

## TEORIJSKI HIDROGRAMI VELIKIH VODA NA HIDROLOŠKIM STANICAMA DUŽ TOKA REKE DUNAV NA TERITORIJI REPUBLIKE SRBIJE

Prof. dr Stevan PROHASKA  
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd  
Aleksandra ILIĆ  
Gračevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu  
Milena JELOVAC, Ognjen PROHASKA  
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

### REZIME

U ovom radu je prikazan sveobuhvatni pristup u definisanju teorijskih hidrograma velikih voda na hidrološki izučenim profilima, odnosno na oficijelnim hidrološkim stanicama duž sektora reke Dunav, sa uključivanjem izlaznih profila hidroloških stanica na glavnim pritokama na teritoriji Republike Srbije.

U osnovi rad se oslanja na praktičnu uporednu primenu metode „graničnog intenziteta oticaja“ (GIO) za proračun teorijskih hidrograma velikih voda različitih verovatnoća pojave, kao i teorije dvodimenzionalnog definisanja funkcija raspodele (koincidencije) različitih parametara hidrograma velikih voda. U konkretnom slučaju, tretirana su dva osnovna parametra hidrograma velikih voda – ordinate maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalne zapremine hidrograma velikih voda u istoj kalendarskoj godini. Tariranje parametara metode GIO vrši se u uslovima izjednačavanja teorijskih vrednosti maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalnih godišnjih zapremina istih verovatnoća pojave, koji se dobijaju primenom metode GIO, odnosno standardne procedure prilagođavanja navedenih vremenskih serija teorijskim funkcijama raspodele koje se najčešće koriste u hidrološkoj praksi.

Rezultati proračuna prikazani su duž Dunava po deonicama, odnosno čvorovima ušća glavnih pritoka: Drave, Tise, Save i Velike Morave. Prikazani su teorijski hidrogrami za različite verovatnoće pojave: 0,1; 1,0; 2,0; 5,0 i 10,0%. Takođe je prikazana prostorna usaglašenost (bilans) teorijskih zapremina poplavnih talasa po sektorima duž Dunava za iste verovatnoće pojave.

**Ključne reči:** teorijski hidrogram, metoda „graničnog intenziteta oticaja“, hidrološki izučeni profili, maksimalni protok, zapremina talasa.

### 1. UVOD

Računski hidrogrami velikih voda različitih verovatnoća pojave na profilima hidroloških stanica, gde postoje podaci dugogodišnjih serija osmatranja, predstavljaju jednu veoma važnu karakteristiku praktične hidrologije. U dosadašnjoj hidrološkoj praksi u našoj zemlji, a i šire, primenjuju se različiti pristupi za njegovo određivanje, bez jasnog stava šta je u praksi najcelishodnije primenjivati. U osnovi, polazi se od toga da se maksimalna ordinata hidrograma definiše na bazi raspoložive serije maksimalnih godišnjih proticaja primenom različitih teorijskih funkcija raspodele verovatnoća. Za drugi, takođe veoma značajan parametar hidrograma velikih voda, a to je zapremina poplavnog talasa, koriste se raznorazne procedure, često izvedene na bazi sračunatih vremena porasta hidrograma, vremena inercijalnog „zadržavanja“ padavina u slivu, vremena koncentracije i sl. Za proračun ovih vremenskih parametara koriste se uglavnom empirijske jednačine (zavisnosti) iz literature, često neproverene za uslove klimatskih i fizičko-geografskih karakteristika razmatranog sliva.

U tekstu koji sledi prikazuju se rezultati proračuna verovatnoće osnovnih parametara hidrograma velikih voda, u konkretnom slučaju serija maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa na ključnim hidrološkim stanicama na Dunavu i glavnim pritokama na teritoriji Republike Srbije. Pri tome su korišćeni Pirson III i Log-Pirson III, Gumbel, Ln Normalna 3 i Ln Normalna 2 zakoni

raspodele. Za definisanje teorijskih hidrograma velikih voda različitih verovatnoća pojave korišćena je metoda „graničnog intenziteta oticaja” (GIO). Parametri metode GIO tarirani su na teorijske vrednosti osnovnih parametara hidrograma koji su dobijeni standardnom statističko-probabilističkom analizom prilagođavanja teorijskih funkcija raspodele verovatnoća osnovnim serijama maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalnih godišnjih zapremina [1]. Pri izboru merodavne funkcije raspodele korišćeni su standardni testovi za ocenu kvaliteta prilagođavanja:  $\chi^2$  – test, Kolmogorov – Smirnov i  $\omega^2$ .

U cilju prostornog poređenja i kontrole rezultata proračuna izvršeno je poređenje rezultata po deonicama reke Dunav, odnosno po čvorovima, koji uključuju po jednu, ili više značajnih pritoka. Elementi za poređenje su teorijske vrednosti zapremina poplavnih talasa istih verovatnoća pojave, sračunatih po metodi GIO. Na taj način izvršena je kontrola bilansa teorijskih poplavnih talasa duž celog Dunava na teritoriji Republike Srbije, od ulaza na mačarskoj do izlaza na rumunskoj/bugarskoj granici.

## 2. METODOLOGIJA PRORAČUNA

Osnovna baza za definisanje računskih hidrograma velikih voda u profilima hidroloških stanica su raspoloživi dugogodišnji nizovi vemenskih serija maksimalnih godišnjih proticaja, maksimalnih zapremina poplavnih talasa, kao i registrovani zapisi oblika hidrograma. Vremenske serije maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalnih zapremina poplavnih talasa koriste se za definisanje njihovih teorijskih vrednosti različitih verovatnoća pojave, odnosno povratnog perioda. Zapisi hidrograma registrovanih poplava na limnografskim stanicama (kontinualna osmatranja) ili na vodmerima (sa dnevnim periodom diskretizacije vremena) služe za definisanje oblika hidrograma.

Kao što je već rečeno za definisanje osnovnih parametara teorijskih hidrograma velikih voda kao i njihovog oblika, u osnovi se koristi metoda GIO. Osnova za izbor konstelacija (kombinacija) karakterističnih parametara za koje se definišu teorijski hidrografi je unapred definisan dvodimenzionalni zakon raspodele verovatnoće pojave osnovnih parametara hidrograma – vršne ordinate i zapremine poplavnog talasa. Parametri oblika hidrograma određuju se na osnovu realno opaženih hidrograma velikih voda na razmatranoj hidrološkoj stanici.

Polazna postavka metode GIO bazira se na primeni racionalne teorije rečnog oticaja. Detaljni prikaz metode se može naći u literaturi [1], [5]. Ovde ćemo samo reći da se maksimalni protok verovatnoće pojave  $p$  ( $Q_{\max,p}$ ) računa, po formuli [4]:

$$Q_{\max,p} = 16,67 \cdot \bar{i}_{\max,p}(\tau) \cdot \varphi \cdot F \quad (1)$$

gde je:

$Q_{\max,p}$  – maksimalna ordinata hidrograma za verovatnoću pojave  $p$  u  $m^3/s$ ,

$\bar{i}_{\max,p}(\tau)$  – maksimalni srednji intenzitet kiše za računsko trajanje kiše  $\tau$ ,

$\varphi$  – zbirni koeficijent oticaja,

$F$  – površina sliva u  $km^2$ .

