

OCENA STATISTIČKE ZNAČAJNOSTI ISTORIJSKIH POPLAVADUŽ TOKA REKE DUNAV NA TERITORIJI REPUBLIKE SRBIJE

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

REZIME

U radu je izložena procedura za ocenu statističke značajnosti registrovanih istorijskih poplava korišćenjem sveobuhvatnog postupka definisanja teorijskih hidrograma velikih voda na hidrološkim stanicama. 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.

Primenjena procedura bazira se na korelacionoj analizi dva osnovna parametra hidrograma velikih voda – maksimalne ordinate hidrograma (pika) i zapremine poplavnog talasa. Za definisanje verovatnoće istovremene pojave navedenih parametara hidrograma velikih voda korišćen je model PROIL koji definiše verovatnoće prevazilaženja dve slučajne promenljive, u konkretnom slučaju dva razmatrana parametra hidrograma u vidu:

$$P\{Q_{max} \geq q_{max,p}\} \cap (W_{max} \geq w_{max,p}) = P \quad (1)$$

gde su:

Q_{max} - maksimalna ordinata hidrograma,
 $q_{max,p}$ - maksimalni protok verovatnoće pojave p ,
 W_{max} - maksimalna zapremina hidrograma,
 $w_{max,p}$ - maksimalna zapremina talasa verovatnoće pojave p ,
 P - verovatnoća prevazilaženja.

Prostorni položaji linija prevazilaženja dva parametra hidrograma velikih voda i empirijske tačke odgovarajućih parametara razmatrane istorijske poplave na korelacionom polju $Q_{max} - W_{max}$, omogućuju direktno sagledavanje verovatnoće prevazilaženja istorijske poplave, odnosno njene statističke značajnosti.

U radu je prikazana procedura primenjena za ocenu statističke značajnosti do sada najvećih registrovanih poplava duž Dunava. Rezultati proračuna prikazani su u profilima razmatranih hidroloških stanica, po sektorima, odnosno čvorovima ušća glavnih pritoka: Drave, Tise, Save i Velike Morave.

Ključne reči: teorijski hidrogram, metoda „graničnog intenziteta oticaja“, hidrološki izučeni profili, maksimalni protok, zapremina talasa, koincidencija parametra hidrograma, istorijske poplave.

1. UVODNE NAPOMENE

Procena računskih velikih voda na rekama je početni korak kako pri dimenzionisanju raznih hidrotehničkih objekata tako i pri oceni rizika od poplava i stvaranju strategije upravljanja rizikom.

Upravljanje rizicima zahteva višedimenzionalnu analizu u kojoj se kompromis između troškova, dobiti i rizika mora rešiti u višedimenzionalnom prostoru. Postoji težnja da se naprave nove mere za ocenu rizika koje će

se graditi na temeljima višestruke probabilističke analize kao dodatak pristupu očekivane vrednosti koja je dugo korišćena kao jedina mera rizika u prošlosti [4]. U svrhu određivanja unapred zadate vrednosti koja se ne sme prevazići kada su poplave u pitanju ustaljena je procedura jednodimenzionalne probabilističke analize ekstremnih događaja (protoka ili pika poplavnog talasa). Ovakav pristup je jedino opravdan kada je za dimenzionisanje objekata bitna samo jedna varijabla ili kada razmatrani parametri ne pokazuju zavisnost [3].

Problemi koji se odnose na ekstreme u prirodi su višedimenzionalni, tako da procedure koje omogućavaju maksimalnu upotrebu podataka i istovremenu procenu parametara složene pojave kao i njihovu zavisnost i na kraju verovatnoće pojave nisu razvijene do nivoa koji omogućava njihovu laku primenu. Zato Svetska meteorološka organizacija 1988. godine predlaže transformaciju marginalnih verovatnoća koje obično ne prate normalni zakon raspodele kako bi se formirala normalna višestruka raspodela verovatnoća i takav pristup biva primenjivan u mnogim studijama kada se traži zajednička verovatnoća parametara hidrograma oticaja, posebno pika i zapremine [2].

Značaj neophodnosti posmatranja zajedničkih verovatnoća prevazilaženja različitih parametara hidrograma oticaja ističu Singh i Strupczewsky [11], [12]. Predstavljena je uloga sagledavanja odnosa pika poplavnog talasa i zapremine u modeliranju sistema zaštite od poplava u gradovima. Mnogo pokušaja je bilo ne bi li se na najadekvatniji način prikazala veza između osnovnih parametara hidrograma velikih viod i konstruisale raspodele verovatnoća u višedimenzionalnom prostoru.

U prirodnim uslovima poplavni talasi na rekama pojavljuju se periodično i sa različitim kombinacijama osnovnih parametara: maksimalne ordinate i zapremine talasa. Skoro po pravilu verovatnoće pojave tih

parametara, iako su slučajne veličine, ne koincidiraju. Zato je neophodno da se pri definisanju njihovih verovatnoća, one razmatraju spregnuto, kao dvodimenzionalna slučajna promenljiva $(X; Y)$, gde je X – maksimalna ordinata hidrograma, a Y – zapremina poplavnog talasa. U tom slučaju verovatnoća dvodimenzionalne slučajne promenljive $(X; Y)$ definiše se u vidu:

$$P \{X \geq x\} \cap (Y \geq y) = p \quad (2)$$

Za definisanje ove verovatnoće koriste se teorijske dvodimenzionalne slučajno promenljive $(X; Y)$, a u konkretnom slučaju korišćen je model PROIL [9].

