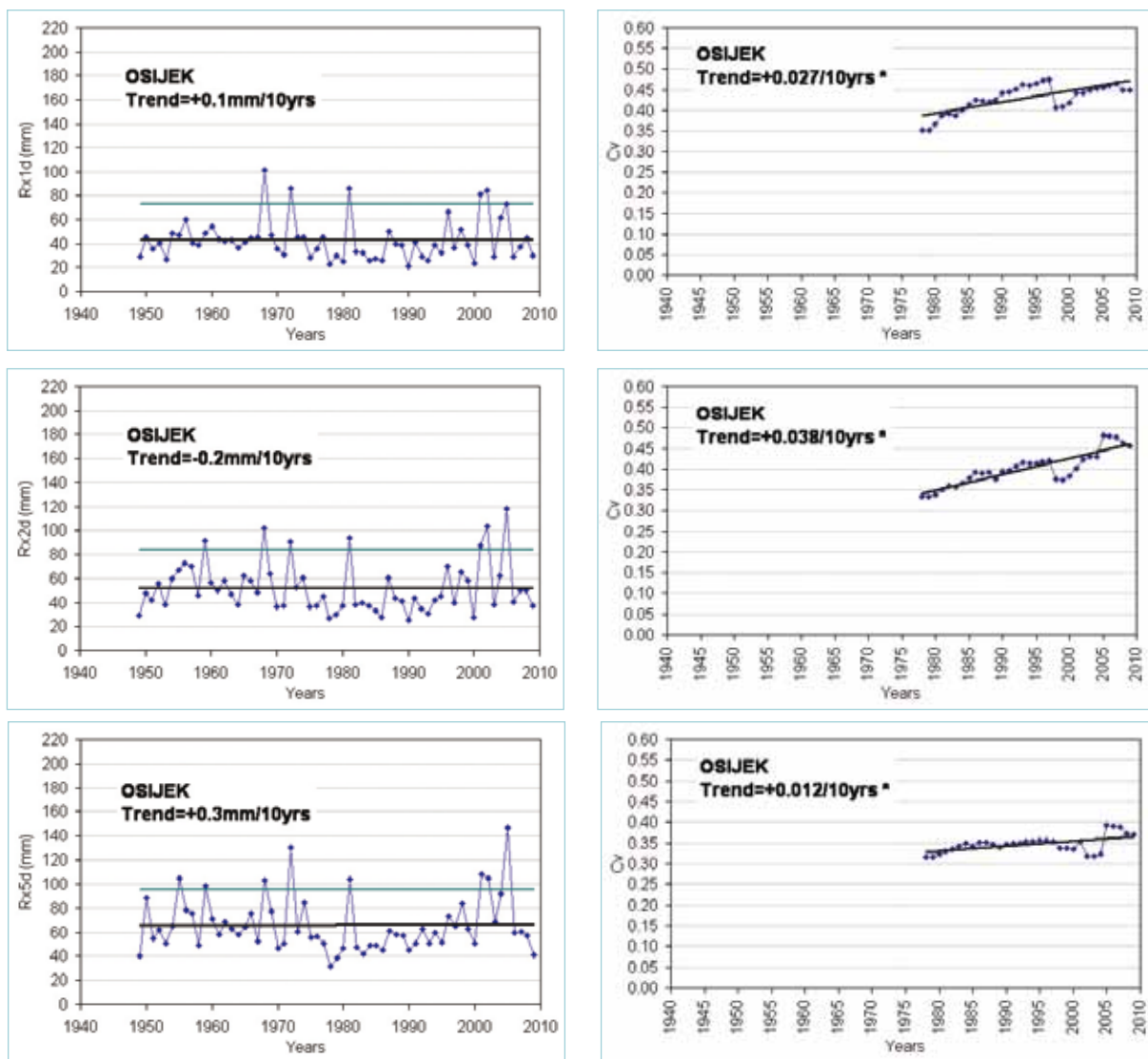
4 ZAKLJUČAK

Ova statističko-klimatološka analiza dnevnih količina oborine i godišnjih maksimuma dnevnih i višednevnih (2-dnevnih i 5-dnevnih) količina ukazuje na prostorne i vremenske promjene u slivu Drave u Hrvatskoj. Dnevne količine oborine imaju veliku varijabilnost tijekom godine i ona je podjednaka na varaždinskom i na osječkom području. Međutim, iznosi dnevnih količina su za iste percentile, prema gama razdiobi, veći u Varaždinu, nego u Osijeku. Ta razlika za gornje decile (P50 do P90) iznosi 30-40%. U Varaždinu 66%, odnosno u Osijeku 67% dnevnih količina oborine manje je od prosjeka (6,4 mm u Varaždinu i 4,8 mm u Osijeku), a 10% dnevnih količina (kišni dani) ima količinu veću od 16,2 mm u Varaždinu, odnosno 12,5 mm u Osijeku.