$\tau$  – vreme koncentracije u minutima.

Vreme koncentracije određuje se na osnovu poznate serije maksimalnih godišnjih protoka  $Q_{\max,p}$  po formuli:

$$\tau_p = \frac{16,67 \cdot K \cdot L}{a \cdot I_{ur}^{1/3} \cdot Q_{\max,p}^{1/4}} \quad (2)$$

gde je:

$\tau_p$  – vreme koncentracije,

$K$  – odnos vremena retardacije i porasta hidrograma,

$a$  – koeficijent koji zavisi od hrapavosti rečnog korita i srednje uravnatog pada,

$L$  – dužina glavnog toka u  $km$ ,

$l$  – srednji uravnati pad toka u promilima.

Zapremina poplavnog talasa po formuli:

$$W_p = 1000 \cdot h_p \cdot F \quad (3)$$

gde je:

$h_p$  – sloj oticaja (mm),

Dok se ordinate hidrograma velikih voda  $Q_{p,i}$  ( $i=1,2,3,\dots,T_B$ ,  $T_B$  – baza hidrograma) računaju po Gudručevom zakonu raspodele:

$$Q_{p,i} = Q_{\max,p} \cdot 10^{-a \frac{1-X_i}{X_i}} \quad (4)$$

$$T_p = B_p \cdot \frac{0.278 \cdot \lambda^* \cdot h_p}{q_{\max,p}} \quad (5)$$

gde je:

$$X_i = \frac{t_i}{T_p} - \text{relativna apscisa hidrograma,}$$

$T_p$  – uslovno trajanje porasta hidrograma verovatnoće pojave  $p$ ,

$q_{\max,p}$  – maksimalni moduo oticaja ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ),

$$q_{\max,p} = \frac{Q_{\max,p}}{F} \quad (6)$$

$B_p$  – koeficijent koji se tarira

Međusobne zavisnosti parametara  $a$ ,  $\lambda^*$  i  $K_s$  mogu se naći u literaturi [2], [3].

Osnovni parametri koji se tariraju po metodi GIO su: **K** – odnos vremena retardacije i porasta hidrograma, **a** – koeficijent koji zavisi od hrapavosti rečnog korita i srednje uravnatog pada i  $B_p$  – koeficijent.

### 3. IZBOR HIDROLOŠKIH STANICA ZA DEFINISANJE TEORIJSKIH HIDROGRAMA VELIKIH VODA DUŽ TOKA DUNAVA

Za praktičnu primenu razrađene metodologije za definisanje teorijskih hidrograma velikih voda izabrane su glavne hidrološke stanice duž toka reke Dunav na teritoriji Republike Srbije, kao i ulazni profili hidroloških stanica sa glavnih pritoka. Pregled izabranih hidroloških stanica sa prikazom osnovnih podataka o veličini sliva i dužinama perioda osmatranja za koje su prikupljeni neophodni hidrološki podaci prikazan je u tabeli 1.

Za sve navedene hidrološke stanice prikupljeni su podaci o srednje dnevnim proticajima i apsolutno maksimalnih godišnjim proticajima. Na osnovu podataka o srednjim dnevnim proticajima identifikovani su odgovarajući hidrogrami poplavnih talasa i sračunate su njihove zapremine. Na taj način formirane su vremenske serije maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa i određeni su odgovarajući odnosi porasta i pada hidrograma na svim razmatranim hidrološkim stanicama.

Tabela 1. Pregled izabranih hidroloških stanica sa osnovnim podacima o položaju i dužinama perioda osmatranja duž toka reke Dunav

Br	Hidrološka stanica	Reka	Površina sliva ( $\text{km}^2$ )	Period osmatranja	Država
1	Bezdan	Dunav	210250	1931-2016	SR
2	Bogojevo	Dunav	251593	1931-2016	SR
3	Slankamen	Dunav	411961	1931-2017	SR
4	Pančevo	Dunav	525009	1931-2016	SR
5	Oršava	Dunav	576232	1840-2016	RU
6	Donji Miholjac	Drava	37142	1931-2014	HR
7	Senta	Tisa	141715	1931-2016	SR
8	Sremska Mitrovica	Sava	87996	1931-2016	SR
9	Draževac	Kolubara	3588	1951-2015	SR
10	Ljubičevski most	Velika Morava	37320	1948-2015	SR

### 4. REZULTATI PRORAČUNA TEORIJSKIH HIDROGRAMA VELIKIH VODA NA RAZMATRANIM PROFILIMA HIDROLOŠKIH STANICA

Izložena teorijska osnova za proračun teorijskih hidrograma velikih voda sprovedena je na svim navednim hidrološkim stanicama. U osnovi korišćene su vremenske serije maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalnih godišnjih zapremina, kao i registrovani oblici istorijskih poplavnih talasa. Na osnovu podataka, primenom klasične procedure prilagođavanja teorijskih funkcija raspodele verovatnoća, sračunate su teorijske vrednosti slučajnih promenljivih za različite verovatnoće pojave. Pri tome su korišćeni sledeći zakoni raspodele: Pirson III, Log Pirson III, Gumbel, Ln Normalna 3 i Ln Normalna 2. Kvalitet prilagođavanja je testiran pomoću  $\chi^2$  testa, testa Kolmogorov-Smirnov i  $n\omega^2$  testu.

#### 4.1. Rezultati proračuna verovatnoće pojave osnovnih parametara hidrograma velikih voda

Rezultati testiranja prilagođavanja teorijskih i empirijskih raspodela verovatnoće maksimalnih godišnjih proticaja, kao i maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa, na svim navedenim hidrološkim stanicama su pokazali da se za vremenske serije maksimalnih godišnjih proticaja najbolje slaganje dobija za Log Pirson III funkciju raspodele, a za serije maksimalnih zapremina poplavnih talasa za Pirson III