U radu su prikazani rezultati primenjene metode za proračun teorijskih hidrogama velikih voda duž Dunava i glavnih pritoka, kao i za proračun koincidencije osnovnih parametara računskih hidrograma (maksimalne ordinate hidrogama i zapremine poplavnih talasa) na istim hidrološkim stanicama.

2. METODOLOGIJA PRORAČUNA PO MODELU PROIL

Za definisanje osnovnih parametara teorijskih hidrograma velikih voda kao i njihovog oblika, u osnovi se koristi metoda „graničnog intenziteta oticaja“, što je detaljno prikazano u radu autora [10]. Osnova za izbor konstelacija (kombinacija) karakterističnih parametara za koje se definišu teorijski hidrogrami 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. U osnovi model PROIL se bazira na praktičnoj primeni dvodimenzionalne normalne funkcije raspodele dve slučajno promenljive X i Y , odnosno dvodimenzionalnoj normalnoj raspodeli sa gustinom verovatnoće koja se definiše na sledeći način [5]:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sqrt{1-\rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right]} \quad (3)$$

gde su:

x i y – istovremene realizacije slučajnih

promenljivih X i Y , respektivno;

μ_x i μ_y – matematička očekivanja X i Y ;

σ_x i σ_y – standardne devijacije X i Y ;

ρ – koeficijent korelacije X i Y .

Prvi korak je određivanje marginalnih verovatnoća gustina raspodele, $f(x, y)$, $f(x, \bullet)$ i $f(\bullet, y)$ kao:

$$f(x, \bullet) = \int_{y=-\infty}^{y=\infty} f(x, y) dy \quad (4)$$

$$f(\bullet, y) = \int_{x=-\infty}^{x=\infty} f(x, y) dx \quad (5)$$

a njihove kumulativne verovatnoće su tada:

$$F(x, \bullet) = \int_{t=-\infty}^{t=x} f(t, \bullet) dt \quad (6)$$

i

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= \int_{t=x}^{t=+\infty} \int_{z=y}^{z=+\infty} f(t, z) dt dz = P[X > x \cap Y > y] = 1 - P[X < x \cup Y < y] = \\ &= 1 - F(x, \bullet) - F(\bullet, y) + F(x, y) \end{aligned} \quad (9)$$

Da bi opisana procedura proračuna bila primenljiva, pri statističkoj analizi različitih parametara hidrograma velikih voda neophodno je uvesti dodatna uprošćenja. U osnovi uprošćenje se odnosi na pretpostavku da se svaka od razmatranih karakteristika hidrograma pokorava normalnom (log-normalnom) zakonu raspodele, što ne mora biti slučaj. Detaljnija teorijska osnova definisanja dvodimenzionalne funkcije raspodele sa primenom grafo-analitičke procedure [1] u rešavanju iste može se naći u literaturi [6], [7], [8].

3. IZBOR HIDROLOŠKIH STANICA ZA DEFINISANJE DVODIMENZIONALNIH FUNKCIJA RASPODELE OSNOVNIH PARAMETARA HIDROGRAMA VELIKIH VODA DUŽ TOKA DUNAVA

Kao i u pretodnom radu pregled izabranih hidroloških stanica duž toka reke Dunav na teritoriji Republike Srbije, koje su korišćene pri praktičnoj primeni razrađene metodologije sa prikazom osnovnih podataka o položaju, veličini sliva i dužinama perioda osmatranja za koje su prikupljeni neophodni hidrološki podaci ponovljen je, zbog bolje preglednosti rada, u tabeli 1.

U konkretnom slučaju korišćeni su korespondentni podaci o maksimalnim godišnjim proticajima i maksimalnim godišnjim zapremina poplavnih talasa na svim razmatranim hidrološkim stanicama.

$$F(x, \bullet) = \int_{t=-\infty}^{t=x} f(t, \bullet) dt \quad (7)$$

U tom slučaju kumulativna raspodela verovatnoće, $F(x, y)$ se definiše:

$$F(x, y) = P[X \leq x \cap Y \leq y] = \int_{t=-\infty}^{t=x} \int_{z=-\infty}^{z=y} f(t, z) dt dz \quad (8)$$

Drugi korak je određivanju verovatnoće prevazilaženja $\Phi(x, y)$ u dvodimenzionalnom prostoru verovatnoća [1]:

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 (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 KOINCIDENCIJE OSNOVNIH PARAMETARA HIDROGRAMA VELIKIH VODA NA RAZMATRANIM PROFILIMA HIDROLOŠKIH STANICA

U test kolji sledi daju se rezultti sledećih vrsta proračuna:

- Dvodimenzionalne verovatnoće (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma velikih voda;
- Ocena statističke značajnosti karakterističnih tačaka na dijagramima koincidencije;
- Ocena statističke značajnosti istorijskih poplava.