Razlike procjena očekivanih godišnjih maksimalnih vrijednosti (1961.-2000.) između Varaždina i Osijeka za

različita povratna razdoblja (vjerojatnosti premašaja) smanjuju se s povećanjem povratnog razdoblja (smanjenja premašaja) i rastu od 1-dnevnih, preko 2-dnevnih do 5-dnevnih maksimuma.

Tijekom razdoblja 1949.-2009. zapaženo je smanjenje dnevnih i višednevnih godišnjih maksimuma oborine u gornjem toku Drave, odnosno sjeverozapadne Hrvatske (Varaždin), a u istom razdoblju u donjem toku Drave, odnosno istočnoj Hrvatskoj (Osijek) intenzitet i učestalost godišnjih maksimuma tri promatrana oborinska parametra nije se promijenio. Na to ukazuju rezultati analize linearnog trenda kao i diskusija vremenske promjene oborinskih nizova na temelju usporedbe pojave godišnjih maksimuma i vrijednosti jednog parametra opće razdiobe ekstremnih vrijednosti - procijenjene vrijednosti povratnog razdoblja, što daje novi pristup analizi klimatske promjene oborinskih rijetkih događaja uvođenjem teorije ekstremnih vrijednosti. ■



Slika 4b. lijevo: Vremenski nizovi godišnjih maksimalnih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine u Osijeku. Crna crta označava trend, a zelena crta označava 20-godišnju povratnu vrijednost procijenjenu pomoću opće razdiobe ekstremnih vrijednosti. Zvezdica označava trend signifikantan na 5% razini povjerenja. Desno: Vremenski nizovi koeficijenta varijacije godišnjih maksimalnih 1-dnevnih, 2-dnevnih i 5-dnevnih količina oborine za 30-godišnja razdoblja s pomakom od jedne godine i njihovi trendovi. Zvezdica označava trend signifikantan na 5% razini povjerenja.

LITERATURA

- Coles, S. (2001.): An introduction to statistical modelling of extreme values. Springer, London, 208 pp.
- Durrans, S. R., Brown, P. A., 2000: Development of an Internet-Based Rainfall Atlas for Alabama. 5th Int. Workshop on Precipitation in Urban Areas, Pontresina, Switzerland. December 10-12, 2000, IHP-V, Preprints of Papers, 2631.
- Faragó, T., Katz, R.W. (1990.): Extremes and design values in climatology. World Meteorological Organization, WMO-TD No. 386, WCAP-No. 14, 46 pp
- Folland, C.K., Horton, B., Scholfield, P. (editors) (1999.): Report of WMO Working Group on Climate Change detection Task Group on climate change indices. Bracknell, Berks, UK, 1-3 September 1998, WMO-TD No. 930, WCDMP-No. 37.
- Gajić-Čapka, M.; Čapka, B. (1997.): Procjene maksimalnih dnevnih količina oborine. Hrvat. vode, 5, 20, 231244.
- Gajić-Čapka, M., 1999.: Duljina normalnog niza za kratkotrajne oborine u Hrvatskoj. Hrvat. vode. 7, 29, 217-235.
- Gajić-Čapka, M. (2000.) Metode klimatološke analize kratkotrajnih oborina velikog intenziteta. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno matematički fakultet, Zagreb, 131 str.
- Gajić-Čapka, M., Cindrić, K. (2011.): Secular trends in indices of precipitation extremes in Croatia, 1901.–2008. Geofizika 28(2):293312.
- Jenkinson, A. F. (1955.): The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. Quart. J. R. Met. Soc. 87, 158171.
- Jenkinson, A.F. (1969.): Statistics of Extremes, Estimation of Maximum Floods. World Meteorological Organisation, Geneve, WMO Technical Note No. 98, Chapter 5.
- Juras, V., Juras, J. (1987.): Metode kategorizacije izvanrednih

- meteoroloških pojava, Treće jugoslavensko savjetovanje o elementarnim atmosferskim nepogodama, Opasne pojave na moru, Split.
- Klein Tank, A.M.G., Zwiers, F.W., Zhang, X. (2009.): Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. World Meteorological Organisation, WMO-TD No. 1500, WCDMP-No. 72, 52 pp.
- Peterson, T.C., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., Plummer, N. (2001.): Report on the activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001. World Meteorological Organisation Rep. WMO-TD No. 1071, WCDMP-No. 47, Geneva, Switzerland, 143 pp.
- Sevruk, B., Geiger, H. (1981.): Selection of distribution types for extremes of precipitation. World Meteorological Organisation, Geneva, Operational Hydrology, Report No. 15, WMO – No. 560, 64 pp.
- Sneyers, R. (1990.): On the Statistical Analysis of Series of Observations. WMO Tech. Note No. 143, Geneva, WMO.
- Thom, H.C.S. (1958.): A note on the gamma distribution. Monthly Weather Review, 86, 117–122.
- Vuković, I. (1996.): Osobine razdioba dnevnih količina oborine u Hrvatskoj. Diplomski rad, Prirodoslovno–matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 50 str.
- WMO (1989.): Statistical Distribution for Flood Frequency Analysis. WMO-No. 718 and Operational Hydrology Report No.33.
- WMO (2004.): Report of the CCI/CLIVAR expert team on climate change detection, monitoring and indices (ETCCDMI), WCDMP No. 54.