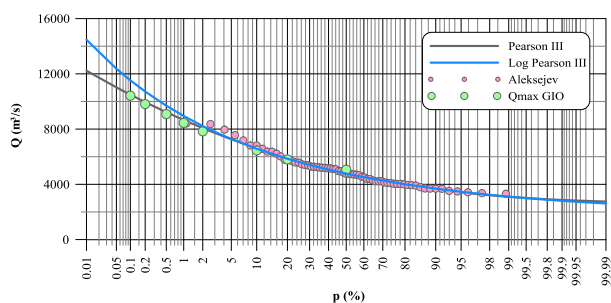
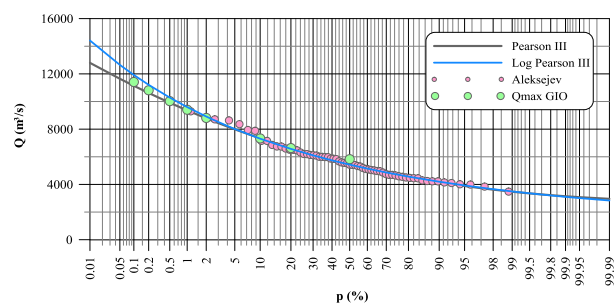
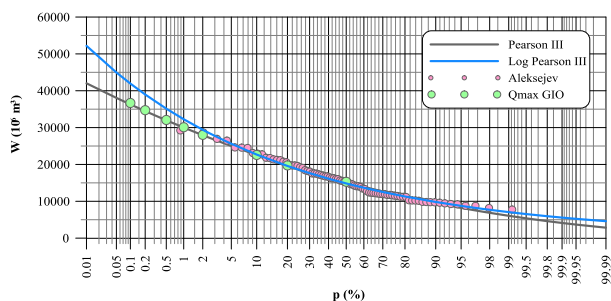
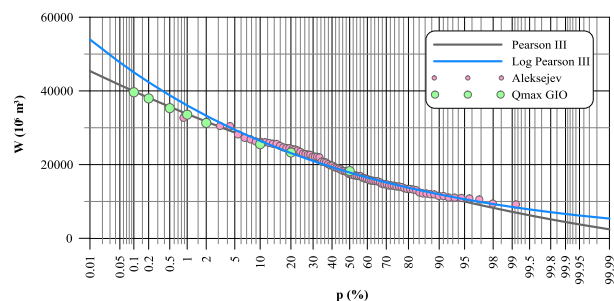
zakon raspodele. Rezultati ovih proračuna su prikazani numerički u tabeli 2, kao i grafički na slikama 1-10/a.b. Za slučaj reke Kolubare uračene su dve vrste proračuna verovatnoće pojave osnovnih parametara hidrograma velikih voda u zavisnosti da li je u toku poplave iz maja 2014. godine došlo do potapanja površinskog kopa „Tamnava-Zapadno polje” i grada Obrenovca, i to: za postojeće stanje sa potapanjem i za slučaj „uspešne odbrane” od poplava grada Obrenovca i površinskih kopova REIK Kolubara.

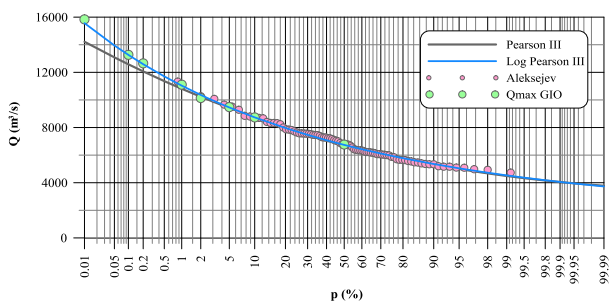
Tabela 2. Prikaz teorijskih vrednosti maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalnih zapremina poplavnih talasa u slivu reke Dunav

Br	Hidrološka stanica	promenljiva	Verovatnoća pojave p (%)					Tip rasp.
			0.1	1.0	2.0	5.0	10.0	
1	Bezdan	$Q_{\max,p}(m^3/s)$	10490	8656	8072	7265	6614	PIII
			10421	8445	7833	6996	6455	GIO
		$W_{\max,p}(10^6m^3)$	36292	30007	27939	25006	22566	PIII
			36671	30095	28027	24781	22572	GIO
2	Bogojevo	$Q_{\max,p}(m^3/s)$	11137	9358	8785	7985	7332	PIII
			11410	9405	8811	8001	7328	GIO
		$W_{\max,p}(10^6m^3)$	39899	33741	31674	28701	26185	PIII
			39631	33554	31310	28183	25542	GIO
3	Slankamen	$Q_{\max,p}(m^3/s)$	13265	11036	10362	9453	8736	LPIII
			13269	11106	10138	9479	8734	GIO
		$W_{\max,p}(10^6m^3)$	62860	54261	51261	46830	42960	PIII
			62864	54253	51257	46752	43290	GIO
4	Pančevo	$Q_{\max,p}(m^3/s)$	17353	15035	14289	13243	12383	LPIII
			17986	15406	14175	13225	12389	GIO
		$W_{\max,p}(10^6m^3)$	93807	82287	77902	71152	65061	LPIII
			93808	82302	77901	71061	65064	GIO
5	Oršava	$Q_{\max,p}(m^3/s)$	17715	15606	14907	13908	13062	LPIII
			17714	15616	14917	13891	13021	GIO
		$W_{\max,p}(10^6m^3)$	95336	84570	80637	74648	69237	PIII
			96345	84929	81102	75035	69910	GIO
6	Donji Miholjac	$Q_{\max,p}(m^3/s)$	3242	2534	2329	2060	1852	LPLIII
			3234	2534	2356	2082	1868	GIO
		$W_{\max,p}(10^6m^3)$	5929	5149	4855	4408	4008	LPIII
			5937	5151	4863	4400	4011	GIO
7	Senta	$Q_{\max,p}(m^3/s)$	4589	3799	3543	3185	2891	PIII
			5222	4019	3743	3221	2884	GIO
		$W_{\max,p}(10^6m^3)$	24600	19699	18080	15779	13858	PIII
			24602	19583	18081	15775	13860	GIO

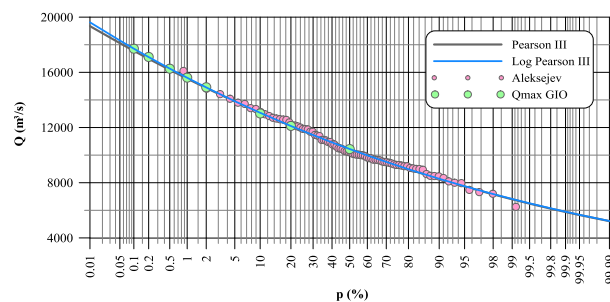
Tabela 2. Prikaz teorijskih vrednosti maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalnih zapremina poplavnih talasa u slivu reke Dunav (nastavak)

Br	Hidrološka stanica	promenljiva	Verovatnoća pojave p (%)					Tip rasp.
			0.1	1.0	2.0	5.0	10.0	
8	Sr. Mitrovica	$Q_{\max,p}(\text{m}^3/\text{s})$	7806	6569	6189	5671	5256	LPIII
			7844	6558	6185	5676	5265	GIO
		$W_{\max,p}(10^6\text{m}^3)$	24194	21655	20727	19312	18033	PIII
			24186	21651	20729	19306	18034	GIO
9.1	Draževac (sa potapanjem)	$Q_{\max,p}(\text{m}^3/\text{s})$	1534	1028	878	682	537	PIII
			1529	1012	875	679	542	GIO
		$W_{\max,p}(10^6\text{m}^3)$	704	446	380	300	244	LPIII
			704	446	381	300	242	GIO
9.2	Draževac (bez potapanja)	$Q_{\max,p}(\text{m}^3/\text{s})$	2250	1231	1001	740	570	LPIII
			2256	1233	1001	740	570	GIO
		$W_{\max,p}(10^6\text{m}^3)$	723	490	420	329	261	PIII
			724	489	400	329	261	GIO
10	Ljubičevski most	$Q_{\max,p}(\text{m}^3/\text{s})$	2896	2413	2251	2018	1820	PIII
			3316	2594	2357	2113	1865	GIO
		$W_{\max,p}(10^6\text{m}^3)$	3717	3183	2997	2723	2486	PIII
			3991	3322	3050	2707	2488	GIO