Na hidrološkim stanicama duž Dunava na teritoriji Republike Srbije.

4.1. Rezultati proračuna dvodimenzionalne verovatnoće (koincidencije) osnovnih parametara hidrograma velikih voda

Dvodimenzionalni zakon verovatnoća (koincidencije) osnovnih parametara hidrograma velikih voda (maksimalnih godišnjih proticaja i zapremina poplavnih talasa) na svim razmatranim profilima vodomernih stanica reke definisani su sa sinhronim podacima istih vremenskih serija koje su korišćene u poglavlju 3. U osnovi, definisane su:

- Funkcije gustina (linije istih dvodimenzionalnih verovatnoća pojave)

$$F(Q_{max}; W_{max}) = p \quad (10)$$

za verovatnoće $p = 0.1, 1.0, 5.0$ i 50% .

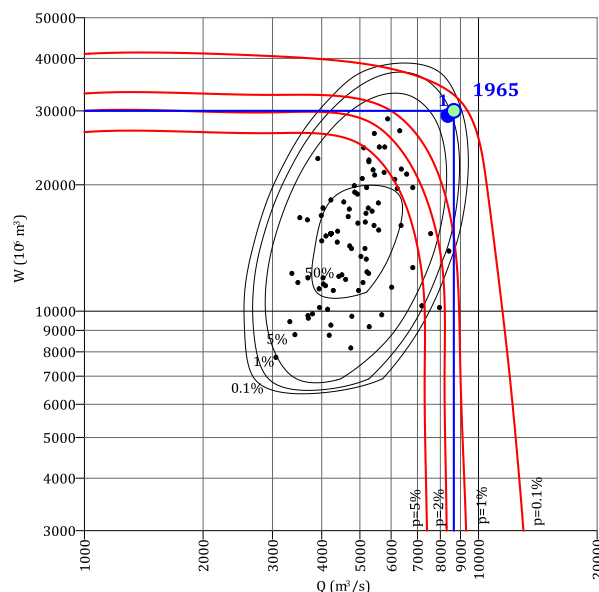
- Funkcije raspodele (linije prevazilaženja dvodimenzionalnih verovatnoća)

$$P \{ (Q_{max} \geq q_{max, p}) \cap (W_{max} \geq w_{max, p}) \} = P \quad (11)$$

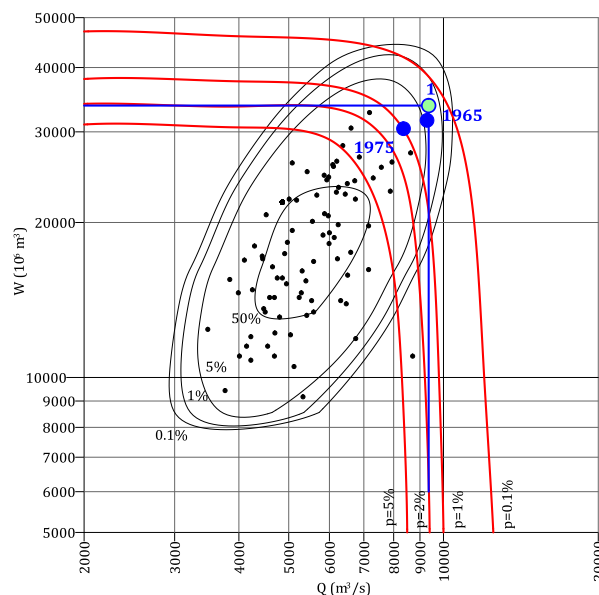
za verovatnoće prevazilaženja $P = 0.1, 1.0, 2.0$ i 5.0% .

Grafičke predstave rezultata proračuna dvodimenzionalne funkcije raspodele osnovnih parametara hidrograma velikih voda na svim razmatranim profilima hidroloških stanica prikazane su na slikama 1/1-10. Na navedenim slikama prikazane su empirijske tačke korespondentnih vrednosti osnovnih parametra hidrograma, maksimalnih godišnjih proticaja i maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa, zatim linije istih dvodimenzionalnih verovatnoća njihove pojave (funkcije gustine), kao i linije verovatnoće njihovih prevazilaženja (funkcije raspdele). Pored toga posebno su obeležene empirijske tačke istorijskih poplava, sa godinama pojave i tačke 1 koja pokazuje presek marginalnih verovatnoća osnovnih parametara hidrograma velikih voda ua verovatnoću pojave $p = 1.0\%$.

