

SVEOBUHVAJNI PRISTUP ODREĐIVANJU HIDROGRAMA VELIKIH VODA RIJEKE DRAVE MJERODAVNIH ZA PROJEKTIRANJE U HIDROTEHNICI

prof. dr. Stevan Prohaska, dipl. ing. građ.
Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi"
Jaroslava Černog 80,
11000 Beograd, Srbija
stevan.prohaska@jcerni.co.rs

Aleksandra Ilić, dipl. ing. građ.
Građevinsko-arhitektonski fakultet
Aleksandra Medvedeva 14,
18000 Niš, Srbija
aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs

Ovaj je rad posvećen određivanju teorijskih hidrograma velikih voda rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac. Primijenjena se procedura temelji na jednom novom sveobuhvatnom pristupu koji usporedno vodi računa o dva osnovna parametra hidrograma velikih voda – maksimalnoj ordinati hidrograma (vrhu) i zapremini poplavnog vala. Razrađena procedura u osnovi se oslanja na praktičnu primjenu, usporedno, metode „graničnog intenziteta otjecanja“ (GIO) za proračun teorijskih hidrograma velikih voda različitih vjerojatnosti pojave i teorije dvodimenzionalnog definiranja funkcija raspodjele (koincidencije) navedenih parametara hidrograma velikih voda. Važna pretpostavka je da se, u konkretnom slučaju, tretiraju osnovni parametri hidrograma velikih voda – ordinate maksimalnih godišnjih protoka i maksimalne zapremine hidrograma velikih voda u istoj kalendarskoj godini. Kalibracija parametara metode GIO vrši se u uvjetima izjednačavanja teorijskih vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih zapremina istih vjerojatnosti pojave, koji se dobivaju primjenom metode GIO, odnosno standardne procedure prilagođavanja navedenih vremenskih serija teorijskim funkcijama raspodjele koje se najčešće koriste u hidrološkoj praksi.

Za definiranje vjerojatnosti istovremene pojave navedenih parametara hidrograma velikih voda (vrha i maksimalne zapremine hidrograma velikih voda) korištena je procedura ko incidencije dvije slučajne varijable, prikazana u literaturi (Prohaska et al., 1999.; Prohaska et al., 2016.). Definirane ko incidencije vjerojatnosti prekoračenja dva promatrana parametra hidrograma velikih voda služe za odabir kombinacija koje će se koristiti za kalibraciju parametara metode GIO.

Na kraju je prikazan praktični primjer definiranja teorijskih hidrograma velikih voda različitih vjerojatnosti pojave na rijeci Dravi u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac.

Ključne riječi: teorijski hidrogram, vjerojatnost pojave, metoda „graničnog intenziteta otjecanja“, hidrološki izučeni profili, maksimalni protok, zapremina vala, Drava – Donji Miholjac (Hrvatska)

1. UVOD

Određivanje mjerodavnih hidrograma velikih voda različitih vjerojatnosti pojave predstavlja jedan vrlo važan zadatak praktične hidrologije, s obzirom da se isti koriste za mjerodavne u projektiranju različitih građevina u hidrotehnici. U dosadašnjoj hidrološkoj praksi, u Srbiji i zemljama u okruženju, primjenjuju se različiti pristupi za njegovo određivanje, u zavisnosti od vrste i obima raspoloživih podataka. Postupci koji se primjenjuju u funkciji su raspoloživih podataka. U osnovi metode se dijele na one koje se primjenjuju na hidrološki izučeni slivovima, s praćenim i mjerenim podacima, te metode za hidrološki neizučene slivove na kojima ne postoje praćeni i mjereni podatci, ali bez jasnog stava što je u praksi najsvrsishodnije primjenjivati. U ovom se radu prikazuje jedan novi pristup određivanju teorijskih hidrograma velikih voda na riječnim profilima gdje postoje dugogodišnje serije praćenja i mjerenja (na hidrološkim postajama).

Dosadašnja hidrološka praksa ukazuje da uglavnom sve metode i postupci određivanja teorijskih hidrograma u profilima hidroloških postaja u osnovi polaze od toga da se maksimalna ordinata teorijskog hidrograma definira na temelju raspoložive serije maksimalnih godišnjih protoka primjenom različitih teorijskih funkcija raspodjele vjerojatnosti. Za drugi, također vrlo značajan parametar hidrograma velikih voda, a to je zapremina poplavnog vala, koriste se raznorazne procedure, često izvedene na bazi izračunatih vremena porasta hidrograma, vremena inercijalnog „zadržavanja“ oborina u slivu, vremena koncentracije i sl. Za proračun ovih vremenskih parametara koriste se uglavnom empirijske zavisnosti iz literature, često neproverene za uvjete klimatskih i fizičko-geografskih karakteristika promatranog sliva.

Procjena računskih velikih voda na rijekama je početni korak kako pri dimenzioniranju raznih hidrotehničkih građevina, tako i pri ocjeni rizika od poplava i stvaranju strategije upravljanja rizikom.

Značaj neophodnosti promatranja zajedničkih vjerojatnosti prekoračenja različitih parametara hidrograma otjecanja ističu Singh i Strupczewsky (2007.). Predstavljena je uloga sagledavanja odnosa vrha poplavnog vala i zapremine u modeliranju sustava zaštite od poplava u gradovima. Bilo je mnogo pokušaja ne bi li se na najadekvatniji način prikazala veza između parametara hidrograma otjecanja i konstruirale raspodjele vjerojatnosti u višedimenzionalnom prostoru. Izračunavanje kvantila raspodjele u višedimenzionalnom prostoru omogućavaju različitu kombinaciju varijabli koje daju isti rizik (Chebana i Ouarda, 2011.).

Imajući sve ovo u vidu, autori ovog rada su razradili jedan drugačiji pristup definiranju teorijskih hidrograma velikih voda na hidrološkim postajama, kod kojeg se svi parametri metoda kalibriraju na temelju opaženih

podataka, u konkretnom slučaju su to vremenske serije maksimalnih godišnjih protoka, zatim maksimalnih zapremine poplavnih valova, kao i karakteristike praćenih oblika poplavnih valova. U osnovi proračuna teorijskih hidrograma velikih voda koristi se metoda „graničnog intenziteta otjecanja“ (GIO) (Prohaska, 2006.). Kalibracija parametara metode GIO vrši se u uvjetima izjednačavanja teorijskih vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih zapremine istih vjerojatnosti pojave, koji se dobivaju primjenom metode GIO, odnosno standardne procedure prilagođavanja navedenih vremenskih serija teorijskim funkcijama raspodjele koje se najčešće koriste u hidrološkoj praksi. Za odabir najpovoljnijih kombinacija osnovnih parametara hidrograma – vrha i zapremine poplavnog vala koriste se karakteristične točke na odabranoj liniji vjerojatnosti prekoračenja na unaprijed definiranoj dvodimenzionalnoj raspodjeli vjerojatnosti osnovnih parametara hidrograma velikih voda.