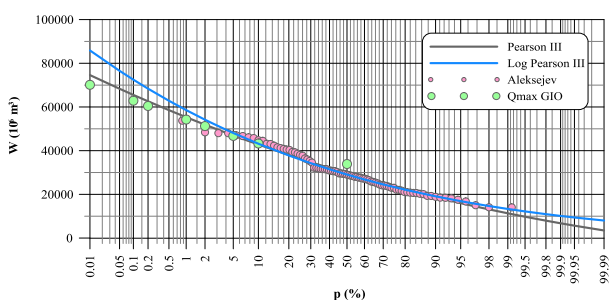
Slika 1a. Teorijske vrednosti  $Q_{\max}$  reke Dunav u profilu h.s. Bezdán po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIOSlika 2a. Teorijske vrednosti  $Q_{\max}$  reke Dunav u profilu h.s. Bogojevo po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIOSlika 1b. Teorijske vrednosti  $W_{\max}$  reke Dunav u profilu h. s. Bezdán po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIOSlika 2b. Teorijske vrednosti  $W_{\max}$  reke Dunav u profilu h. s. Bogojevo po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



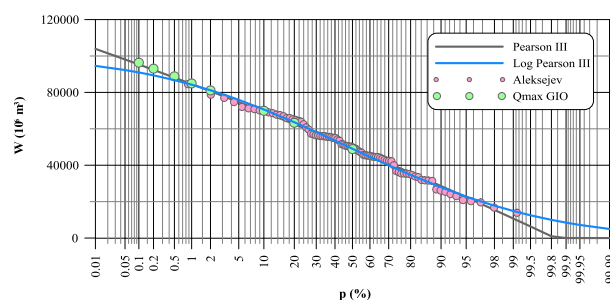
Slika 3a. Teorijske vrednosti  $Q_{max}$  reke Dunav u profilu h.s. Slankamen po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



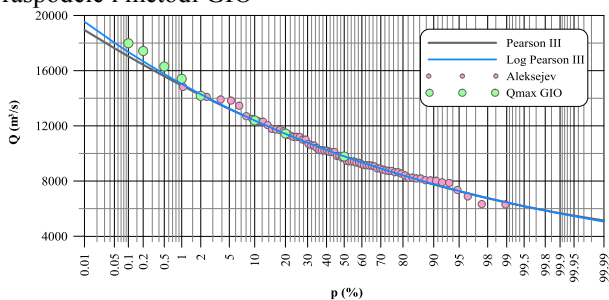
Slika 5a. Teorijske vrednosti  $W_{max}$  reke Dunav u profilu h. s. Oršava po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



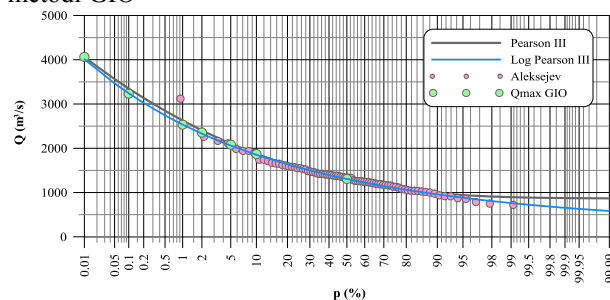
Slika 3b. Teorijske vrednosti  $W_{max}$  reke Dunav u profilu h. s. Slankamen po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



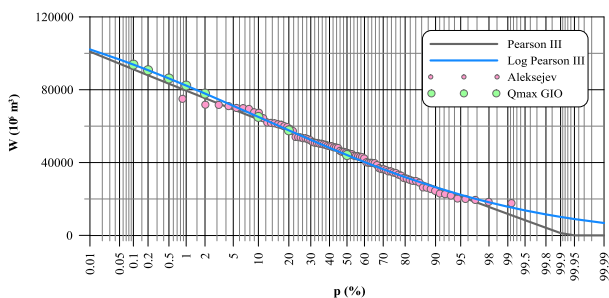
Slika 5b. Teorijske vrednosti  $W_{max}$  reke Dunav u profilu h. s. Oršava po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



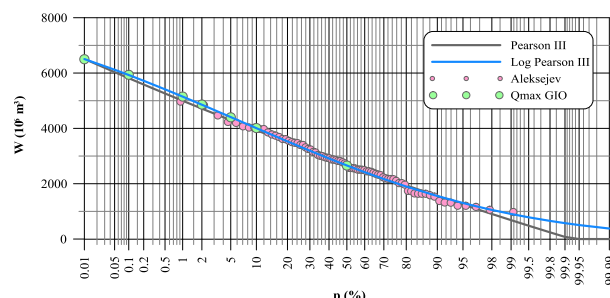
Slika 4a. Teorijske vrednosti  $Q_{max}$  reke Dunav u profilu h. s. Pančevo po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



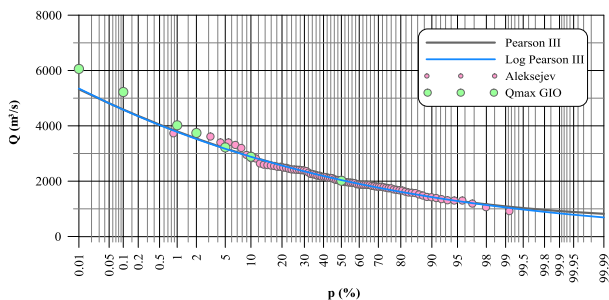
Slika 6a. Teorijske vrednosti  $Q_{max}$  reke Drave u profilu h. s. Donji Miholjac po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



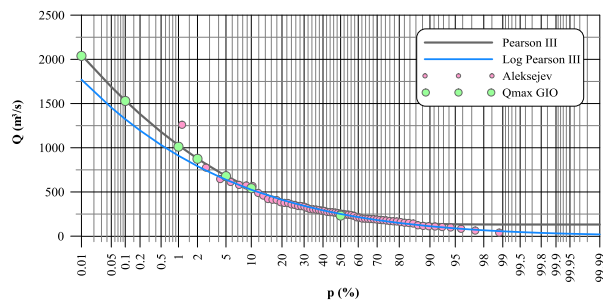
Slika 4b. Teorijske vrednosti  $W_{max}$  reke Dunav u profilu h. s. Pančevo po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



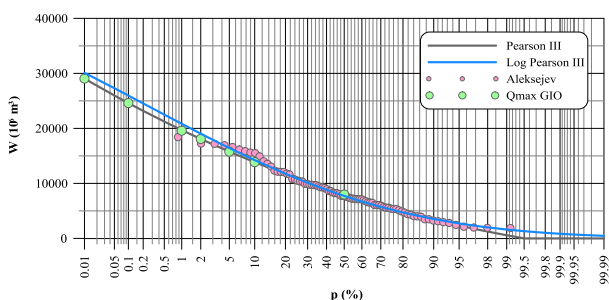
Slika 6b. Teorijske vrednosti  $W_{max}$  reke Drave u profilu h. s. Donji Miholjac po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



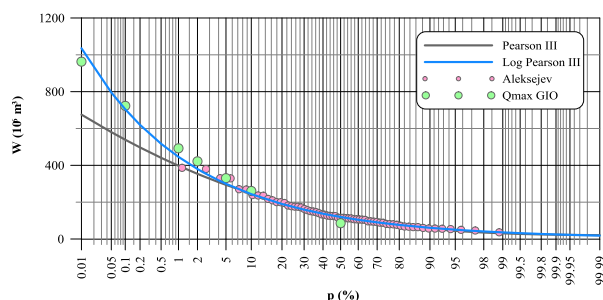
Slika 7a. Teorijske vrednosti Qmax reke Tise u profilu h. s. Senta po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