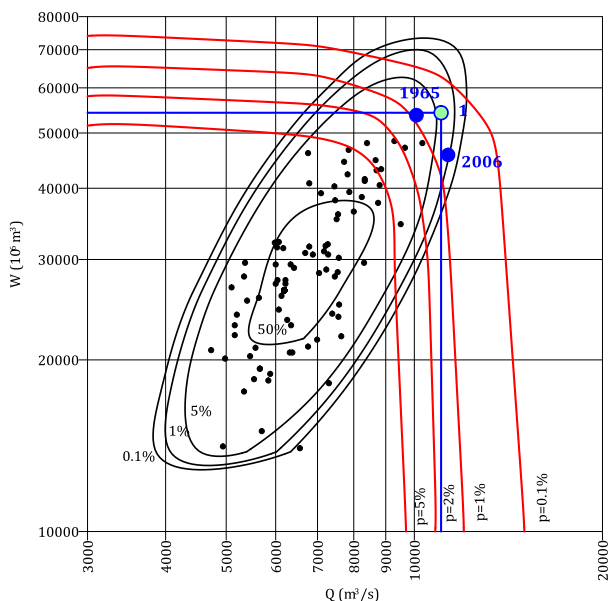
Za slučaj reke Kolubare urađene su dve vrste koincidencije u zavisnosti da li je u toku poplave iz maja 2014. godine došlo do potapanja površinskog kopa „Tamnava - Zapadno polje” i grada Obrenovca, i to: za postjeće stanje sa potapanjem i za slučaj „uspešne odbrane” od popava grada Obrenvca i površinskoh kopova REIK Kolubara.



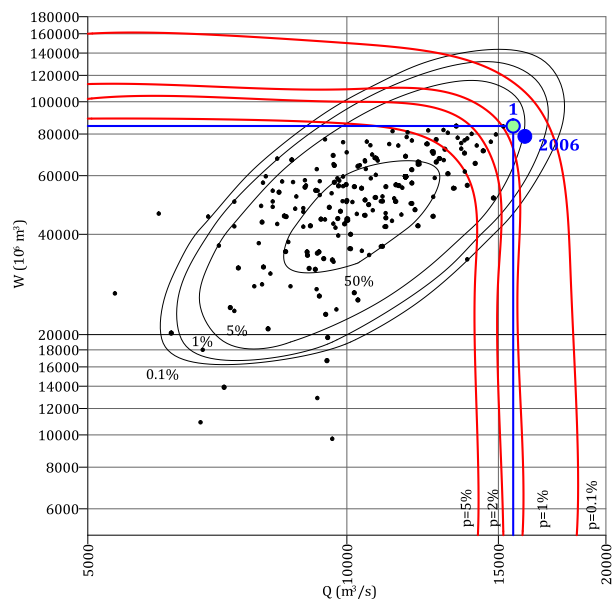
Slika 1/1. Dvodimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Dunav u profilu hidrološke stanice Bezdan



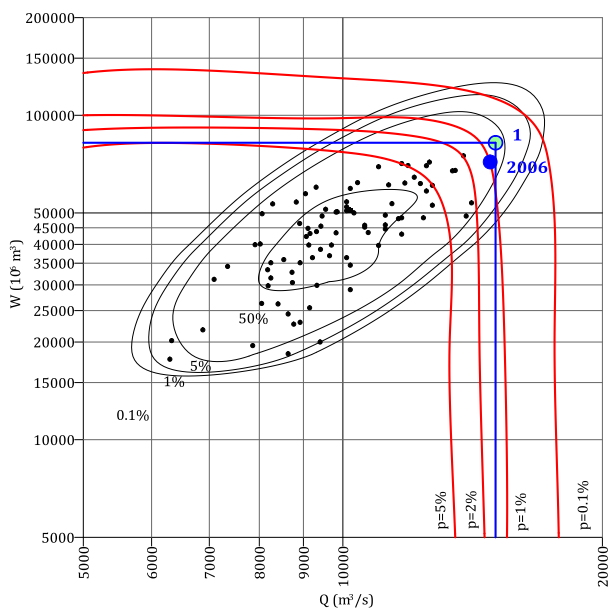
Slika 1/2. Dvodimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Dunav u profilu hidrološke stanice Bogojevo



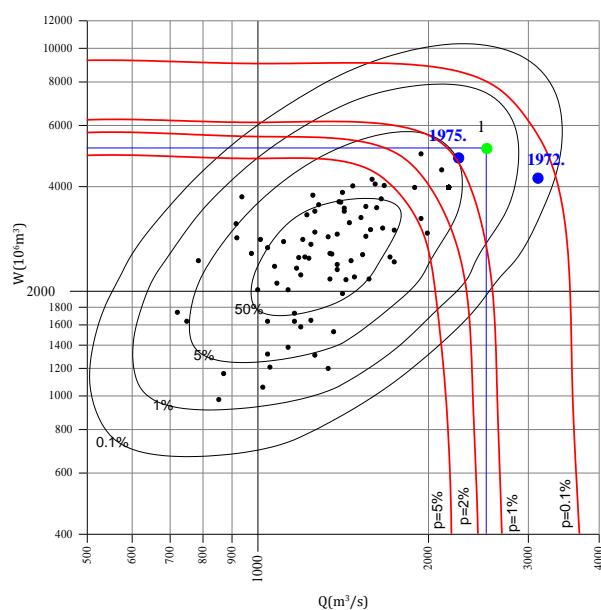
Slika 1/3. Dvovimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Dunav u profilu hidrološke stanice Slankamen



