

NOVA METODA ZA DEFINISANJE VIŠESTRUKO KOINCIDENCIJE POPLAVNIH TALASA NA SLOŽENIM REČNIM SISTEMIMA

Prof. dr. Stevan PROHASKA, Aleksandra ILIĆ
Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" u Beogradu

REZIME

Procena statističke značajnosti budućih poplava u veoma složenim hidrološkim uslovima formiranja talasa velikih voda glavne reke na ušćima začajnih pritoka, kao i izbor merodavnih hidroloških parametara za dimenzionisanje objekata za zaštitu od poplava u tim područjima, predstavlja jedan od prioritarnih zadataka savremene hidrološke nauke. Do sada primenjivani klasičan pristup jednodimenzionalne ocene verovatnoće prevazilaženja, u situaciji kada se poplave na dva ili više vodotoka ne javljaju istovremeno, ne daje zadovoljavajuće rezultate u oceni rizika od poplava. Neophodna je razrada takve procedure koja će verovatnoću poplavnog talasa na nizvodnom području definisati u višedimenzionalnom prostoru verovatnoća pojave poplavnih talasa na ulaznim profilima glavne reke i pritoka. Drugim rečima neophodno je rešiti pitanje višestruke koincidencije formiranja poplava na složenom rečnom sistemu.

Predmet istraživanja je praktično rešenje ovog problema. U konkretnom slučaju definisana je procedura za formiranje višestrukih zavisnosti verovatnoća pojave poplavnih talasa na glavnoj reci i nekoliko pritoka, odnosno dato je praktično rešenje za određivanje višestruke koincidencije poplavnih talasa na Dunavu i njegovim glavnim pritokama Tisi i Savi. U ovoj fazi razvoja matematičkog modela kao reprezentativni parametar za ocenu značajnosti poplavnog talasa usvojena je zapremina.

U radu su ilustrovani praktični primeri uspostavljenih zavisnosti parcijalnih i višestrukih koincidencija poplavnih talasa na Dunavu, Tisi i Savi.

Ključne reči: višestruka koincidencija, zapremina poplavnog talasa, dvodimenzionalna funkcija raspodele, kumulativna funkcija raspodele

1. UVOD

Zaštita od poplava, koja uključuje kako preventivne mere tako i mere za otklanjanje posledica, može zahtevati utrošak značajnog dela ukupnog nacionalnog dohotka. Efikasan sistem zaštite od poplava sadrži skup kompleksnih, kako građevinskih tako i drugih mera (izgradnja i održavanje hidrotehničkih objekata, optimalno upravljanje sistemima, zoniranje, osiguranje, prognoza i najava poplava i dr.), koje se međusobno dopunjavaju. Opšteprihvatljivo stanovište je da se u zaštitu od poplava mora ulagati na optimalan način. Ovaj zahtev iziskuje potrebu da se sveobuhvatno sagledaju svi uzroci i posledice poplave.

Potpuna zaštita od poplava očigledno nije moguća. Čak i pod pretpostavkom da se zanemare nepovoljni antropogeni uticaji na pojavu i odvijanje poplave, uvek postoji rizik da će kapacitet izgrađenog sistema odbrane od poplava, koji daje određeni nivo sigurnosti, biti prevaziđen. Povećanje stepena zaštite može zahtevati znatno povećanje finansijskih ulaganja. Zato je potrebno da se odabere optimalan stepen zaštite od poplava, kako bi se ulaganja u izgradnju i održavanje sistema uskladila sa potencijalnim štetama.

Poznavanje velikih voda veoma je bitno za potrebe zaštite od poplava ugroženog područja, kao i za izgradnju hidrotehničkih objekata i od prseudne je važnosti, bilo sa gledišta izgradnje, bilo sa stanovišta sigurnosti. Za dimenzionisanje brojnih objekata, odnosno za definisanje njihove propusne moći, merodavan je maksimum poplavnog talasa (najveći protok reke). Za analizu dejstva akumulacije ili rečnog korita na transformaciju poplavnog talasa, pored maksimalnog protoka, merodavne su zapremine poplavnog talasa i oblici hidrograma velikih voda. Kako se hidrotehnički objekti definišu sa ciljem da obezbede određenu sigurnost nizvodnog područja, određivanje

merodavne velike vode se svodi na definisanje maksimalnog protoka i/ili drugih karakteristika poplavnog talasa određene verovatnoće pojave, odnosno rizika od poplava.