U radu su prikazane primijenjene metode za proračun hidrograma velikih voda, kao i za proračun koincidencije parametara računskih hidrograma. Praktična primjena predloženog novog sveobuhvatnog pristupa predstavljena je za slučaj definiranja teorijskih hidrograma velikih voda rijeke Drave u profilu oficijelne hidrološke postaje Donji Miholjac.

2. TEORIJSKA OSNOVA NOVOG SVEOBUHVAJNOG PRISTUPA ZA ODREĐIVANJE RAČUNSKIH HIDROGRAMA VELIKIH VODA NA HIDROLOŠKI IZUČENIM PROFILIMA

2.1 Osnovne pretpostavke

Pod „računskim hidrogramima velike vode“ podrazumijevaju se teorijski hidrogrami, različitih vjerojatnosti pojave, čiji parametri (maksimalna ordinata i zapremina poplavnih valova) korespondiraju različitim i/ili istim teorijskim vrijednostima parametara koji se dobivaju putem klasične statističko-probabilističke procedure.

Za definiranje računskih hidrograma velikih voda u profilima hidroloških postaja neophodno je raspolagati dugogodišnjim vremenskim serijama maksimalnih godišnjih protoka, maksimalnih zapremine poplavnih valova, kao i registriranim zapisima oblika hidrograma. Vremenske serije maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih zapremine poplavnih valova koriste se za definiranje njihovih teorijskih vrijednosti različitih vjerojatnosti pojave, odnosno povratnog perioda. Zapis hidrograma registriranih poplava na limnigrafskim postajama (kontinuirana praćenja) ili na vodomjerima (s dnevnim vremenskim razdobljem diskretizacije) služe za definiranje oblika hidrograma.

Za definiranje osnovnih parametara teorijskih hidrograma velikih voda, kao i njihovog oblika, u osnovi se koristi metoda „graničnog intenziteta otjecanja“ (GIO). Osnova za izbor kombinacija karakterističnih parametara za koje se definiraju teorijski hidrogrami je unaprijed definiran dvodimenzionalni zakon raspodjele vjerojatnosti pojave osnovnih parametara hidrograma – vrha i zapremine poplavnog vala. Parametri oblika hidrograma određuju se na temelju realno opaženih hidrograma velikih voda na promatranoj hidrološkoj postaji.

2.2 Metoda „graničnog intenziteta otjecanja“ (GIO)

Polazna postavka teorije GIO bazira se na primjeni racionalne teorije riječnog otjecanja. Prema toj pretpostavki maksimalni protok vjerojatnosti pojave p ($Q_{\max,p}$) se računa po formuli (Prohaska, 2006.):

$$Q_{\max,p} = 16.67 \cdot \bar{\psi}_p(\tau) \cdot \varphi \cdot H_{\max,dn,p} \cdot F \quad (1)$$

gdje je:

$Q_{\max,p}$ – maksimalna ordinata hidrograma za vjerojatnost pojave p ($m^3 s^{-1}$),

φ – ukupni koeficijent otjecanja,

$H_{\max,dn,p}$ – računski vrijednost maksimalne dnevne sume oborina vjerojatnosti pojave p ,

F – površina sliva (km^2),

τ – vrijeme koncentracije (min),

$\bar{\psi}_p(\tau)$ – ordinata redukcijske krivulje kiše maksimalnog srednjeg intenziteta kiše za trajanje kiše

$$\bar{\psi}_p(\tau) = \left(\frac{\psi_p(\tau)}{\tau} \right) \quad (2)$$

$\psi_p(\tau)$ – ordinata redukcijske krivulje maksimalne visine kiše vjerojatnosti pojave p , za trajanje kiše τ , koja se računa na sljedeći način

$$\psi_p(\tau) = \frac{H(\tau)_p}{H_{\max,dn,p}} \quad (3)$$

$H(\tau)_p$ – računski visina kiše za trajanje kiše τ_p vjerojatnosti pojave p

Prema teoriji graničnog intenziteta otjecanja računsko trajanje kiše τ je jednako vremenu koncentracije τ_p , koje je uzročno-posljedično vezano s maksimalnom ordinatom hidrograma u vidu (2006.):

$$\tau_p = \frac{16.67 \cdot K \cdot L}{a \cdot I_{ur}^{1/3} \cdot Q_{\max,p}^{1/4}} \quad (4)$$

gdje je:

K – odnos vremena retardacije i porasta hidrograma,
 a – koeficijent koji ovisi o hrapavosti riječnog korita i srednjeg pada,

L – dužina glavnog toka (km),

I – srednji pad toka (‰).

Pod pretpostavkom da su podatci o intenzitetima kiša i maksimalnim dnevnim sumama oborina poznati, jednačba (1) se, zbog uvjetno-posljedičnih veza vremena koncentracije s maksimalnom ordinatom hidrograma, ne može riješiti, zato se uvodi pomoćna zavisnost $S(E)$, što se može vidjeti u tekstu koji slijedi.

U osnovi oblik hidrograma velikih voda ovisi od odnosa maksimalne ordinate hidrograma $Q_{\max,p}$ i odgovarajuće zapremine poplavnog vala W_p . Uvođenjem pomoćne zavisnosti $S(E)$ maksimalne ordinate hidrograma za različite vjerojatnosti pojave p računaju se po pojednostavljenoj proceduri kao što je dano u nastavku.

Proračun teorijskih vrijednosti maksimalnog godišnjeg protoka $Q_{\max,p}$ po metodi GIO vrši se po formuli (Prohaska, 2006.):

$$Q_{\max,p} = \frac{(\varphi H)_p \cdot F}{100} \cdot S(E) \quad (5)$$

gdje je:

$(\varphi H)_p$ – uvjetni sloj otjecanja,

$S(E)$ – pomoćni modul maksimalne izdašnosti za pomoćno vrijeme dotjecanja E ,

$$E = \frac{16.67 \cdot K \cdot L}{a \cdot I_{ur}^{1/3} \cdot F_p^{1/4}} \quad (6)$$

$$F_p = \frac{(\varphi H)_p \cdot F}{100} \quad (7)$$

Za izračunato E se, na temelju poznate zavisnosti $S(E)$ na profilu mjerodavne pluviografske postaje, određuje vrijednost $S(E)$ za konkretan profil, odnosno, prema sljedećoj jednačbi:

$$\tau = \frac{E}{\sqrt[4]{S(E)}} \quad (8)$$

Proračun zapremine poplavnog vala vrši se primjenom sljedeće jednadžbe:

$$W_p = 1000 \cdot h_p \cdot F \quad (9)$$

gdje je:

W_p – zapremina hidrograma poplavnog vala vjerojatnosti pojave p ,

h_p – sloj otjecanja (mm),

$$h_p = (\varphi H)_p \cdot \psi_p(\tau) \quad (10)$$

U konkretnom slučaju ordinate teorijskog hidrograma velikih voda $Q_{p,i}$ ($i=1,2,3,\dots,TB$, TB – baza hidrograma) računaju se po Goodrichovom zakonu raspodjele:

$$Q_{p,i} = Q_{\max,p} \cdot 10^{-a \frac{1-X_i}{X_i}} \quad (11)$$

$$T_p = B_p \cdot \frac{0.278 \cdot \lambda^* \cdot h_p}{q_{\max,p}} \quad (12)$$

gdje je:

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

T_p – uvjetno trajanje porasta hidrograma vjerojatnosti pojave p ,

$q_{\max,p} = \frac{Q_{\max,p}}{F}$ – maksimalno specifično

otjecanje ($m^3 s^{-1} km^{-2}$),

a – parametar koji ovisi o koeficijentu nesimetričnosti hidrograma K_s , odnosno koeficijentu oblika hidrograma λ^* ,

$$K_s = \frac{1}{1+K} \quad (13)$$

$$\lambda^* = \frac{Q_{\max,p} \cdot T_p}{W_{por}} \quad (14)$$

B_p – koeficijent koji se kalibrira

W_{por} – zapremina hidrograma u fazi porasta.

Međusobne zavisnosti parametara a , λ^* i K_s mogu se naći u literaturi (Prohaska i Ristić 2002).

Na temelju prikazane teorijske osnove može se zaključiti da su osnovni parametri koji se kalibriraju po metodi GIO: K – odnos vremena retardacije i porasta hidrograma, a – koeficijent koji ovisi od hrapavosti riječnog korita i srednjeg pada i B_p – koeficijent.

Kratki prikaz teorijske osnove dvodimenzionalnih funkcija raspodjele

Teorija se bazira na praktičnoj primjeni dvodimenzionalne normalne funkcije raspodjele dvije slučajne varijable X i Y . U osnovi, dvodimenzionalna normalna raspodjela je raspodjela s gustoćom vjerojatnosti koja se definira na sljedeći način (Prohaska et al., 1978.):

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sqrt{1-\rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2 \cdot (1-\rho^2)} \left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho \cdot (x-\mu_x) \cdot (y-\mu_y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right]} \quad (15)$$

gdje su:

x, y – istovremene realizacije slučajnih varijabli X i Y , respektivno;

μ_x, μ_y – matematička očekivanja X i Y ;

σ_x, σ_y – standardne devijacije X i Y ;

ρ – koeficijent korelacije X i Y .

Da bi se odredila gustoća raspodjele, $f(x, y)$, prvi korak je određivanje marginalnih vjerojatnosti $f(x, \cdot)$ i $f(\cdot, y)$ kao:

$$f(x, \cdot) = \int_{y=-\infty}^{y=\infty} f(x, y) dy \quad (16)$$

$$f(\cdot, y) = \int_{x=-\infty}^{x=\infty} f(x, y) dx \quad (17)$$

Njihove kumulativne vjerojatnosti su onda:

$$F(x, \cdot) = \int_{t=-\infty}^{t=x} f(t, \cdot) dt \quad (18)$$

i

$$F(x, \cdot) = \int_{t=-\infty}^{t=x} f(t, \cdot) dt \quad (19)$$

Kumulativna raspodjela vjerojatnosti, $F(x, y)$ se definira:

$$F(x, y) = P[X \leq x \cap Y \leq y] = \int_{t=-\infty}^{t=x} \int_{z=-\infty}^{z=y} f(t, z) dt dz \quad (20)$$

Sljedeći korak je određivanje vjerojatnosti prekoračenja $\Phi(x, y)$ u dvodimenzionalnom prostoru vjerojatnosti (Prohaska et al., 1978.):

$$\Phi(x, y) = \int_{t=x}^{t=+\infty} \int_{z=y}^{z=+\infty} f(t, z) dt dz = P[X > x \cap Y > y] = 1 - P[X < x \cup Y < y] = 1 - F(x, \cdot) - F(\cdot, y) + F(x, y) \quad (21)$$

Primjena dvodimenzionalne raspodjele vjerojatnosti pri statističkoj analizi različitih parametara hidrograma velikih voda zahtijeva pojednostavljenja da bi opisana procedura proračuna bila primjenjiva.

Osnovno se pojednostavljenje odnosi na pretpostavku da se svaka od promatranih karakteristika hidrograma pokorava Normalnom (Log-normalnom) zakonu raspodjele, što ne mora biti slučaj. Detaljnija teorijska osnova definiranja dvodimenzionalne funkcije raspodjele s primjenom grafo-analiitičke procedure (Abramowitz i Stegun, 1972.) u rješavanju iste može se naći u literaturi (Prohaska et al., 1999.).

3. PRIKAZ REZULTATA PRORAČUNA TEORIJSKIH HIDROGRAMA VELIKIH VODA NA RIJECI DRAVI U PROFILU HIDROLOŠKE POSTAJE DONJI MIHOLJAC

Izložena metodologija za proračun teorijskih hidrograma velikih voda na hidrološki izučanim profilima (hidrološkim postajama) je praktično primijenjena u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac na rijeci Dravi. Korištene su vremenske serije maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih zapremina, kao i registrirani oblici povijesnih poplavnih valova za razdoblje 1931.-2014. godina. Na temelju podataka, primjenom klasične procedure prilagođavanja teorijskih funkcija raspodjele vjerojatnosti, izračunate su teorijske vrijednosti slučajnih varijabli za različite vjerojatnosti pojave. Pri tome su korišteni sljedeći zakoni raspodjele: Pearson III, Log Pearson III, Gumbel, Ln Normalna 3 i Ln Normalna 2. Kvaliteta prilagođavanja je testirana pomoću χ^2 testa, Kolmogorov-Smirnov testa i ω^2 .

Za definiranje koincidencije promatranih osnovnih parametara hidrograma velikih voda, odnosno definiranje dvodimenzionalnog zakona raspodjele dvije slučajne varijable – maksimalnog godišnjeg protoka i maksimalne godišnje zapremine poplavnog vala korištena je procedura

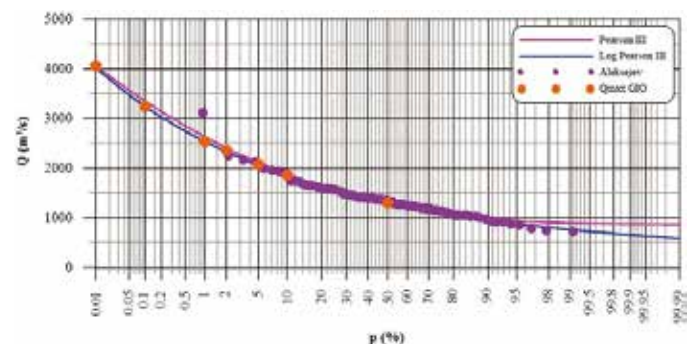
prikazana u poglavlju 2.3 ovoga rada. Rezultati proračuna prikazuju se grafički u vidu linija istih vjerojatnosti pojave (dvodimenzionalne funkcije gustoće) i linije prekoračenja vjerojatnosti (dvodimenzionalne funkcije raspodjele). Neophodni parametri oblika hidrograma određeni su na temelju snimljenih hidrograma velikih voda na promatranoj hidrološkoj postaji.