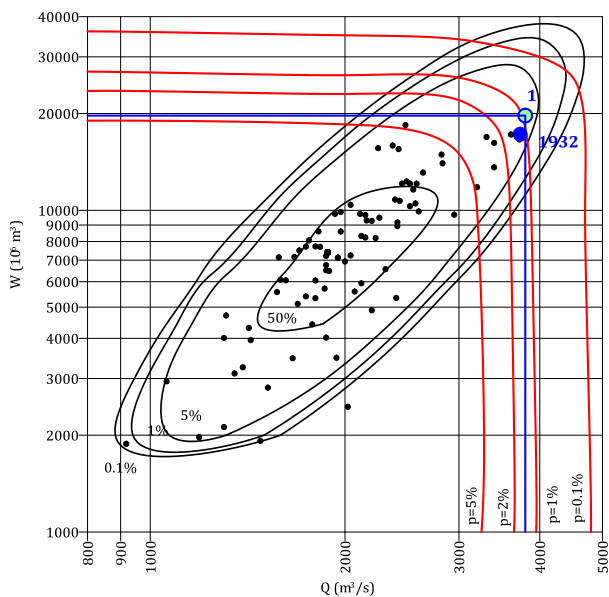
Slika 1/5. Dvovimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Dunav u profilu hidrološke stanice Oršava



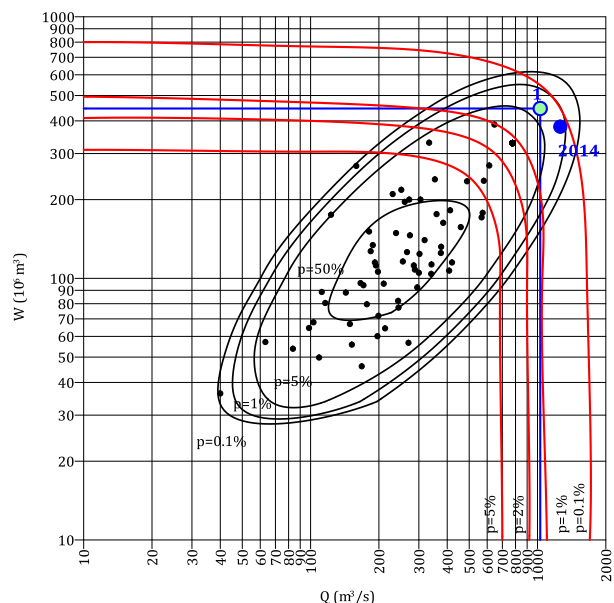
Slika 1/4. Dvovimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Dunav u profilu hidrološke stanice Pančevo



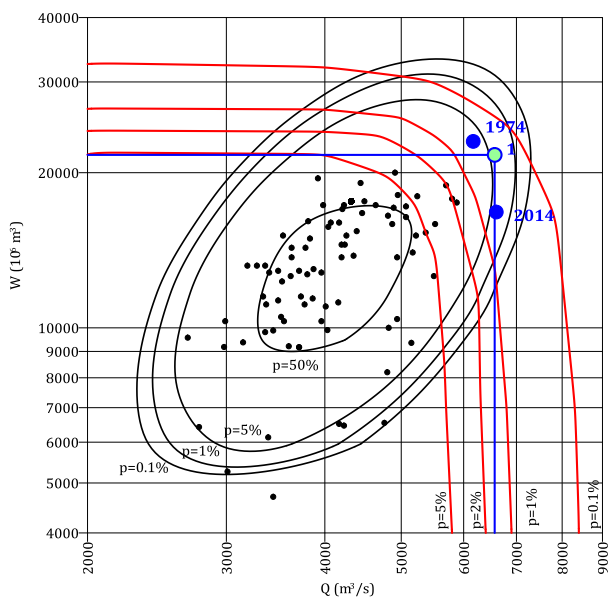
Slika 1/6. Dvovimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Drave u profilu hidrološke stanice Donji Miholjac



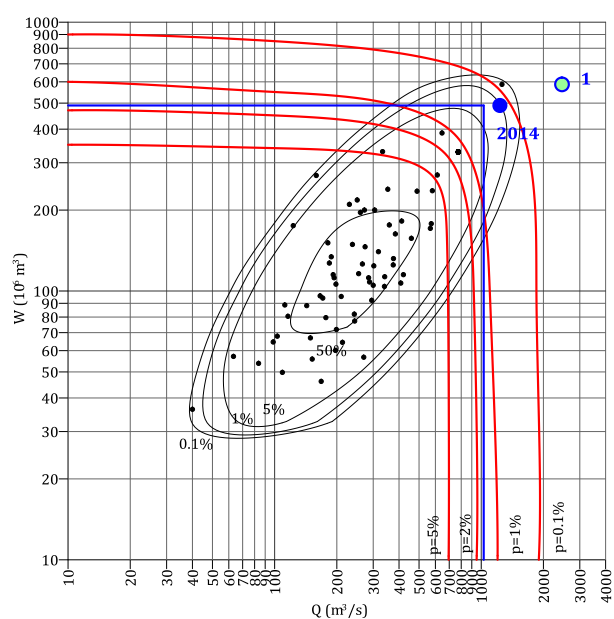
Slika 1/7. Dvovimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Tise u profilu hidrološke stanice Senta