Klasičan pristup za ocenu rizika od poplava sastoji se u odedivanju verovatnoće sa kojom poplava može prevazići unapred zadatu veličinu razmatrane karakteristike talasa. Ovo je, zapravo, ekvivalentno određivanju povratnog perioda poplavnog talasa. Procedura koja se pri tome primenjuje obuhvata statističko-probabilističku analizu hidroloških podataka na obližnjoj vodomernoj stanici. Sa inženjerskog gledišta ovakav pristup daje zadovoljavajuće rezultate u rešavanju velikog broja zadataka. Ova konstatacija se posebno odnosi na rešavanje problema zaštite od poplava u relativno jednostavnim slučajevima, tačnije rečeno kada se u branjenom području ne javljaju rečne pritoke.

Međutim, kada branjeno područje obuhvata i ušća većeg broja značajnih pritoka, navedeni pristup ne daje pouzdanu procenu razmatrane karakteristike poplavnog talasa. Naime, nastanak poplave na dva ili više bliska vodotoka je po pravilu različit, tako da se maksimalne karakteristike poplavnih talasa na njima ne javljaju istovremeno. Poplavni talas na jednom vodotoku može izazvati znatan uticaj na režim tečenja u drugom. Pored toga, hidrološki podaci se obično prikupljaju na vodomernim stanicama lociranim izvan zone međusobnog uticaja razmatranih vodotokova, tako da se obradom raspoloživih podataka ne može oceniti uticaj jednog vodotoka na drugi. U takvim uslovima je posebno značajno da se oceni koincidencija pojave poplave na glavnoj reci i pritoci. U slučaju pojave većeg broja značajnih pritoka, problem se usložnjava, tako da je neophodno sveobuhvatno posmatranje hidroloških i hidrauličkih uslova u čitavom regionu, a slučajno promenljive tretirati kao višedimenzionalne pojave, kako bi se u potpunosti definisao rizik, kao najčešće usvajani kriterijum za dimenzionisnje objekata za zaštitu od poplava. Primena teorije dvodimenzionalnih, pa i višedimenzionalnih slučajnih promenljivih, koja se koristi predstavlja pristup kojim se mogu prevazići navedeni problemi. Tačnije rečeno, ovaj pristup pruža mogućnost da se odrede verovatnoće jednovremene pojave poplavnih događaja na dva ili više vodotoka.

2. METODOLOGIJA PRORAČUNA

Teorijska osnova za razvoj metodologije za ocenu višestruke koincidencije velikih voda na glavnom vodotoku i pritokama detaljno je izložena u radu

(Prohaska et.al. 2008.), a ovde se preuzima u potpunosti i dalje nadgrađuje. U cilju lakšeg praćenja zadržano je korišćeno označavanje, a teorijsko proširenje i nadgradnja su dati samo u završnom delu ovog poglavlja.

Pod pojmom koincidencija podrazumeva se verovatnoća istovremene pojave poplava na dva ili više vodotoka. Teorijska osnova se bazira na praktičnoj primeni višestrukih funkcija raspodele verovatnoća, odnosno njihovih uslovnih verovatnoća. Za relevantne varijable, odnosno slučajne promenljive, razmatraju se istovremene kvantitativne karakteristike hidrograma poplavnih talasa na glavnoj reci, odnosno na jednoj ili više značajnih pritoka. To su sledeći parametri velikih voda: maksimalna ordinata (špic) hidrograma, zapremina poplavnog talasa, trajanje poplavnog talasa ili vremenski pomak između špiceva poplavnih talasa na glavnoj reci i pritoci.

Metodologija proračuna višestruke koincidencije velikih voda na složenim rečnim sistemima polazi od već razrađene metodologije za definisanje koincidencije velikih voda na dva susedna vodotoka, izložena u literaturi (Prohaska, 1999.). Izraz "koincidencija" upotrebljava se da označi jednovremenost događaja i ekvivalent je verovatnoći jednovremene pojave dve slučajne promenljive X i Y , koje predstavljaju razmatrane slučajne događaje (parametre velikih voda) na susednim vodotocima.

U skladu sa teorijom statistike funkcija gustine za dvodimenzionalnu slučajnu promenljivu se definiše kao:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sqrt{1 - \rho^2}} \exp \left\{ -\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} - \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} - \frac{\rho \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right)}{\sqrt{1 - \rho^2}} \right\}$$

Gde su:

- X i Y slučajno promenljive (karakteristike poplavnog talasa) glavnog toka i njegove pritoke,
- x i y jednovremene realizacije slučajno promenljivih X i Y ,
- μ_x i μ_y matematička očekivanja slučajno promenljivih X i Y ,
- σ_y i σ_x standardne devijacije slučajno promenljivih X i Y ,

ρ koeficijent korelacije između slučajno promenljivih X i Y .