DAILY AND MULTI-DAILY RAINFALL IN THE MIDDLE AND UPPER FLOW OF THE DRAVA – CLIMATE CHARACTERISTICS AND CHANGES

Abstract. The aim of this study is the analysis of daily and multi-daily precipitation in the Drava river basin at the meteorological stations Varaždin and Osijek in the period 1949–2009, which is applicable to the water and energy sector. The paper contains an analysis of the probability of daily precipitation using Gamma distribution (1961–2000), analysis of extreme values of annual maximum daily and multi-daily (2- and 5-day) amounts by the generalized extreme values distribution (1961–2000), and trend analysis of selected precipitation parameters and their inter-annual variability (coefficient of variation) with linear trend and discussion of their occurrence in relation to the assessment of expected value for the 20-year return period (1949–2009). During the year, the daily variability is high, and equal in the Varaždin and Osijek areas. More frequent is the appearance of daily precipitation amounts which are below the mean. For the same probability, one can expect higher daily amounts in Varaždin than in Osijek. Annual maximums are the most frequent in the warmer part of the year, and in the cold one they are rare or do not occur at all. The differences between the estimated values for different return periods for Varaždin and Osijek decrease with the increasing return period as well as increases from 1-day, 2-day to 5-day maximums. The decreasing trend is present in daily and multi-daily annual precipitation maximums in the Upper Drava basin, namely NW Croatia (Varaždin), whereas in the Lower Drava basin, namely eastern Croatia, they remain unchanged, both with regard to intensity and frequency of all three observed precipitation parameters (1-day, 2-day and 5-day amounts) during the observed period.

Key words: daily and multi-daily precipitation amounts, Gamma distribution, Generalized Extreme Value (GEV) distribution, trend, variability

EINTÄGIGE UND MEHRTÄGIGE NIEDERSCHLAGSSUMMEN IM MITTEL- UND UNTERLAUF DES FLUSSES DRAU – KLIMATISCHE EIGENSCHAFTEN UND VERÄNDERUNGEN

Zusammenfassung. Das Ziel dieser Arbeit ist eintägige und mehrtägige Niederschlagssummen im Flussbereich der Drau an den meteorologischen Stationen Varaždin und Osijek im Zeitraum 1949–2009 zu analysieren, welche Analyse dann in der Wasser- und Energiewirtschaft ihre Anwendung findet. Die Arbeit beinhaltet die Wahrscheinlichkeitsanalyse von eintägigen Niederschlagssummen anhand der Gamma-Verteilung (1961–2000), die Extremwertanalyse von Jahresmaximalwerten eintägiger und mehrtägiger Niederschlagssummen (2-Tages- und 5-Tagesummen des Niederschlags) anhand der allgemeinen Extremwertverteilung (1961–2000) und die Trendanalyse von ausgewählten Niederschlagsparametern und ihrer zwischenjährlichen Variabilität (Variationskoeffizient) anhand des linearen Trends und der Diskussion über das Vorkommen dieser Parameter im Verhältnis zur Berechnung des Erwartungswertes für die Wiederkehrperiode von 20 Jahren (1949–2009). Im Laufe des Jahres ist die Variabilität der eintägigen Niederschlagssummen stark und ungefähr gleich auf den Gebieten von Varaždin und Osijek. Eintägige Niederschlagssummen, die niedriger als das Mittel sind, kommen öfter vor. Für die gleiche Wahrscheinlichkeit können höhere Tagessummen in Varaždin als in Osijek erwartet werden. Die Jahresmaximalwerte wurden am häufigsten in der warmen Jahreszeit festgestellt, während sie in der kalten Jahreszeit selten sind oder gar nicht vorkommen. Die Unterschiede in der Berechnung der Erwartungswerte zwischen Varaždin und Osijek für unterschiedliche Wiederkehrperioden verringern sich mit der Verlängerung der Wiederkehrperiode und steigen von eintägigen zu zweitägigen und zu fünftägigen Maximalwerten. Der Verringerungstrend konnte bei den eintägigen und mehrtägigen Jahresmaximalwerten von Niederschlag im Oberlauf des Flusses Drau, d.h. im nordwestlichen Kroatien (Varaždin) festgestellt werden, während im Unterlauf des Flusses, d.h. im östlichen Kroatien keine Veränderungen der drei Niederschlagsparametern (1-, 2- und 5-Tages-Niederschlagssummen) in Bezug auf Intensität oder Frequenz im beobachteten Zeitraum festgestellt wurden.

Schlüsselwörter: tägige und mehrtägige Niederschlagssummen, Gamma-Verteilung, allgemeine Extremwertverteilung, Trend, Variabilität