3.1 Rezultati proračuna vjerojatnosti pojave osnovnih parametara hidrograma velikih voda

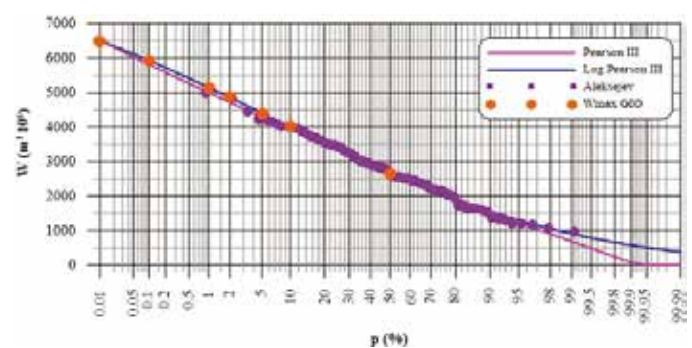
Pri proračunu teorijskih vrijednosti vjerojatnosti maksimalnih godišnjih protoka, kao i maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih valova Drave u profilu postaje Donji Miholjac korištene su prethodno navedene teorijske raspodjele. Rezultati testiranja prilagođavanja teorijskih i empirijskih raspodjela su pokazali da se za vremensku seriju maksimalnih godišnjih protoka najbolje slaganje dobiva za Log Pearson III funkciju raspodjele, a za seriju maksimalnih zapremina poplavnih valova za Pearson III zakona raspodjele. Rezultati ovih proračuna su prikazani numerički u tablici 1, kao i grafički na slikama 1 i 2.

Tablica 1: Prikaz teorijskih vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih zapremina poplavnih valova rijeke Drave u profilu postaje Donji Miholjac po Log Pearson III zakonu raspodjele

Varijabla	Vjerojatnost pojave p (%)						
	0.01	0.1	1.0	2.0	5.0	10.0	50.0
$Q_{\max,p}$ (m ³ s ⁻¹)	4013	3242	2534	2329	2060	1852	1307
$W_{\max,p}$ (10 ⁶ m ³)	6506	5929	5149	4855	4408	4008	2660



Slika 1: Teorijske vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac po Log Pearson III i Pearson III funkciji raspodjele i metodi GIO



Slika 2: Teorijske vrijednosti maksimalnih godišnjih zapremina rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac po Log Pearson III i Pearson III funkciji raspodjele i metodi GIO

3.2 Rezultati proračuna dvodimenzionalne vjerojatnosti (koincidencije) osnovnih parametara hidrograma velikih voda

Dvodimenzionalni zakon vjerojatnosti (koincidencije) osnovnih parametara hidrograma velikih voda rijeke Drave u profilu postaje Donji Miholjac definiran je na temelju sinkronih podataka istih vremenskih serija koje su korištene u poglavlju 3.1. Definirane su:

- funkcije gustoće (linije istih dvodimenzionalnih vjerojatnosti pojave):
 $F(Q_{\max}; W_{\max}) = p$, za vjerojatnosti $p = 0,1; 1,0; 2,0$ i 5% ;
- funkcije raspodjele (linije prekoračenja dvodimenzionalnih vjerojatnosti):

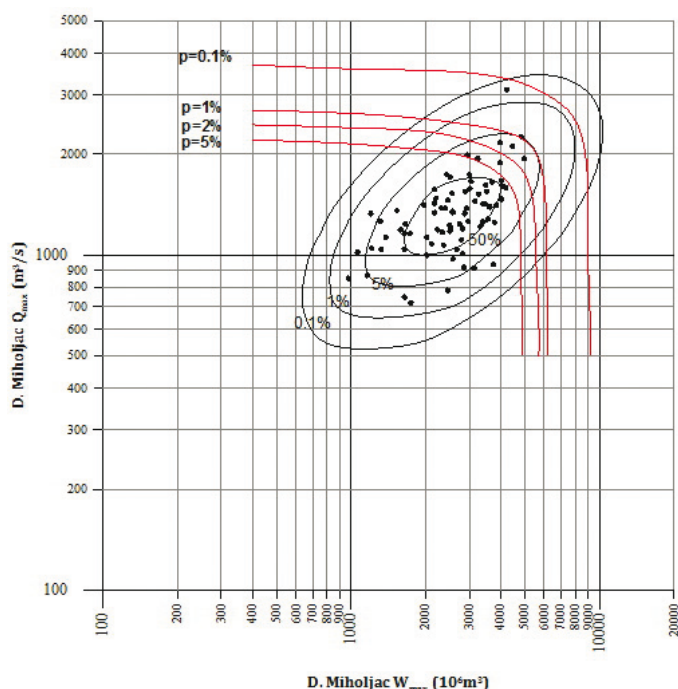
$$P \{ (Q_{\max} \geq q_{\max, p}) \cap (W_{\max} \geq w_{\max, p}) \} = P \quad (22),$$

za vjerojatnosti prekoračenja $P = 0,1; 1,0; 2,0$ i $5,0\%$.

Kvantitativni pokazatelji čvrstoće definirane korelacijske zavisnosti promatranih parametara hidrograma velikih voda rijeke Drave u profilu postaje Donji Miholjac iznose:

- koeficijent linearne korelacije $R = 0,581$;
- standardna greška ocjene koeficijenta korelacije $\sigma_R = 0,074$.

Oni ukazuju da je uspostavljena dvodimenzionalna korelacijska zavisnost, odnosno koincidencija osnovnih parametara hidrograma velikih voda statistički značajna, zato što je zadovoljena nejednakost (Yevjevich, 1972.):



Slika 3: Dvodimenzionalna raspodjela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma (maksimalne ordinate – Q_{\max} i maksimalne zapremine vala – W_{\max}) rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac

$$|R| \geq 3\sigma_R \quad (23)$$

Rezultat proračuna dvodimenzionalne funkcije raspodjele osnovnih parametara hidrograma velikih voda prikazan je na slici 3.

Na temelju dijagrama prikazanog na slici 3 može se zaključiti da za određenu vjerojatnost prekoračenja $P \{ (Q_{\max} \geq q_{\max, p}) \cap (W_{\max} \geq w_{\max, p}) \} = P$ postoji vrlo širok spektar mogućnosti izbora korespondentnih vrijednosti promatranih parametara hidrograma poplavnog vala.