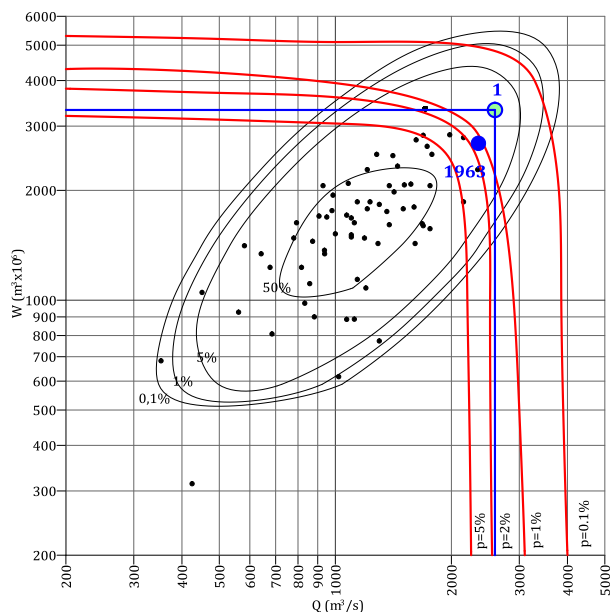
Slika 1/9.1 Dvovimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Kolubare u profilu hidrološke stanice Draževac (potopljeni površinski kopovi)



Slika /8. Dvovimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Save u profilu hidrološke stanice Sr. Mitrovica



Slika 1/9.2 Dvovimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Kolubare u profilu hidrološke stanice Draževac (nepotopljeni površinski kopovi)



Slika 1/10. Dvovimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma reke Velike Morave u profilu hidrološke stanice Ljubičevski most

Na osnovu prikazanih grafika na slikama 1/1-10 može se zaključiti da za određenu verovatnoću prevazilaženja $P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p}) = P$ postoji veoma širok dijapazon mogućnosti izbora korespondentnih vrednosti razmatranih parametara hidrograma poplavnog talasa.

Kvantitativni pokazatelji čvrstine definisane korelacione zavisnosti razmatranih parametara hidrograma velikih voda:

- Koeficijent linearne korelacije R ;
- Standardna greška ocene koeficijenta korelacije σ_R ,

ukazuju da je uspostavljena dvovimenzionalna korelaciona zavisnost, odnosno koincidencija osnovnih parametara hidrograma velikih voda statistički značajna, ako je zadovoljena nejednakost [13]:

$$|R| \geq 3\sigma_R. \quad (12)$$

$$\sigma_R = \frac{1-R^2}{\sqrt{N}} \quad (13)$$

gde je:

N – ukupan broj podataka.

Rezultati ocene statističke značajnosti uspostavljenih korelacionih zavisnosti osnovnih parametara hidrograma velikih voda, maksimalnih godišnjih proticaja i zapremina poplavnih talasa, na svim razmatranim profilima hidroloških stanica duž reke Dunav, dati su u tabeli 2.

Tabela 2. Prikaz rezultata ocene statističke značajnosti koincidencija maksimalnih godišnjih proticaja Q_{max} i maksimalnih godišnjih zapremina talasa na razmatranim profilima hidroloških stanica duž reke Dunav

Br	Hidrološka stanica	R	N	σ_R	$3\sigma_R$	Statističkat značajnost
1	Bezdan	0.405	85	0.091	0.272	+
2	Bogojevo	0.612	85	0.068	0.204	+
3	Slankamen	0.	86	0.061	0.182	+
4	Pančevo	0.746	85	0.048	0.144	+
5	Oršova	0.651	176	0.043	0.130	+
6	Donji MIholjac	0.618	83	0.068	0.204	+
7	Senta	0.842	85	0.032	0.095	+
8	Sremska Mitrovica	0.560	85	0.074	0.223	+
9.1	Draževac	0.736	64	0.057	0.171	+
9.1	Draževac	0.796	64	0.046	0.137	+
10	Ljubičevski most	0.702	67	0.062	0.185	+

Na osnovu prikazanih rezultata u tabeli 2 može se zaključiti da su koncidencije osnovnih parametara hidrograma velikih voda na Dunavu i njegovim pritokama statistički značajne, na nivou prihvatanja hipoteze od 95%, na svim razmatranim hidrološkim stanicama na teritoriji Republike Srbije.

4.2. Ocena statističke značajnosti karakterističnih tačaka na dijagramima koincidencije

Način određivanja karakterističnih tačaka na dijagramima dvovimenzionalne verovatniće (koincidencije) osnovnih parametara hidrograma velikih voda detaljno je prikazan u sledećem radu istih autora u ovom broju časopisa. Teorijski hidrogram, označen brojem 1 (tačka 1 na grafiku), sastavljen iz marginalnih verovatnoća – $P(Q_{max,p}, W_{max,p})$, koji predstavlja „maksimalni mogući“ hidrogram, jeste „kvazi stogodišnji“ hidrogram, po oba parametra (maksimalne ordinate hidrograma i maksimalne zapremine hidrograma), i on u suštini prevazilazi verovatnoću p , tj.