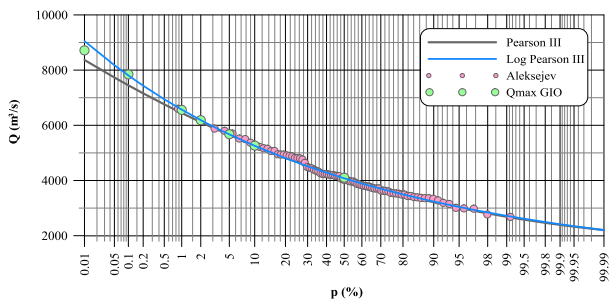
Slika 9.1a. Teorijske vrednosti Qmax reke Kolubare u profilu h. s. Draževac po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO (sa potapanjem)



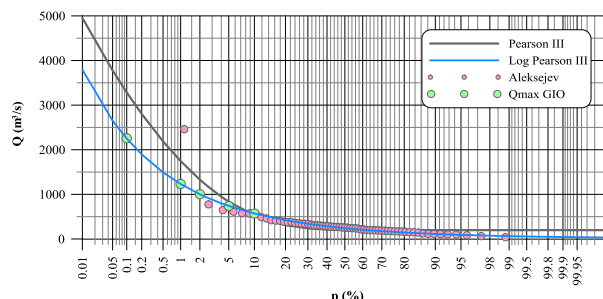
Slika 7b. Teorijske vrednosti Wmax reke Tise u profilu h. s. Senta po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



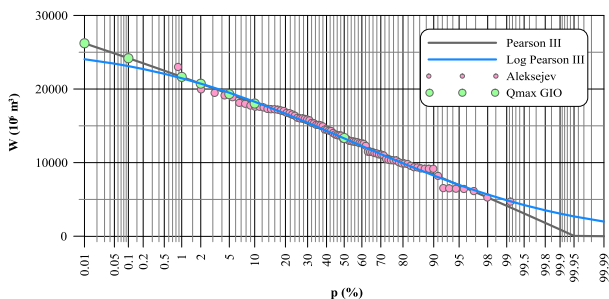
Slika 9.1b. Teorijske vrednosti Wmax reke Kolubare u profilu h. s. Draževac po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO (sa potapanjem)



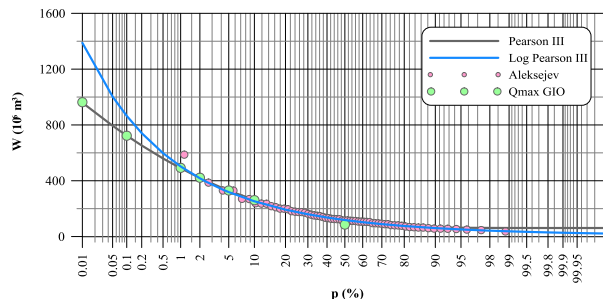
Slika 8a. Teorijske vrednosti Qmax reke Save u profilu h. s. Sremska Mitrovica po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



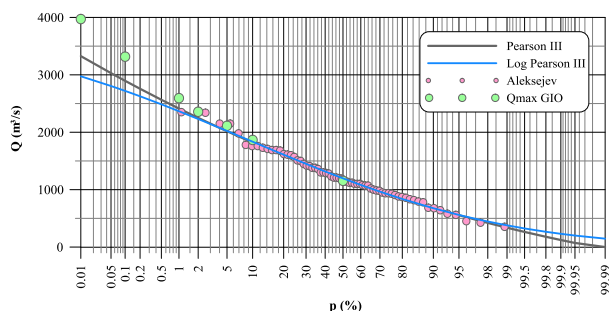
Slika 9.2a. Teorijske vrednosti Qmax reke Kolubare u profilu h. s. Draževac po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO (bez potapanja)



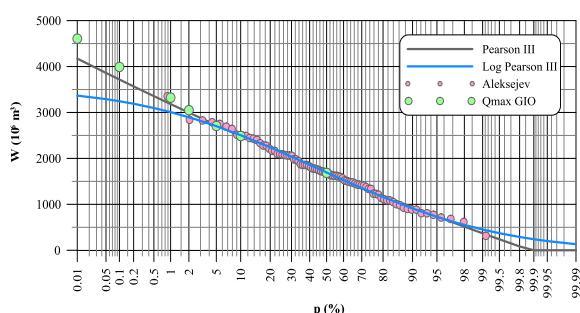
Slika 8b. Teorijske vrednosti Wmax reke Save u profilu h. s. Sremska Mitrovica po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



Slika 9.2b. Teorijske vrednosti Wmax reke Kolubare u profilu h. s. Draževac po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO (bez potapanja)



Slika 10a. Teorijske vrednosti  $Q_{max}$  reke Velike Morave u profilu h. s. Ljubičevski Most po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO



Slika 10b. Teorijske vrednosti  $W_{max}$  reke Velike Morave u profilu h. s. Ljubičevski Most po LP III i P III funkciji raspodele i metodi GIO

#### 4.2. Rezultati proračuna teorijskih hidrograma velikih voda po metodi GIO

Predloženi novi prilaz u definisanju teorijskih hidrograma velikih voda na profilima hidroloških stanica, kombinovanom primenom metode „graničnog intenziteta oticaja“ i definisanih dvodimenzionalnih funkcija raspodele verovatnoća osnovnih parametara hidrograma, ukazuje na velike mogućnosti njegove praktične primene, što će se videti u nastavku teksta. Naime, razrađena procedura daje široke mogućnosti izbora kombinacija osnovnih parametara hidrograma, kako za odabrane verovatnoće pojave  $p$ , tako i za verovatnoće prevazilaženja  $P$ .

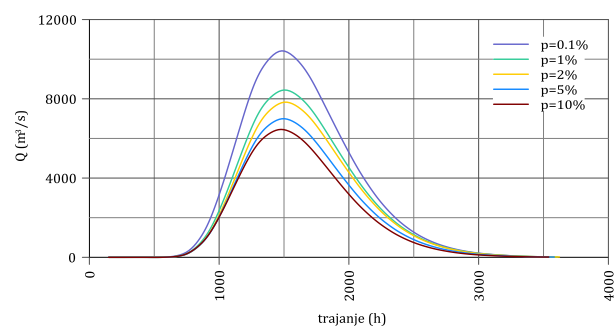
Za potrebe ilustracije praktične primene prikazane procedure pretpostavljeno je da postoji veoma čvrsta funkcionalna veza ( $R=1.0$ ) između osnovnih parametara hidrograma velikih voda. To praktično znači da maksimalni godišnji proticaj određene verovatnoće pojave uvek koincidira sa maksimalnom godišnjom zapreminom iste verovatnoće pojave, što u osnovi, imajući u vidu rezultate prikazane tabeli br. 3, ne odgovara stvarnosti. Međutim, ova konstelacija parametara hidrograma ima smisla, jer ona u suštini

predstavlja „maksimalno moguću“ kombinaciju, koja u konkretnom slučaju ima verovatnoću prevazilaženja  $P\{(Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P})\} > P$ .