Za funkciju gustine dvodimenzionalne slučajno promenljive $f(x, y)$, marginalne gustine $f(x, \bullet)$ i $f(\bullet, y)$ su definisane kao:

$$f(x, \bullet) = \int_{y=-\infty}^{y=\infty} f(x, y) dy \quad (2)$$

$$f(\bullet, y) = \int_{x=-\infty}^{x=\infty} f(x, y) dx \quad (3)$$

Marginalne kumulativne funkcije verovatnoće se određuju na sledeći način:

$$F(x, \bullet) = \int_{t=-\infty}^{t=x} f(t, \bullet) dt \quad (4)$$

i

$$F(\bullet, y) = \int_{z=-\infty}^{z=y} f(\bullet, z) dz \quad (5)$$

Kumulativna funkcija verovatnoće $F(x, y)$, definisana je na sledeći način:

$$\begin{aligned} F(x, y) &= P[X \leq x \cap Y \leq y] = \\ &= \int_{t=-\infty}^{t=x} \int_{z=-\infty}^{z=y} f(t, z) dt dz \end{aligned} \quad (6)$$

Kumulativna funkcija verovatnoće $\Phi(x, y)$, se može sračunati pomoću izraza:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= \int_{t=x}^{t=+\infty} \int_{z=y}^{z=+\infty} f(t, z) dt dz = \\ &= P[X > x \cap Y > y] = 1 - P[X < x \cap Y < y] = \\ &= 1 - F(x, \bullet) - F(\bullet, y) + F(x, y) \end{aligned} \quad (7)$$

U bivarijantnim statističkim analizama karakteristika poplavnih talasa, hidrolozi se suočavaju sa činjenicom da većina razmatranih karakteristika poplavnog talasa ne podleže normalnoj raspodeli. Ova činjenica se prevazilazi pretpostavkom da podležu log-normalnoj raspodeli i zbog toga ih je potrebno prvo logaritmovati:

$$U = \log X \quad (8)$$

$$W = \log Y \quad (9)$$

Prethodno opisan model služi za određivanje kumulativnih funkcija verovatnoće, ali postupak može biti dugačak i mukotrpan ukoliko se radi o trodimenzionalnom prostoru $X, Y, i \rho$. Iz tog razloga se koristi pogodnija grafo-analička metoda, Abramowitz, M., & Stegun, A., (1972), koja je ukratko opisana u daljem tekstu.

Metoda se odnosi na standardizovane normalne promenljive, pa zbog toga pomenute karakteristike poplavnih talasa treba standardizovati na sledeći način:

$$\psi = (u - \bar{U}) / \sigma_u \quad (10)$$

$$\xi = (w - \bar{W}) / \sigma_w \quad (11)$$

Standardizovane promenljive ψ i ξ imaju očekivane vrednosti $\mu_\psi = \mu_\xi = 0$ i varijanse $\sigma_\psi = \sigma_\xi = 1$.

Posle svih prethodno navedenih transformacija, funkcija gustine za dvodimenzionalnu slučajnu promenljivu se definiše na sledeći način:

$$f(\psi, \xi) = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2 \cdot (1-\rho^2)} [\psi^2 - 2\rho\psi\xi + \xi^2]\right\} \quad (12)$$

Vrednost koeficijenta korelacije ρ zamenjuje se veličinom R , koja se može proračunati iz osmotrenih, transformisanih serija. Koristeći ovaj parametar, nakon pojednostavljenja jednačine (12), može se napisati sledeća relacija:

$$\iint_A f(\psi, \xi) d\psi d\xi = 1 - \exp\left\{-\frac{\lambda^2}{2(1-\rho^2)}\right\} \quad (13)$$

Površinski integral dat u jednačini (13), na primer nad površinom $\psi, \xi \in A$, predstavlja verovatnoću realizacije događaja $\psi = h$ i $\xi = k$ unutar površine A koja je određena elipsom po sledećoj jednačini:

$$\psi^2 - 2\rho\psi\xi + \xi^2 = \lambda^2 \quad (14)$$

Vrednost λ je konstanta pri rešavanju integrala (13) i zavisi od promenljivih ψ i ξ , kao i od koeficijenta korelacije ρ .