$p > P$. Da je to tako potvrđuju i položaji karakterističnih tačaka 1 na svim slikama 1/1-10, koje ne mogu da predstavljaju stogodišnji teorijski hidrogram ($p=1.0\%$), jer je evidentno da njihov stvarni položaj odgovara liniji prevazilaženja verovatnoće

$$P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P < p = 1.0\%. \quad (14)$$

Vrednosti stvarnih verovatnoća prevazilaženja $P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P < p = 1.0\%$, „maksimalno mogućih” hidrograma, odnosno „kvazi stogodišnjih” (tačke 1), po profilima hidroloških stanica, a na razmatranom sektoru Dunava, ocenjene na osnovu dijagrama koincidencija prikazanih na slikama 1/1-10 date su u tabeli 3.

Tabela 3. Pregled stvarne verovatnoće prevazilaženja tačke 1, $P < p = 1.0\%$, na svim izabranim hidrološkim stanicama duž toka reke Dunav

Br.	Hidrološka stanica	$P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P < p = 1.0\%$	Povratni period T (god)
1	Bezdan	0.20	500
2	Bogojevo	0.80	125
3	Slankamen	0.33	300
4	Pančevo	0.80	125
5	Oršava	0.80	125
6	Donji Miholjac	0.33	300
7.	Senta	0.25	400
8	Sremska Mitrovica	0.50	200
9.1	Draževac (potop.)	0.20	500
9.2	Draževac (nepotop)	0.20	500
10	Ljubičevski most	1.00	100

Kao što se u tabeli 3 vidi povratni periodi konstelacija stogodišnjih parametara hidrograma velikih voda (maksimalne ordinate i maksimalne zapremine hidrograma), obeleženih pod rednim brojem 1 na slikama 1/1-10, odgovaraju povratnim povratnim periodima od 100 godina (Ljubičevski most), odnosno od 125 (Bogojevo, Pančevo i Oršava) do 400 godina (Bezdan i Draževac).

4.3. Ocena statističke značajnosti istorijskih poplava na hidrološkim stanicama duž Dunava na teritoriji Republike Srbije

Takođe je interesantno proanalizirati povratne periode registrovanih istorijskih poplava, a koje su korišćene pri proračunu koincidencija osnovnih parametara hidrograma velikih voda, na svim profilima hidroloških stanica. U vezi sa o vim proanalizirane su samo istorijske poplave koje imaju povratne periode veće ili jednake od 100 godina. Rezultati ovih analiza prikazani su u tabeli 4.

Tabela 4. Pregled stvarne verovatnoće pojave istorijskih poplava na svim izabranim hidrološkim stanicama duž toka reke Dunav

Br	Hidrološka stanica	R.B pop. talasa na HS	$P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P$		Povratni period T (god)
			Istorijski poplavni talasi		
			god	p	
1	Bezdan	1	1965	0.25	400
2	Bogojevo	1	1965	0.80	125
3	Slankamen	1	2006	0.70	140
		2	1965	0.95	105
4	Pančevo	1	2006	1.00	100
5	Oršava	1	2006	0.50	200
6	Donji Miholjac	1	1972	0.15	667
		2	1975	1.00	100
7	Senta	1	1932	1.10	90
8	Sremska Mitrovica	1	1974	0.50	200
		2	2014	0.60	167
9. 1	Draževac (potop.)	1	2014	0.15	667
9.2	Draževac (nepotop.)	1	2014	0.09	1100
10	Ljubičevski most	1	1963	2.00	50

Podaci u tabeli 4 ukazuju da je na razmatrano sektoru Dunava, kroz našu zemlju, najviše statističkih značajnih istorijskih poplava, sa povratnim periodom većim od 100 godina, registrovano na hidrološkim stanicama Slankamen, Donji Miholjac i Sremskoj Mitrovici, ukupno po dve za raspoložive periode osmatranja. Na ostalim stanicama je registrovano samo po jedna poplava, sa izuzetkom hidrološke stanice Ljubičevski most, gde najveća registrirana poplava odgovara 50 – to godišnjem povratnom periodu.

5. ZAKLJUČAK

Ocena statističke značajnosti poplavnih talasa izvršena je na dva načina:

- Preko teorijskih „maksimalno mogućih” hidrograma, odnosno „kvazi stogodišnjeg” (tačka 1 na dijagramu koincidencije osnovnih parametara hidrograma velikih voda), slike 1/1-10;
- Preko „istorijskih hidrograma”, čije verovatnoće prevazilaženja osnovnih parametara hidrograma iznose: $P\{(Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P})\} = P$.

Na osnovi rezultata sprovedenih analiza može se zaključiti da se povratni periodu teorijskih „maksimalno mogućih” hidrograma, na razmatranom sektoru Dunava na teritoriji Republike Srbije nalaze u intervalu od 100 do 500 godina. Ovo samo ukazuje da su teorijski hidrogrami formirani na osnovu maksimalnih vrednosti parametara – ordinatom hidrograma i zapreminom poplavnog talasa istih verovatnoća pojave p , u celini gledano, preceñeni sa gledišta povratnog perioda ukupnog hidrograma.