Ilustracije radi, prvi proračun teorijskih hidrograma velikih voda po metodi „graničnog intenziteta oticaja“ (GIO) rađen je za „maksimalno moguću“ konstelaciju osnovnih parametara hidrograma velikih voda – kombinacija: maksimalni godišnji proticaj i maksimalna zapremina poplavnog talasa. Za ove pretpostavke parametri metode GIO tariraju se na empirijske funkcije raspodele maksimalnih godišnjih proticaja (slike 1-10/a) i maksimalnih zapremina poplavnih talasa, što je prikazano na slikama 1-10/b. Rezultati proračuna osnovnih elemenata hidrograma velikih voda na svim razmatranim profilima hidroloških stanica duž Dunava, po metodi GIO, prikazani su numerički, takođe u tabeli 2.

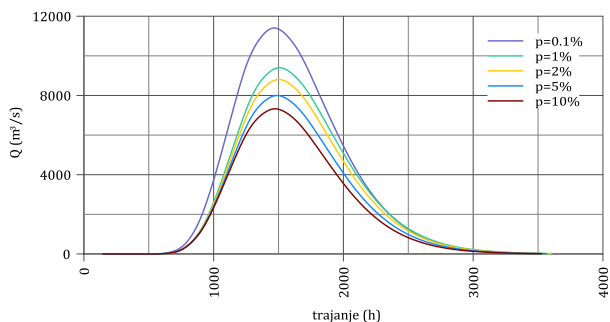
S ciljem verifikacije metode GIO na crtežima (slike 1-10/a.b su nanete, takođe, i sračunate teorijske vrednosti maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalnih zapremina poplavnih talasa po metodi GIO. Kao što se vidi na ovim slikama, postignuto je veoma dobro slaganje između vrednosti sračunate primenom klasične statističko-probabilističke analize i vrednosti dobijene po metodi GIO.

Grafičke interpretacije sračunatih teorijskih hidrograma velikih voda različitih verovatnoća pojave na svim profilima hidroloških stanica duž razmatranog toka Dunava po metodi GIO, pod pretpostavkom da postoji veoma čvrsta korelaciona veza ( $R=1.0$ ) između razmatranih osnovnih parametara hidrograma velikih voda, date su na slikama 11/ 1-11.

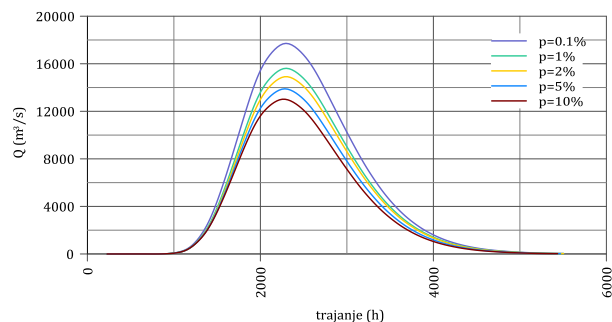


Slika 11/1. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Dunav u profilu h. s. Bezdan za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je  $R=1.0$  između osnovnih parametara hidrograma velikih voda

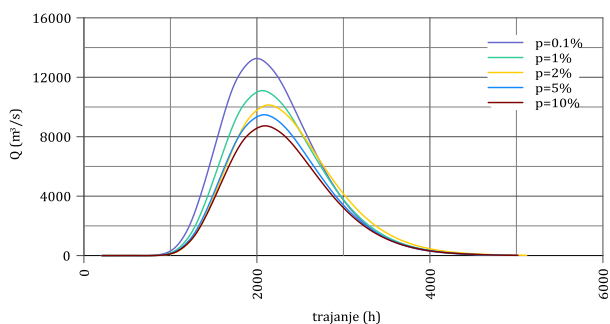




Slika 11/2. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Dunav u profilu h. s. Bogojevo za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je R=1.0 izmeću osnovnih parametara hidrograma velikih voda



Slika 11/5. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Dunav u profilu h. s. Oršava za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je R=1.0 izmeću osnovnih parametara hidrograma velikih voda



Slika 11/3. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Dunav u profilu h. s. Slankamen za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je R=1.0 izmeću osnovnih parametara hidrograma velikih voda

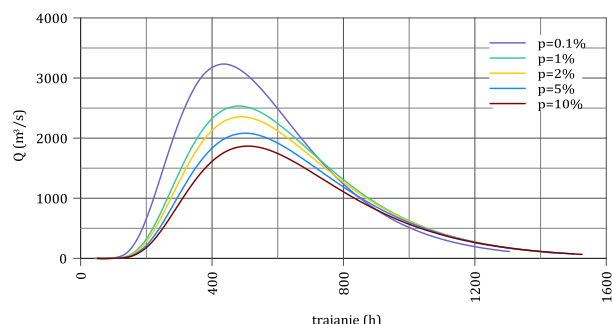
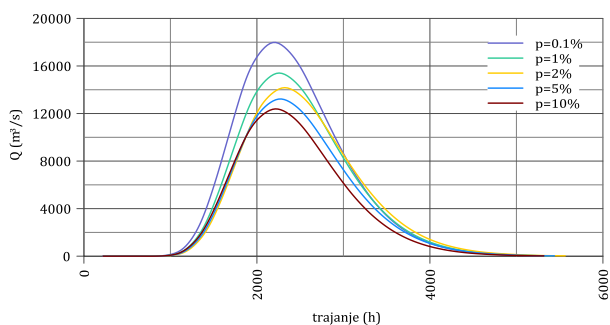


Figure 11/6. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Drave u profilu h. s. Donji Miholjac za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je R=1.0 izmeću osnovnih parametara hidrograma velikih voda



Slika 11/4. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Dunav u profilu h. s. Pančevo za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je R=1.0 izmeću osnovnih parametara hidrograma velikih voda

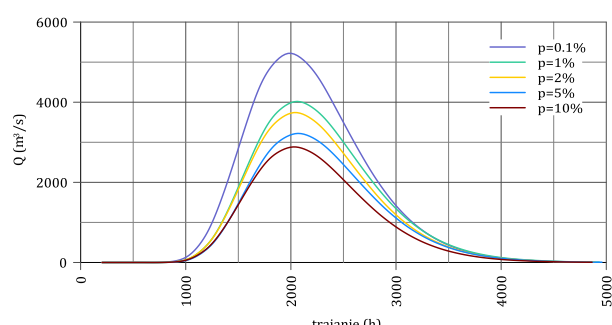
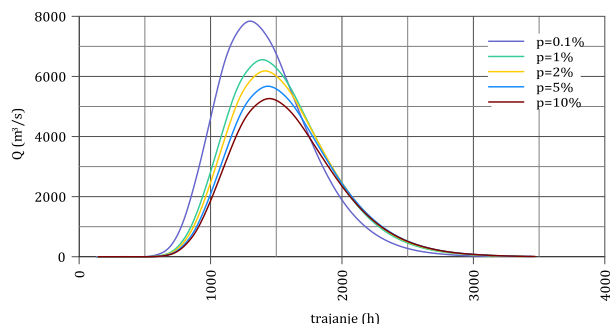
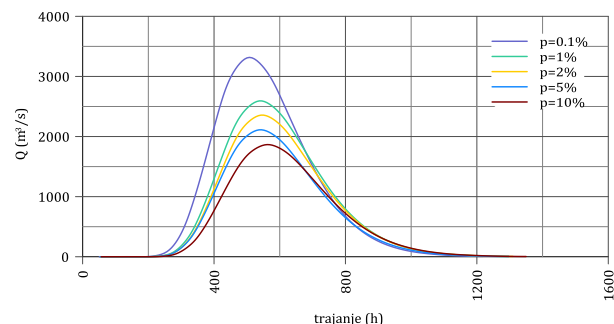