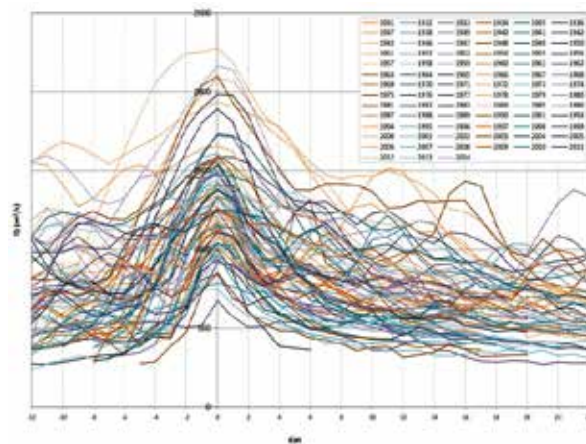
3.3 Parametri oblika hidrograma velikih voda Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac

Svi neophodni parametri oblika hidrograma po metodi GIO proizlaze iz odnosa vremena retardacije (opadanja) i vremena porasta hidrograma, tj. parametra K . Za njegovo određivanje koriste se realni podatci praćenih hidrograma poplavnih valova. U konkretnom slučaju rijeke Drave u profilu postaje Donji Miholjac korišteni su hidrogrami iz razdoblja 1931.–2014. godine. Svi maksimalni hidrogrami po godinama predstavljeni su na istom dijagramu, svodenjem maksimalne ordinate hidrograma na isti vremenski presjek. Na taj je način dobiven širi opseg vremenskog prostiranja hidrograma, što je prikazano na slici 4.

Na temelju ovog prikaza evidentno je da prevladavajući odnos vremena retardacije i porasta hidrograma rijeke Drave u profilu postaje Donji Miholjac iznosi: $K=2,0$, a na taj način koeficijent nesimetričnosti hidrograma je: $K_s=0,33$.

Korištenjem međusobne zavisnosti parametara a , λ^* i K_s , koja se može naći u literaturi (Prohaska i Ristić, 2002.), slijede ostali parametri metode GIO, neophodni za definiranje oblika hidrograma, i to:

$$\lambda^* = 0,8, a = 1,01.$$



Slika 4: Oblici registriranih hidrograma rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac

3.4 Rezultati proračuna teorijskih hidrograma velikih voda po metodi GIO

Predloženi novi pristup definiranju teorijskih hidrograma velikih voda na profilima hidroloških postaja, kombiniranom primjenom metode GIO i definiranih dvodimenzionalnih funkcija raspodjele vjerojatnosti osnovnih parametara hidrograma, ukazuje na velike mogućnosti njegove praktične primjene, što će se vidjeti u nastavku teksta. Naime, razrađena procedura daje široke mogućnosti izbora kombinacija osnovnih parametara hidrograma, kako za odabrane vjerojatnosti pojave p , tako i za vjerojatnosti prekoračenja P .

Za potrebe ilustracije praktične primjene prikazane procedure pretpostavljeno je da postoji vrlo čvrsta funkcionalna veza ($R=1,0$) između osnovnih parametara hidrograma velikih voda rijeke Drave u profilu postaje Donji Miholjac. To praktično znači da maksimalni godišnji protok određene vjerojatnosti pojave uvijek koincidira s maksimalnom godišnjom zapreminom iste vjerojatnosti pojave, što u biti, imajući u vidu rezultate prikazane na slici 3, ne odgovara stvarnosti. Međutim, ova konstelacija parametara hidrograma ima smisla, jer ona u suštini predstavlja „maksimalno moguću“ kombinaciju, koja u konkretnom slučaju ima vjerojatnost prekoračenja:

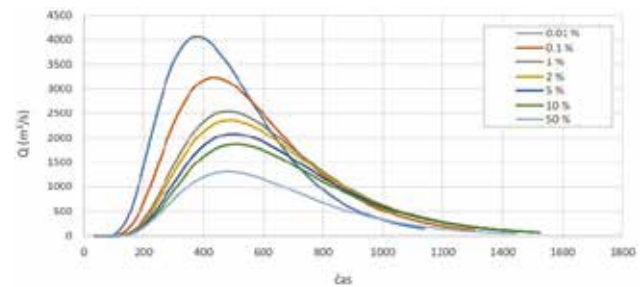
$$P \{ (Q_{\max} \geq q_{\max,p}) \cap (W_{\max} \geq w_{\max,p}) \} > P.$$

Ilustracije radi, prvi proračun teorijskih hidrograma velikih voda po metodi GIO rađen je za „maksimalno moguću“ kombinaciju osnovnih parametara hidrograma velikih voda: maksimalni godišnji protok i maksimalna zapremina poplavnog vala. Za ove pretpostavke parametri metode GIO kalibriraju se na izračunate funkcije raspodjele maksimalnih godišnjih protoka (slika 1) i maksimalnih zapremina poplavnih valova (slika 2). Rezultati proračuna osnovnih elemenata hidrograma velikih voda rijeke Drave u profilu postaje Donji Miholjac, po metodi GIO, prikazani su numerički u tablici 2. U tablici su, također, prikazani i kalibrirani parametri metode GIO.

S ciljem verifikacije metode GIO na slikama 1 i 2 su prikazane i izračunate teorijske vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih zapremina poplavnih valova po metodi GIO. Kao što se vidi postignuto je vrlo dobro slaganje između vrijednosti izračunate primjenom klasične statističko-probabilističke analize i vrijednosti

dobivene po metodi GIO.

Izračunati teorijski hidrogrami velikih voda različite vjerojatnosti pojave rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac po metodi GIO, pod pretpostavkom da postoji vrlo čvrsta korelacijska veza ($R=1,0$) između promatranih osnovnih parametara hidrograma velikih voda, prikazani su na slici 5.



Slika 5: Prikaz teorijskih hidrograma velikih voda rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac za različite vjerojatnosti pojave

3.5 Rezultati proračuna teorijskih hidrograma velikih voda po metodi GIO za različite konstelacije osnovnih parametara hidrograma velikih voda

Prikazani rezultati definiranja dvodimenzionalnih funkcija raspodjele osnovnih parametara hidrograma velikih voda Drave u profilu postaje Donji Miholjac ukazuju na to da za određenu vjerojatnost prekoračenja $P \{ (Q_{\max} \geq q_{\max,p}) \cap (W_{\max} \geq w_{\max,p}) \} > P$ postoji vrlo širok spektar mogućih kombinacija maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih zapremina poplavnih valova. To praktično znači da postoji veliki broj kombinacija konstelacija osnovnih parametara hidrograma velikih voda koji odgovaraju istoj vjerojatnosti prekoračenja P . Zato je neophodno da se pronađe postupak koji će, sa stajališta korisnika rezultata, definirati najoptimalnije kombinacije.