Dakle, za svaku vrednost $\lambda = \text{const}$, može se sračunati verovatnoća unutar elipse definisane izrazom (14).

Izjednačavanjem eksponencijalnog dela jednačine (12) sa eksponencijalnim delom jednačine (13), dobija se jednačina (14) koja se može napisati na sledeći način:

$$\xi^2 - 2\rho\psi\xi + (\psi^2 - \lambda^2) = 0 \quad (15)$$

Kao što je predhodno rečeno svakoj vrednosti $\lambda = \text{const.}$ odgovara elipsa gde za svaku vrednost $\psi = h$ dobijamo dva preseka ξ elipsi, $\xi = k_1$ i $\xi = k_2$.

Stoga, rešavanjem kvadratne jednačine (15) za svaku vrednost $\lambda = \text{const.}$ i za odgovarajuću verovatnoću datu jednačinom (13), dobijaju se dve koordinate ($\xi = k_1$ i $\xi = k_2$) predstavljajući presek korelacione elipse i linije $\psi = h_0$. Ponavljajući proračun za nekoliko vrednosti λ menjajući vrednost $\psi = h_0$ može se konstruisati nekoliko elipsi. Treba imati na umu da posle svakog proračuna, potrebno izvršiti transformaciju u skladu sa jednačinama (10) i (11) kako bi se dobile stvarne (nestandardizovane) vrednosti parametara poplavnog talasa umesto standardizovanih logaritmovanih vrednosti.

Opisan matematički model je prilično direktan. Međutim, zbog poteškoća koje se javljaju ova direktna metoda nije od velike koristi, osim što daje mogućnost opšteg uvida u toku razmatranja karakteristika velikih voda.

Kako bi se prevazišle poteškoće pri proračunu određuje se kumulativna funkcija raspodele po proceduri korišćenoj u ovom radu koju su razvili Abramowitz i Stegun. U proračunskoj šemi se koristi grafo-analitički postupak kojim se definiše kumulativna verovatnoća $\Phi(h, k, \rho)$, u funkciji verovatnoća $\Phi(h, 0, r)$ i $\Phi(k, 0, r)$ gde se umesto koeficijenta korelacije ρ , računa koeficijent korelacije r . Konkretnije, verovatnoća $\Phi(h, k, \rho)$ se može sračunati na sledeći način:

$$\Phi(h, k, \rho) = \Phi\left(h, 0, \frac{(\rho h - k) \cdot \text{sgnh}}{\sqrt{h^2 - 2\rho h k + k^2}}\right) + \Phi\left(k, 0, \frac{(\rho k - h) \cdot \text{sgnk}}{\sqrt{h^2 - 2\rho h k + k^2}}\right) - \begin{cases} 0 & \text{za } h, k \geq 0 \text{ i } h + k \geq 0 \\ \frac{1}{2} & \text{za sve ostale} \end{cases} \quad (16)$$

gde su $(\text{sgn } h)$ i $(\text{sgn } k)$ jednaki jedinici kada su h i k veće ili jednake nuli, odnosno -1 kada su h i k negativne vrednosti.

Dalja razrada teorije za definisanje višestruke koincidencije poplavnih talasa na složenom rečnom sistemu prilagođena je rečnoj deonici koja se sastoji od

glavne reke i dve značajne pritoke, sa beznačajnim uticajem bočnog dotoka. Za najadekvatniji reprezent statističke značajnosti poplave usvojena je zapremina hidrograma velikih voda. Osnova za definisanje višestruke probabilističke zavisnosti verovatnoće pojave poplavnog talasa na izlaznom profilu u funkciji verovatnoća pojave poplavnog talasa na svim razmatranim ulaznim profilima glavne reke i pritoka su funkcije raspodele verovatnoća zapremina poplavnih talasa u vidu:

$$P(W \geq w) = p \quad (17)$$

gde su:

$P(W \geq w)$ - verovatnoće prevazilaženja zadate zapremine w na svim razmatranim ulazno/izlaznim profilima,

p - verovatnoća pojave,

kao i verovatnoće prevazilaženja proste koincidencije poplavnih talasa između dva ulazna profila j i k :

$$P((W_j \geq w_j) \cap (W_k \geq w_k)) = q \quad (18)$$

$P((W_j \geq w_j) \cap (W_k \geq w_k))$ - verovatnoća prevazilaženja koincidencije zapremina poplavnih talasa na dva ulazna profila j i k ,

q - verovatnoća prevazilaženja.