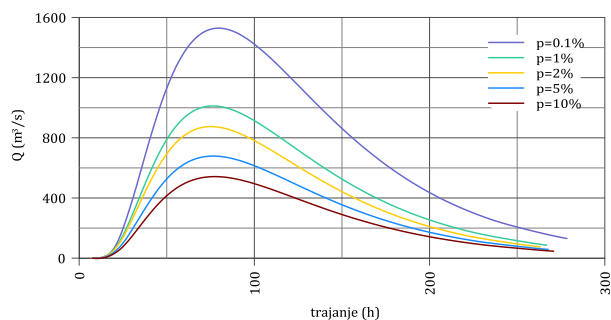
Figure 11/7. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Tise u profilu h. s. Senta za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je R=1.0 izmeću osnovnih parametara hidrograma velikih voda



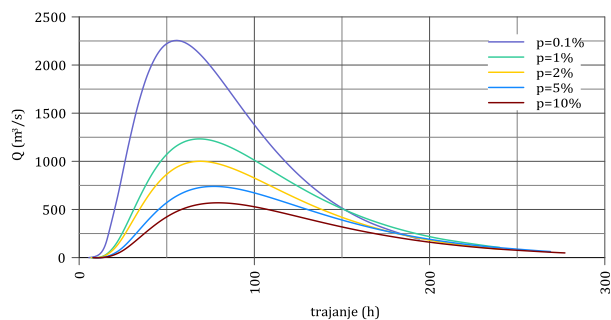
Slika 11/8. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Save u profilu h. s. Sremska Mitrovica za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je  $R=1.0$  između osnovnih parametara hidrograma velikih voda



Slika 11/10. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Velike Morave u profilu h. s. Ljubičevski most za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je  $R=1.0$  između osnovnih parametara hidrograma velikih voda



Slika 11/9.1. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Kolubare u profilu h. s. Draževac za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je  $R=1.0$  između osnovnih parametara hidrograma velikih voda (potopljeni površinski kopovi)



Slika 11/9.2. Teorijski hidrogrami velikih voda reke Kolubare u profilu h. s. Draževac za različite verovatnoće pojave i pod pretpostavkom da je  $R=1.0$  između osnovnih parametara hidrograma velikih voda (nepotopljeni površinski kopovi)

#### 4. BILANSIRANJE ZAPREMINE TEORIJSKIH HIDROGRAMA VELIKIH VODA DUŽ DUNAVA

Radi kontrole sračunatih hidrograma po metodi GIO izvršeno je prostorno usaglašavanje bilansa zapremina poplavnih talasa kako bi se iskontrolisao „logični sled” oblika teorijskih hidrograma za različite verovatnoće pojave. Za potrebe prostornog bilansiranja zapremina sračunatih teorijskih hidrograma velikih izdvojeni su rečni sektori sa jasno definisanim ulaznim (jednim ili više) i izlaznim profilom, za koje je vršena kontrola bilansa zapremina poplavnih talasa. Na razmatranom sektoru Dunava, od Bezdana do Oršave, izdvojeni su sledeći sektori, na kojima je izvršena kontrola bilansa zapremina poplavnih talasa i to:

- Sektor I – ulazni profili hidroloških stanica Bezdan i Donji Miholjac – izlazni profil Bogojevo,
- Sektor II – ulazni profili hidroloških stanica Bogojevo i Senta – izlazni profil Slankamen,
- Sektor III – ulazni profili hidroloških stanica Slankamen, Sremska Mitrovica i Draževac – izlazni profil Pančevo,
- Sektor IV – ulazni profili hidroloških stanica Pančevo i Ljubičevski most – izlazni profil Oršava.

Za sve navedene hidrološke stanice izvršen je proračun teorijskih hidrograma velikih voda po metodi GIO, za „maksimalnu moguću” kombinaciju osnovnih parametara hidrograma velikih voda. Ova provera vršena je za sve razmatrane verovatnoće pojave teorijskih hidrograma, korišćenjem jednačine:

$$\Delta W_p^i = W_{izl,p}^i \frac{Q_{\max,p}}{F} - \sum_{j=1}^{m_i} W_{ul,j,p}^i \quad (6)$$

gde je:

$W_{izl,p}^i$  – zapremina teorijskog hidrograma verovatnoće pojave  $p$  na izlaznom profilu  $i$ -tog sektora

$W_{ul,j,p}^i$  – zapremina teorijskog hidrograma verovatnoće pojave  $p$  na  $j$ -tom ulaznim profilu  $i$ -tog sektora

$m_i$  – broj ulaznih profila  $i$ -tog sektora.

Ukoliko postoje velike razlike  $\Delta W_p^i$ , vrši se korigovanje osnovnih podataka serije maksimalnih zapremina poplavnih talasa ( $W_{\max}$ ) i ponavljanje kompletne procedure. Napominje se da nije vršena korekcija maksimalnih godišnjih protoka. Konačni rezultati proračuna bilansne usaglašenosti prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Bilansiranje zapremina teorijskih hidrograma velikih voda po metodi GIO na razmatranom sektoru Dunava na teritoriji Republike Srbije

	F (km <sup>2</sup> )	0.10%		1.00%		2.00%		5.00%		10.00%	
		W (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	h (mm)	W (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	h (mm)	W (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	h (mm)	W (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	h (mm)	W (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	h (mm)
Bezdan	210250	36671	174	30095	143	28027	133	24761	118	22572	107
D.Miholjac	37142	5937	160	5151	139	4863	131	4400	118	4011	108
Σ	247392	42608	172	35246	142	32890	133	29161	118	26583	107
Bogojevo	251593	39632	158	33554	133	31310	124	28183	112	25542	102
Δ	4201	-2976	-708	-1692	-403	-1580	-376	-978	-233	-1041	-248
Senta	141715	24602	174	19583	138	18081	128	15776	111	13860	98
Σ	393308	64234	163	53137	135	49391	126	43959	112	39402	100
Slankamen	411961	62864	153	54253	132	51258	124	46752	113	43290	105
Δ	18653	-1370	-73	1116	60	1867	100	2793	150	3888	208
Sr. Mitrovica	87996	24186	275	21651	246	20729	236	19306	219	18034	205
Draževac	3588	704	196	446	124	381	106	300	84	243	68
Σ	503545	87754	174	76350	152	72368	144	66358	132	61567	122
Pančevo	525009	93808	179	82302	157	77901	148	71061	135	65064	124
Δ	21464	6054	282	5951	277	5533	258	4703	219	3497	163
Lj. Most	37320	3991	107	3322	89	3050	82	2707	73	2488	67
Σ	562329	97799	174	85624	152	80950	144	73768	131	67551	120
Oršava	576232	96345	167	84929	147	81103	141	75035	130	69910	121
Δ	13903	-1454	-105	-695	-50	152	11	1267	91	2358	170

Generalno se može zaključiti da je primenom metode GIO postignut visok stepen saglasnosti zapremina poplavnih talasa na ulaznim i izlaznim profilima na celom razmatranom sektoru Dunava na teritoriji Republike Srbije. Na sektoru I evidentno je da postoji debalans u zapreminama poplavnih talasa Dnava i Drave, što ukazuje na nizak stepen koincidencije poplavnih talasa na Dunavu i Dravi. Slična situacija je i kod sektora IV, samo za male verovatnoće pojave za  $p \leq 1.0\%$ , kao i kod sektora II za vrovatnoće pojave  $p \leq 0.1\%$ . Kod sektora III nije registrovano debalans zapremina hidrograma, što ukazuje na viši stepen koincidencije poplavnih talasa Save i Dunava, kao i naznačajan doprinos mečusliva u formiranju poplavnih talasa.