Autori ovog rada predlažu da je za korisnike iz područja zaštite od poplava, a za unaprijed definiranu vjerojatnost prekoračenja P , najsvrsishodnije raditi sa sljedećim kombinacijama parametara istih marginalnih vjerojatnosti:

- maksimalni godišnji protok – maksimalna zapremina poplavnog vala istih marginalnih vjerojatnosti – $P(Q_{\max,p}, W_{\max,p})$,

Tablica 2: Pregled elemenata teorijskih hidrograma velikih voda rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac po metodi GIO

Elementi teorijskih hidrograma velikih voda								
P (%)	$(\varphi H)_p$	F_p	E (min)	S(E)	Q_p ($m^3 s^{-1}$)	q ($m^3 s^{-1} km^{-2}$)	h_p (mm)	W_p ($10^6 m^3$)
0,01	152,8	56 753	16 400	0,072	4 063	0,109	175,0	6 500
0,1	129,2	47 987	17 103	0,067	3 233	0,087	159,9	5 937
1,0	108,6	40 336	17 862	0,063	2 534	0,068	138,7	5 151
2,0	103,2	38 331	18 091	0,061	2 356	0,063	130,9	4 863
5,0	94,8	35 211	18 479	0,059	2 082	0,056	118,5	4 400
10,0	88,1	32 722	18 821	0,057	1 868	0,050	108,0	4 011
50,0	69,9	25 962	19 942	0,050	1 307	0,035	71,5	2 657

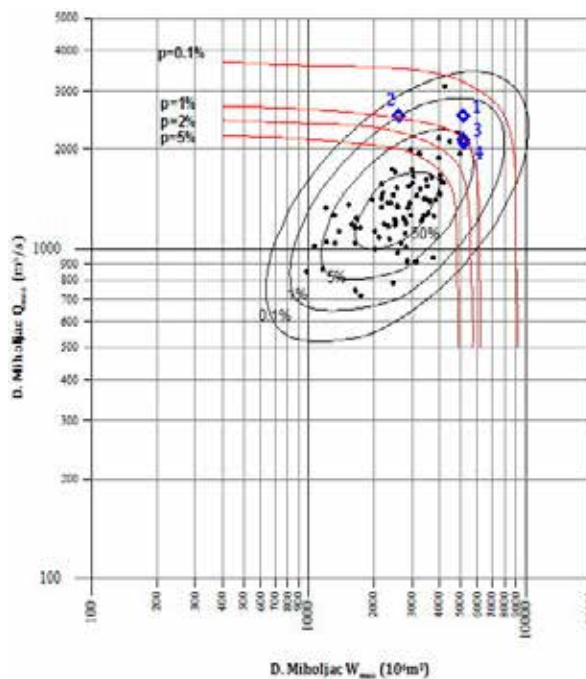
- maksimalni godišnji protok iste marginalne vjerojatnosti – odgovarajuća zapremina poplavnog vala za usvojenu vjerojatnost prekoračenja – $P(Q_{max,P} W_{cor,P})$,
- odgovarajući maksimalni godišnji protok za usvojenu vjerojatnost prekoračenja – maksimalna zapremina poplavnog vala iste marginalne vjerojatnosti – $P(Q_{cor,P} W_{max,P})$,
- najvjerojatnija kombinacija (Mod) maksimalnog godišnjeg protoka i maksimalne zapremine poplavnog vala za odabranu vjerojatnost prekoračenja – $P(Q_{Mod,P} W_{Mod,P})$.

U konkretnom slučaju rijeke Drave u profilu postaje Donji Miholjac vrijednosti parametara hidrograma velikih voda se preuzimaju iz rezultata primjene metode GIO za „maksimalno moguću“ kombinaciju (poglavlje 3.3), a korespondentne vrijednosti ostalih navedenih kombinacija za istu vjerojatnost prekoračenja P s dijagrama dvodimenzionalne raspodjele prikazane na slici 3. Numeričke vrijednosti usvojenih konstelacija parametara hidrograma velikih voda za rijeku Dravu u profilu postaje Donji Miholjac dane su u tablici 3.

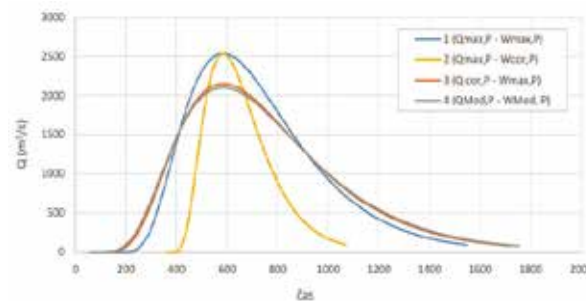
Odabrane kombinacije varijabli (osnovnih parametara hidrograma velikih voda – vrha i zapremine poplavnih valova), a za vjerojatnost prekoračenja:

$P\{(Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P})\} = 1,0 \%$, prikazane su na slici 6, zajedno s definiranom dvodimenzionalnom funkcijom koincidencije. Sve odabrane kombinacije naznačene su rednim brojem točaka, kao što je prikazano u tablici 3.

Za sve četiri odabrane kombinacije varijabli sa vjerojatnošću prekoračenja $P=1.0 \%$ izračunati su teorijski hidrogrami velikih voda rijeke Drave u profilu postaje Donji Miholjac, po metodi GIO, a rezultati proračuna prikazani su na slici 7. Kao što se vidi na slici 7 dobivena su četiri različita hidrograma, od kojih hidrogrami pod brojem 2, 3 i 4, svaki za sebe s različitog stajališta, predstavlja stogodišnji hidrogram velike vode rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac. Teorijski hidrogram, sastavljen od marginalnih vjerojatnosti – $P(Q_{max,P} W_{max,P})$, koji predstavlja „maksimalni moguću“ hidrogram, jest „kvazi stogodišnji“ hidrogram po oba parametra (maksimalne ordinate hidrograma i maksimalne zapremine hidrograma), i on u suštini premašuje vjerojatnost p, tj. $p > P$. Da je to tako potvrđuje i položaj karakteristične točke 1 na slici 6, koja ne može predstavljati stogodišnji teorijski hidrogram ($p=1,0$



Slika 6: Dvodimenzionalna raspodjela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma (maksimalne ordinate – Q_{max} i maksimalne zapremine vala – W_{max}) rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac za označenim usvojenim kombinacijama za vjerojatnost prekoračenja 1 %



Slika 7: Stogodišnji hidrogrami velikih voda rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac za usvojene kombinacije osnovnih parametara hidrograma (maksimalne ordinate – Q_{max} i maksimalne zapremine vala – W_{max})

%), jer je evidentno da njen stvarni položaj odgovara liniji prekoračenja vjerojatnosti:

$$P\{(Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P})\} = P < p = 1,0 \%$$

Njena stvarna vjerojatnost prekoračenja (slika 6) je:

$$P\{(Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P})\} = P = 0,33 \%$$

$< p = 1,0 \%$.

To praktično znači da hidrogram poplavnog vala pod rednim brojem 1 odgovara tristogodišnjem povratnom periodu.