Sama procedura formiranja zavisnosti sastoji se u primeni postupka postepenog bilansiranja "ulaznih" zapremina poplavnog talasa koje odgovaraju različitim verovatnoćama pojave, prema sledećoj bilansnoj jednačini:

$$W_{iz, p=0} = W_{i, p=T} + W_{j, r} + W_{k, z} \quad (19)$$

Gde su:

$W_{iz, p=0}$ zapremina poplavnog talasa na izlaznom profilu rečne deonice za fiksiranu verovatnoću pojave $p=0$,

$W_{i, p=T}$ zapremina poplavnog talasa na i -tom ulaznom profilu za odabrani povratni period T ,

$W_{j, r}$ zapremina poplavnog talasa na j -tom ulaznom profilu za proizvoljnu verovatnoću r , saglasno verovatnoći prevazilaženja koincidencije $P((W_j \geq w_j) \cap (W_k \geq w_k))$,

$W_{k, z}$ zapremina poplavnog talasa na k -tom ulaznom profilu za proizvoljnu verovatnoću z , saglasno verovatnoći prevazilaženja koincidencije $P((W_j \geq w_j) \cap (W_k \geq w_k))$.

Za fiksiranu vrednost verovatnoće izlaznog hidrograma θ i odabranu vrednost povratnog perioda T , preko jednačine (18) dobijaju se odgovarajuće teorijske vrednosti zapremina poplavnog talasa $W_{iz,p=\theta}$ i $W_{i,p=T}$. Proizvoljnim odabirom jedne od verovatnaća r ili z , na primer r , preko verovatnoće prevazilaženja koincidencije $P((W_j \geq w_j) \cap (W_k \geq w_k)) = q$, dobijaju se teorijske vrednosti $W_{j,r}$ i $W_{k,z}$. Odgovarajuća verovatnoća teorijske zapremine $W_{k,z}$ dobija se, takođe, pomoću jednačine (18). Na taj način definisane su sve konstelacije "korespondentnih" verovatnoća: $p(W_{iz,p=\theta})$, $p(W_{i,p=T})$, $p(W_{j,r})$ i $p(W_{k,z})$, što omogućuje formiranje višedimenzionalne zavisnosti verovatnoća pojave poplavnih talasa na glavnoj reci i pritokama u vidu:

$$p(W_{iz,p=\theta}) = P(p(W_{i,p=T}) \cap P[p(W_{j,r}) \cap p(W_{k,z})]) \quad (20)$$

Gde su:

$p(W_{iz,p=\theta})$ verovatnoća pojave hidrograma na izlaznom profilu rečne deonice,

$p(W_{i,p=T})$ verovatnoća pojave hidrograma na i -tom ulaznom profilu rečne deonice,

$p(W_{j,r})$ verovatnoća pojave hidrograma na j -tom ulaznom profilu rečne deonice,

$p(W_{k,z})$ verovatnoća pojave hidrograma na k -tom ulaznom profilu rečne deonice,

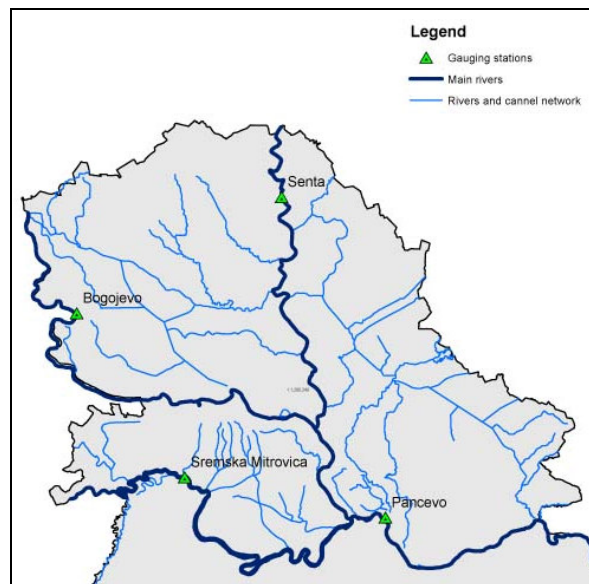
$P[p(W_{j,r}) \cap p(W_{k,z})]$ verovatnoća prevazilaženja koincidencije verovatnoća ulaznih hidrograma na j -tom i k -tom ulaznom profilu.