## 5. ZAKLJUČAK

Osnovna ideja autora ovoga rada jeste da predlože jedan sasvim **novi pristup u definisanju teorijskih hidrograma velikih voda na hidrološki izučanim profilima**, kakvi su profili oficijelnih hidroloških stanica sa dugogodišnjim nizovima osmatranja vodostaja i merenjima proticaja. To je svakako veoma aktuelna tema, koja permanentno traje i trajaće sve dok hidrolozi širom sveta ne smognu snage da konačno utvrde odgovarajuće standarde za ovu vrstu hidroloških obrada i analiza.

Teorijski hidrogrami velikih voda različitih verovatnoća pojave su jedan od najbitnijih hidroloških elemenata kada su u pitanju sledeće vodoprivredne aktivnosti:

- Odbrana i zaštita od poplava,
- Dimenzionisanje akumulacija i retenzija u funkciji odbrane od poplava,
- Dimenzionisanje nasipa, mostova i propusta,
- Ocena rizika i upravljanje rizikom od poplava.

Sa aspekta navedenih aktivnosti nisu svi parametri hidrograma velikih voda od istog značaja, odnosno težine. Najfrekventniju praktičnu upotrebu ima maksimalna ordinata hidrograma (špic, pik talasa) i ona igra dominantnu ulogu u skoro svim navedenim vodoprivrednim aktivnostima. Zapremina poplavnog talasa je veoma bitna za potrebe optimalnog dimenzionisanja, kako brana i retenzija, tako i za uspešno sprovođenje odbrane od poplava, analize prostiranja poplave u prostoru, a s tim u vezi i ocenom rizika od poplava i upravljanjem njenim rizikom. Trajanje poplavnih talasa je značajno za optimalno dimenzionisanje nasipa i uspešnu odbranu od poplava itd [6].

U ovim radovima definisani su teorijski hidrogrami velikih voda Dunava i njegovih glavnih pritoka različitih verovatnoća pojave. Osnovni parametri hidrograma, maksimalna ordinata i zapremina poplavnog talasa, sastavljeni su od marginalnih verovatnoća istog povratnog perioda. Na taj način definisani teorijski hidrogrami –  $P(Q_{max,P}, W_{max,P})$ , predstavljaju „maksimalni mogući“ hidrogram za verovatnoću  $p(\%)$ , po oba parametra (maksimalne ordinate hidrograma i maksimalne zapremine hidrograma), što u suštini znači da oni prevazilaze verovatnoću  $p$ , tj.  $p > P$ , što možete videti u sledećem radu autora (Prohaska et al.) u ovom broju časopisa. Važno je napomenuti da je postignuto veoma dobro prostorno slaganje zapremine poplavnih talasa duž Dunava, što potvrđuje ispravnost korišćene metode za definisanje teorijskih hidrograma velikih voda.

## ZAHVALNOST

Predstavljeni rezultati i analize su predmet istraživanja naučnog projekta „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ (TR-37005) za period 2011–2019. godine Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije. Autori se zahvaljuju ministarstvu na pruženoj finansijskoj pomoći i podršci.

## LITERATURA

- [1] Prohaska S., Petković T.: Metode za proračun velikih voda, Deo I, Proračun velikih voda na hidrološki izučanim profilima, Gračevinski calendar 89, Beograd, 1989.
- [2] Prohaska S., Ristić V.: Hidrologija kroz teoriju i praksu, Drugo prošireno izdanje, Rudarsko-geološki fakultet, Institut „Jaroslav Černi“, Beograd, 2002.
- [3] Prohaska S.: Hidrologija I Deo, Hidrometeorologija, hidrometrija i vodni režim, Rudarsko-geološki fakultet, Institut „Jaroslav Černi“, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd, 2003.
- [4] Prohaska S.: Hidrologija II Deo, Hidrološko prognoziranje, modelovanje i praktična primena, Institut „Jaroslav Černi“, Rudarsko-geološki fakultet, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd, 2006.
- [5] Prohaska S., Ilić A.: Nov pristup u definisanju teorijskih hidrograma velikih voda na hidrološki izučanim profilima - teme i dileme, časopis Vodoprivreda, broj 288-290, ISSN 0350-0519, Izdavač: Srpsko društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje, vol. 49, no. 4-6/2017, Beograd, str. 363-373, 2017.
- [6] Prohaska S., Ilić A.: Sveobuhvatni pristup određivanju hidrograma velikih voda rijeke Drave mjerodavnih za projektiranje u hidrotehnici, Hrvatske vode, Vol.25, Br. 102, str. 159-168, ISSN 1330-1144, 2017.

## THEORETICAL FLOOD WAVE HYDROGRAPHS OF THE DANUBE RIVER AT HYDROLOGICAL STATIONS IN SERBIA

by

Prof. dr Stevan PROHASKA

Institute for the development of water resources „Jaroslav Černi“, Belgrade  
Aleksandra ILIĆ

Faculty of Civil Engineering and Architecture, University of Niš

Milena JELOVAC, Ognjen PROHASKA

Institute for the development of water resources „Jaroslav Černi“, Belgrade

## Summary

This paper presents a comprehensive approach to defining theoretical flood hydrographs at hydrologically investigated profiles, i.e. at official hydrological stations along the Danube River reach, with the inclusion of outlet profiles of hydrological stations at major tributaries on the territory of the Republic of Serbia.

Basically, the paper relies on the practical comparative application of the “limited runoff intensity” (LRI) method for the calculation of theoretical flood hydrographs of different probabilities of occurrence. In this particular case, two basic parameters were selected - ordinate of maximum annual flow and maximum volume of hydrographs in the same calendar year. Calibration of the LRI method parameters is performed under conditions of equalization of theoretical values of maximum annual flows and maximum annual volumes of the same probabilities of occurrence, which are

obtained by applying the LRI method, standard procedure for adjusting the specified time series to the theoretical distribution functions most commonly used in hydrological practice.

The results of the calculation are presented along the Danube by reaches, nodes at the confluence of the Danube and main tributaries: the Drava, the Tisa, the Sava and the Velika Morava. Theoretical hydrographs for different probability of occurrence 0.1, 1.0, 2.0, 5.0, and 10.0%, are presented. The spatial correspondence (balance) of theoretical flood wave volumes by reaches along the Danube for the same probability of occurrence is also presented.

Key words: theoretical hydrograph, LRI method, hydrologically investigated profiles, maximum flow, flood wave volume.

Redigovano 3.11.2019.