Tablica 3: Prikaz usvojenih kombinacija osnovnih parametara hidrograma velikih voda rijeke Drave u profilu hidrološke postaje Donji Miholjac za različite vjerojatnosti prekoračenja P

RB	Konstelacija varijabli	Vjerojatnost prekoračenja – $P\{(Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P})\} = P$							
		0,1 %		1,0 %		2,0 %		5,0 %	
		Q_{max} ($m^3 s^{-1}$)	W_{max} ($10^6 m^3$)	Q_{max} ($m^3 s^{-1}$)	W_{max} ($10^6 m^3$)	Q_{max} ($m^3 s^{-1}$)	W_{max} ($10^6 m^3$)	Q_{max} ($m^3 s^{-1}$)	W_{max} ($10^6 m^3$)
1	$Q_{max,P} - W_{max,P}$	3242	5929	2534	5149	2329	4855	2060	4408
2	$Q_{max,P} - W_{cor,P}$	3242	5000	2534	2600	2329	2100	2060	1600
3	$Q_{cor,P} - W_{max,P}$	3000	5929	2150	5149	1800	4855	1600	4408
4	$Q_{Mod,P} - W_{Mod,P}$	2700	7500	2100	5200	1950	4700	1800	4000

4. ZAKLJUČAK

Osnovna ideja autora ovog rada je da predlože jedan novi pristup u definiranju teorijskih hidrograma velikih voda na hidrološki izučenim profilima, kakvi su profili službenih hidroloških postaja s dugogodišnjim nizovima praćenja vodostaja i mjerenjima protoka. To je svakako vrlo aktualna problematika koja permanentno traje i trajat će sve dok hidrolozi diljem svijeta ne smognu snage da konačno utvrde odgovarajuće standarde za ovu vrstu hidroloških obrada i analiza.

Teorijski hidrogrami velikih voda različitih vjerojatnosti pojave su jednog od najbitnijih hidroloških elemenata kada su u pitanju sljedeće vodoprivredne aktivnosti:

- obrana i zaštita od poplava;
- dimenzioniranje akumulacija i retencija u funkciji obrane od poplava;
- dimenzioniranje nasipa, mostova i propusta;
- ocjena rizika i upravljanje rizikom od poplava.

S aspekta navedenih aktivnosti nisu svi parametri hidrograma velikih voda od istog značaja, odnosno težine. Najfrekventniju praktičnu uporabu ima maksimalna ordinata hidrograma (vrh vala velike vode) i ona igra dominantnu ulogu u skoro svim navedenim vodoprivrednim aktivnostima. Zapremina poplavnog vala je vrlo bitna za potrebe optimalnog dimenzioniranja, kako brana i retencija, tako i za uspješnu obranu od poplava, analize prostiranja poplave u prostoru, a s time u vezi i ocjenom rizika od poplava i upravljanjem njenim rizikom. Trajanje poplavnih valova je značajno za optimalno dimenzioniranje nasipa i uspješnu obranu od poplava itd.

Pri razradi ove procedure polazna pretpostavka je da su osnovni parametri hidrograma velikih voda ponaosob slučajne veličine koje se pokoravaju nekom jednodimenzionalnom, dvodimenzionalnom ili višedimenzionalnom zakonu raspodjele. Provedene dvodimenzionalne analize vjerojatnosti u ovom radu samo potvrđuju svu širinu mogućnosti raznoraznih kombinacija parametara hidrograma pri definiranju teorijskog hidrograma određene vjerojatnosti pojave. Autori ukazuju na to da su za određenu vjerojatnost prekoračenja $P\{(Q_{\max} \geq q_{\max,p}) \cap (W_{\max} \geq w_{\max,p})\} = P$ karakteristične četiri točke, čije koordinate (koje u suštini predstavljaju maksimalnu ordinatu hidrograma i zapreminu poplavnog vala) definiraju teorijski hidrogram iste vjerojatnosti pojave $P \cong p$.

Praktična vrijednost teorijskih hidrograma velikih voda, određenih na temelju koordinata navedene četiri karakteristične točke, za istu vjerojatnost prekoračenja:

$P\{(Q_{\max} \geq q_{\max,p}) \cap (W_{\max} \geq w_{\max,p})\} = P \cong p$, ogleda se u sljedećem:

1. Teorijski hidrogram, sastavljen iz marginalnih vjerojatnosti – $P(Q_{\max,p}, W_{\max,p})$, predstavlja „maksimalni

moćni“ hidrogram, po oba parametra (maksimalne ordinate hidrograma i maksimalne zapremine hidrograma), i on u suštini premašuje vjerojatnost p , tj. $p > P$. Da je to tako potvrđuje i položaj karakteristične točke 1 na slici 6, koja može predstavljati stogodišnji teorijski hidrogram ($p=1.0\%$), ali je evidentno da njen stvarni položaj odgovara liniji prekoračenja vjerojatnosti: $P\{(Q_{\max} \geq q_{\max,p}) \cap (W_{\max} \geq w_{\max,p})\} = P < p=1.0\%$, odnosno njena stvarna vjerojatnost prekoračenja (slika 6) odgovara tristogodišnjem povratnom periodu.

2. Stogodišnji teorijski hidrogram sastavljen iz odgovarajućih marginalnih vjerojatnosti – $P(Q_{\max,p}, W_{\max,p})$, je stogodišnji ($p=1.0\%$) samo po parametru maksimalne ordinate hidrograma, pa se može praktično koristiti samo za dimenzioniranje preljevnih građevina, kota krune nasipa, otvora mostova, propusta i sl. Ne može biti korišten za dimenzioniranje akumulacijskih i retencijskih prostora, jer je vjerojatnost pojave drugog parametra hidrograma – zapremine poplavnog vala manja od stogodišnje, tj. $p < 1.0\%$.

3. S druge strane, stogodišnji teorijski hidrogram sastavljen iz marginalnih vjerojatnosti $P(Q_{\text{cor},p}, W_{\max,p})$, je stogodišnji ($p=1.0\%$) samo po parametru maksimalne zapremine hidrograma i može biti korišten za dimenzioniranje akumulacijskih i retencijskih prostora, ali se ne može koristiti za dimenzioniranje preljevnih građevina, kota krune nasipa, otvora mostova, propusta i sl., jer je vjerojatnost pojave drugog parametra hidrograma – maksimalne ordinate hidrograma manja od stogodišnje, tj. $p < 1.0\%$.

4. Teorijski hidrogram sastavljen iz marginalnih vjerojatnosti – $P(Q_{\text{Mod},p}, W_{\text{Mod},p})$ je „najvjerojatniji“ hidrogram čija se vjerojatnost prekoračenja P i vjerojatnost pojave p poklapaju (identične su), tj. $P\{(Q_{\max} \geq q_{\max,p}) \cap (W_{\max} \geq w_{\max,p})\} = P = p$.

Autori predlažu da se ovaj „najvjerojatniji“ hidrogram za bilo koju vjerojatnost ($P=p$) koristi kao kontrolni u svim gore navedenim slučajevima dimenzioniranja hidrotehničkih građevina.