Ocena statističke značajnosti „istorijskih poplava” je ukazala da su se, u raspoloživom periodu osmatranja, na razmatranom delu sliva Dunava, koji prolazi kroz našu zemlju, pojavljivale, uglavnom, jedna ili dve istorijske poplave. Povratni periodu ovih istorijskih poplava se kreću u intervalu od 50 do 667 godina, a za sliv reke Kolubare, za slučaj da je poplava iz maja 2014. godine bila uspešno sprečena (bez izlivanja u površinske kopove REIK Kolubare i plavljenja grada Obrenovca), povratni period te popave bi bo reda veličine oko 1100 godina.

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 pruženju finansijskoj pomoći i podršci.

LITERATURA:

- [1] Abramowitz M., Stegun A. I.: Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables, Dover Publications, INC., New York, 1972.
- [2] Adamson P. T., Metcalfe A. V., Parmentier B.: Bivariate extreme value distributions: An application of Gibbs sampler to analysis of floods, Water Resources Research, Vol. 35, No. 29, pp 2825-2832, 1999.
- [3] Chebana F.: Multivariate Analysis of Hydrological Variables, doi: 10.1002/9780470057339.vnn044, 2013.
- [4] Haines Y. Y., Lambert J. H., Li D.: Risk of extreme events in multiobjective framework, Water Resources Bulletin, American Water Resources Association, Vol. 28, No. 1, pp 201-209, 1992.
- [5] Prohaska S., Marjanović N., Čabrić M.: Dvoparametarsko definiranje velikih voda, Vode Vojvodine, Novi Sad, 1978.
- [6] Prohaska S et al.: Concidence of Flood Flow of the Danube River and its Tributary, The Danube and its Basin – A Hydrological Monograph, Follow-up volime IV, Regional Cooperation of the Danube Countries in the Frame of the International Hydrological Programme of UNESCO, Bratislava, 1999.
- [7] Prohaska S.: Hidrologija II Deo, Hidrološko prognoziranje, modelovanje i praktična primena, Institut „Jaroslav Černi“, Rudarsko-geološki fakultet, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd, 2006.
- [8] Prohaska S., Ilic A.: Coincidence of Flood Flow of the Danube River and Its Tributaries, (In: Mitja Brilly (Ed.): Hydrological Processes of the Danube River Basin - Perspectives from the Danubian Countries), Publisher: Springer, ISBN 978-90-481-3422-9, Book Chapter 6, pp. 175-226. DOI: 10.1007/978-90-481-3423-6_6, 2010.
- [9] Prohaska S., Ilić A.: Nov pristup u definisanju teorijskih hidrograma velikih voda na hidrološki izučnim 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.
- [10] 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, 2017.
- [11] Singh V. P., Strupczewski W. G.: On the status of flood frequency analysis, Hydrological Processes, Vol. 16, pp 3737-3740, 2002.
- [12] Singh V. P., Strupczewski W. G.: Editorial: Journal of Hydrologic Engineering, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:4, 2007.
- [13] Yevjevich V.: Probability and Statistics in Hydrology, Water Resources Publications, Fort Collins, Colo. U.S.A, 1972.

STATISTICAL SIGNIFICANCE ASSESSMENT OF HISTORIC FLOODS AT THE DANUBE RIVER 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 procedure for assessing the statistical significance of registered historical floods using a comprehensive procedure for defining theoretical flood wave hydrographs at hydrological stations. 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, as well as the theory of defining two-dimensional distribution (coincidence) functions of different parameters of hydrographs. In this particular case, two basic parameters of flood wave hydrographs were treated - ordinate of maximum annual flow and maximum volume 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 probability 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 applied procedure is based on the correlation analysis of two basic parameters of flood hydrographs - maximum hydrograph ordinates (peak) and volume. To define the probability of simultaneous occurrence of the mentioned parameters, the PROIL model was used, which defines the probabilities of exceeding two

random variables, in the particular case of the two considered hydrograph parameters in the form:

$$P \{Q_{max} \geq q_{max,p}\} \cap \{W_{max} \geq w_{max,p}\} = P \quad (1)$$

Where:

Q_{max} - maximum hydrograph ordinate,

$q_{max,p}$ - maximum flow of probability of occurrence p ,

W_{max} - maximum hydrograph volume,

$w_{max,p}$ - maximum flood wave volume of probability of occurrence p ,

P – exceedance probability.

The spatial positions of isolines of exceedance of the two flood hydrograph parameters and the empirical points of parameters of the considered historical floods at the Q_{max} - W_{max} correlation field, allow direct identification of the historical flood exceedance probability, its statistical significance.

The paper presents the procedure applied to assess the statistical significance of the largest recorded floods along the Danube so far. The results are presented at the profiles of the hydrological stations under consideration, by sectors and nodes at the confluence of the Danube and main tributaries: the Drava, the Tisa, the Sava and the Velika Morava rivers.

Key words: theoretical hydrograph, “limited runoff intensity” method, hydrologically investigated profiles, maximum flow, flood wave volume, coincidence of hydrograph’s parameters, historical floods.

Redigovano 3.11.2019.