ZAHVALA

Predstavljeni rezultati i analize su predmet istraživanja znanstvenog projekta „Ocena uticaja klimatskih promjena na vodne resurse Srbije“ (TR-37005) za razdoblje 2011.–2017. godine Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije. Autori se zahvaljuju ministarstvu na pruženoj financijskoj pomoći i podršci. ■

LITERATURA

Abramowitz M.; Stegun A. I., (1972.): *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*, Dover Publications, INC., New York.

Chebana F.; Ouarda T. B. M. J., (2011.): Multivariate quantiles in hydrological frequency analysis, *Environmetrics*, Vol. 22, No. 1, pp 63–78

- Prohaska S.; Marjanović N.; Čabrić M., (1978.): *Dvoparametarsko definiranje velikih voda*, Vode Vojvodine, Novi Sad.
- Prohaska S.; Petković T., (1989.): *Metode za proračun velikih voda, Deo I, Proračun velikih voda na hidrološki izučenim profilima*, Građevinski calendar 89, Beograd.
- Prohaska S.; Isailović D.; Srna P., Marčetić I., (1999.): *Coincidence 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.
- Prohaska S.; Ristić V., (2002.): *Hidrologija kroz teoriju i praksu*, Drugo prošireno izdanje, Rudarsko-geološki fakultet, Institut „Jaroslav Černi“, Beograd.
- Prohaska S., (2003.): *Hidrologija I Deo, Hidro-meteorologija, hidrometrija i vodni režim*, Rudarsko-geološki fakultet, Institut „Jaroslav Černi“, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd.
- Prohaska S., (2006.): *Hidrologija II Deo, Hidrološko prognozi-ranje, modelovanje i praktična primena*, Institut „Jaroslav Černi“, Rudarsko-geološki fakultet, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd.
- Singh V. P.; Strupczewski W. G., (2007.): Special Issue: Copulas in Hydrology [editorial], *Journal of Hydrologic Engineering* Vol. 12, No. 4, ASCE, Reston, VA 20191-4400.
- Yevjevich, V., (1972.): *Probability and Statistics in Hydrology*, Water Resources Publications, Fort Collins, Colo. U.S.A.

A comprehensive approach to determining the Drava River flood hydrographs for hydrotechnical design

The paper deals with the determination of theoretical hydrographs of the Drava floods at the Donji Miholjac hydrological station profile. The applied procedure is based on a recent comprehensive approach which simultaneously considers two basic flood hydrograph parameters – maximum hydrograph ordinate (peak) and flood wave volume. The elaborated procedure primarily relies on the practical, simultaneous application of two methods – the method of "limit discharge intensity" (GIO method) for the calculation of theoretical flood hydrographs of different probabilities of occurrence and the theory of two-dimensional definition of the distribution function (coincidence) of the mentioned flood hydrograph parameters. In this specific case, an important assumption is that the basic parameters of the flood hydrograph (ordinate of maximum annual discharges and maximum volume of flood hydrograph) are from the same calendar year. The calibration of the GIO method parameters is carried out in the conditions of equalizing the theoretical values of maximum annual discharges and maximum annual volumes of the same probability of occurrence which are obtained by applying the GIO method, i.e. standard procedure of adjusting the mentioned temporal series to the theoretical functions of distribution which are the most frequently used in the hydrological practice. In order to define the probability of a simultaneous occurrence of the stated flood hydrograph parameters (peak and maximum volume of the flood hydrograph), the procedure of two random variable coincidence was used, as shown in literature (Prohaska et al., 1999; Prohaska et al., 2016). The defined coincidences of probability for exceeding two monitored flood hydrograph parameters serve to facilitate a selection of combinations to be used for the calibration of the GIO method parameters. Finally, the paper includes a practical example of defining theoretical flood hydrographs with different probabilities of occurrence in the Drava River at the Donji Miholjac hydrological station profile.

Key words: theoretical hydrograph, probability of occurrence, method of "limit discharge intensity", hydrological profiles, maximum discharge, wave volume, Drava – Donji Miholjac (Croatia)

Ein umfassender Ansatz zur Bestimmung der für wasserbauliche Planungen maßgebenden Hydrogramme der Hochwasser des Flusses Drau

Dieser Beitrag befasst sich mit der Bestimmung theoretischer Hydrogramme der Hochwasser des Flusses Drau an der hydrologischen Station Donji Miholjac. Das angewandte Verfahren beruht auf einem neuen umfassenden Ansatz, der gleichzeitig zwei Grundparameter der Hochwasserhydrogramme in Betracht zieht – den Spitzenwert des Hydrogramms und das Volumen der Hochwasserwelle. Das Verfahren lehnt sich gleichzeitig an die praktische Anwendung der rationalen Methode zur Berechnung der Scheitelabflüsse in theoretischen Hochwasserhydrogrammen für verschiedene Ereignismöglichkeiten und der Theorie der zweidimensionalen Bestimmung der Verteilungsfunktionen (Koinzidenzen) der angeführten Parameter der Hochwasserhydrogramme an. Eine wichtige Voraussetzung im konkreten Fall ist, dass die Grundparameter der Hochwasserhydrogramme behandelt werden: Spitzenwerte der maximalen Jahresdurchflüsse und maximale Volumina der Hochwasserhydrogramme im gleichen Kalenderjahr. Die Parameter der rationalen Methode werden unter den Bedingungen kalibriert, in welchen die theoretischen Werte der maximalen Jahresdurchflüsse und der maximalen Jahresvolumina der gleichen Ereignismöglichkeiten ausgeglichen werden und sich durch Anwendung der rationalen Methode bzw. des konventionellen Verfahrens zur Anpassung der angeführten Zeitreihen an die theoretischen, in der hydrologischen Praxis am häufigsten angewandten Verteilungsfunktionen ergeben. Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Eintreten der angeführten Parameter der Hochwasserhydrogramme (Spitzenwert und maximales Volumen des Hochwasserhydrogramms) wurde das Verfahren der Koinzidenz von zwei zufälligen Variablen angewendet, das in der Literatur zu finden ist (Prohaska et al., 1999; Prohaska et al., 2016). Die bestimmten Koinzidenzen der Wahrscheinlichkeit für eine Überschreitung zweier beobachteter Parameterwerte des Hochwasserhydrograms dienen zur Wahl von Kombinationen, die zur Kalibrierung der Parameter der rationalen Methode verwendet werden. Abschließend wird ein Beispiel der Bestimmung von theoretischen Hochwasserhydrogrammen verschiedener Ereignismöglichkeiten am Fluss Drau an der hydrologischen Station Donji Miholjac dargestellt.

Schlüsselwörter: theoretischer Hydrogramm, Ereignismöglichkeit, rationale Methode, hydrologisch analysierte Profile, maximaler Durchfluss, Wellenvolumen, Drau – Donji Miholjac (Kroatien)