Ovakve zavisnosti se formiraju za proizvoljan broj odabranih fiksiranih verovatnoća θ na izlaznom profilu rečne deonice. Prema tome, za poznate zapremine poplavnih talasa na ulaznim profilima, preko jednačina (18) i (20) mogu se dobiti računске vrednosti verovatnoća zapremine poplavnog talasa na izlaznom profilu razmatranog rečnog sektora.

3. PRAKTIČNA PRIMENA MODELA

Razrađena metodologija za definisanje višestruke koincidencije poplava na glavnoj reci i njenim pritokama je primenjena na sektor Dunava i njegove glavne pritoke Tisu i Savu na teritoriji Srbije. U konkretnom slučaju uspostavljena je višedimenzionalna koincidencija verovatnoće velikih voda Dunava

nizvodno od Beograda (v.s Pančevo) u zavisnosti od verovatnoća pojave velikih voda (poplava) na uzvodnom delu Dunava (v.s Bogojevo), Tise (v.s Senta) i Save (v.s Sremska Mitrovica). Šematski prikaz razmatranog sektora reke Dunav dat je na slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz razmatranog sektora Dunava za proračun višestruke koincidencije poplavnih talasa

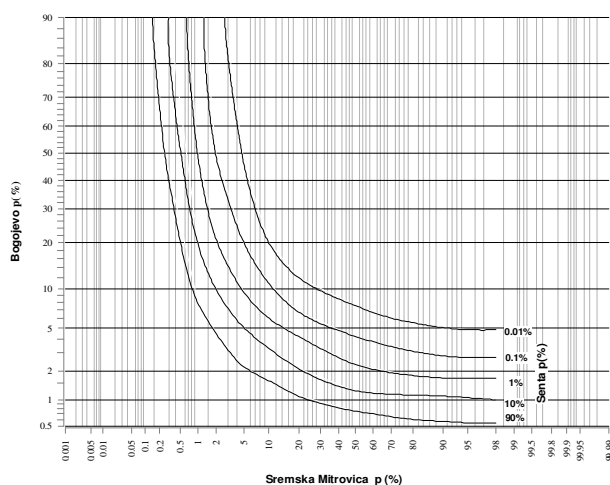
Za merodavne varijable koje reprezentuju poplave uvojene su zapremine poplavnih talasa. Zbog veoma izražene složenosti u procesu formiranja poplavnih talasa na navedenom sektoru Dunava i njegovim glavnim pritokama usvojene su maksimalne godišnje zapremine, iznad repnog protoka $Q_{50\%}$ sa krive trajanja dnevnih protoka. Pri uspostavljanju višedimenzionalne zavisnosti koincidencija poplavnih talasa na navedenim profilima pretpostavljeno je da teorijski hidrogram određene verovatnoće pojave θ na izlaznom profilu Dunava kod Pančeva sačinjavaju poplavni talasi na Dunavu kod Bogojeva, poznate verovatnoće pojave p , odnosno povratnog perioda T , i proizvoljno odbrane konstelacije dvodimenzionalne koincidencije poplavnih talasa na Tisi kod Sente i na Savi kod Sremske Mitrovice. Korišćenjem izložene procedure formirana je zavisnost verovatnoća višestrukih koincidencija na navedenim profilima vodomernih stanica, u vidu:

$$p(W_{iz,p=\theta}) = P(p(W_{i,p=T}) \cap P[p(W_{j,r}) \cap p(W_{k,z})]) \quad (21)$$

Gde su:

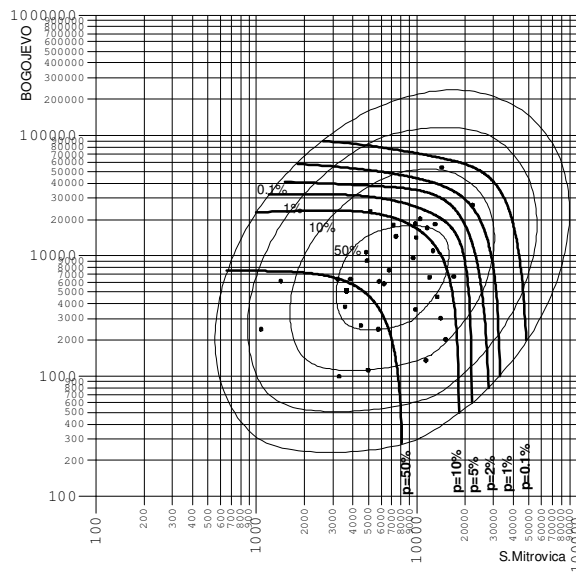
$p(W_{iz,p=0})^{Pan}$	verovatnoća pojave hidrograma poplavnog talasa Dunava na izlaznom profilu rečne deonice - v.s Pančevo,
$p(W_{i,p=T})^{Bog}$	verovatnoća pojave hidrograma poplavnog talasa Dunava na ulaznom profilu rečne deonice - v.s Bogojevo,
$p(W_{j,r})^{Sen}$	verovatnoća pojave hidrograma poplavnog talasa Tise na ulaznom profilu rečne deonice - v.s Senta,
$p(W_{k,z})^{SM}$	verovatnoća pojave hidrograma poplavnog talasa Save na ulaznom profilu rečne deonice - v.s Sremska Mitrovica.
$P[p(W_{j,r}) \cap p(W_{k,z})]$	verovatnoća prevazilaženja proste koincidencije poplavnih talasa na Tisi i Savi

Rezultati proračuna višestruke koincidencije poplavnih talasa Dunava, Save i Tise, za slučaj formiranja stogodišnjih poplavnih talasa Dunava u profilu v.s Pančevo, prikazana je grafički na slici 2.



Sika 2. Višestruka koincidencija stogodišnjeg poplavnog talasa Dunava u funkciji verovatnoća pojave poplavnih talasa na Dunavu (v.s Bogojevo), Tisi (v.s Senta) i Savi (v.s Sremska Mitrovica)

Odgovarajuća bivarijantna koincidencija poplavnih talasa na Tisi (v.s. Senta) i na Savi (v.s. Sremska Mitrovica), pri pojavi stogodišnjeg poplavnog talasa Dunava kod Pančeva, prikazana je, takođe, grafički na slici 3.



Slika 3. Bivarijantna koincidencija poplavnih talasa na Tisi i Savi, pri pojavi stogodišnjeg poplavnog talasa na Dunavu kod Pančeva

Finalni grafik koji pokazuje verovatnoću prevazilaženja višestruke koincidencije poplavnih talasa na ulaznim profilima Dunava, Tise i Save sa pojavom poplavnog talasa odabranih verovatnoća pojave na donjem Dunavu kod Pančeva prikazan je na slici 4.

4. PRAKTIČNI ZNAČAJ REZULTATA PRORAČUNA

Konkretni rezultati proračuna višestruke koincidencije velikih voda Dunava i njegovih glavnih pritoka imaju višestruki značaj, koji se može razvrstati u dve kategorije - primarni i sekundarni. U primarni značaj spadaju:

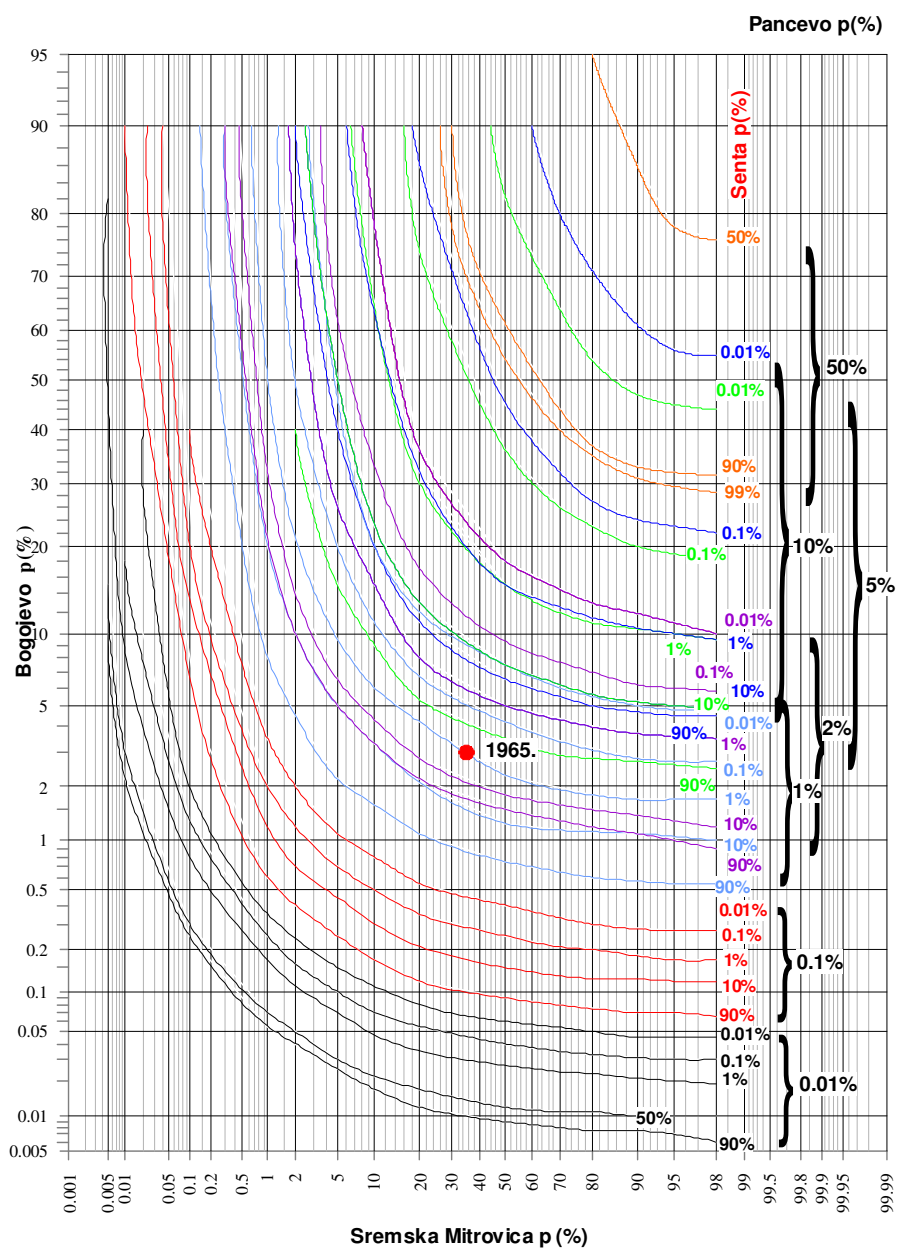
- sagledavanje geneze formiranja poplavnih talasa na Dunavu i njegovim glavnim pritokama,
- obezbeđenje hidrološke osnove za ocenu probabilističke značajnosti istorijskih i budućih poplava u slivu Dunava na teritoriji Srbije,
- davanje logitičke podrške pri izdavanju real-time hidroloških prognoza za vreme nailaska katasrofalnih poplava na razmatranim vodotocima.

Sekundarni značaj uspostavljenih višestrukih koincidencija, ali ne manje važan, vezan je za njihovo korišćenje u svim fazama projektovanja, izgradnje i upravljanja sistemima za odbranu od poplava. S tim u vezi definisane zavisnosti mogu se koristiti u:

- obezbeđenju osnove za ekonomičnije dimenzionisanje linijskih sistema za odbranu od poplava u zoni međusobnog uticaja glavne reke i pritoke,
- pružanju pomoći pri izradi strategije izgradnje i rekonstrukcije odbrambenih sistema u prio-

balju reke Dunav i u zonama ušća glavnih pritoka,

- stvaranju osnove za pouzdaniju i sveobuhvatniju procenu rizika od poplava na razmatranom prostoru.



Slika 4. Višestruka koincidencija poplavnih talasa različitih povratnih perioda na Dunavu kod Pančeva u funkciji poplavnih talasa Dunava kod Bogojeva, Tise kod Sente i Save kod Sremske Mitrovice

Sa gledišta geneze poplavnih talasa, definisani grafici uspostavljenih višestrukih koincidencija određuju realan prostor gde se različite konstelacije verovatnoća pojave poplavnih talasa na Dunavu i glavnim pritokama mogu naći. Na slici 4 je, primera radi, obuhvaćen jedan veoma širok dijapazon verovatnoća pojave poplavnih talasa na glavnim pritokama Savi i Tisi (od 0.1% do 99%), a za korespondentne verovatnoće pojave talasa na razmatranom ulaznom i izlaznom profilu Dunava.

Definisani grafici višestruke koincidencije su veoma pogodni za ocenu probabilističke značajnosti istorijskih poplava. Na slici 4 posebno je markirana vrednost jednog od najvećih registrovanih poplavnih talasa na Dunavu. Može se zaključiti da je najveću registrovanu poplavu na donjem Dunavu iz 1965 godine, koja ima povratni period 37 godina, prouzrokovala koincidencija pojave 33 godišnjeg poplavnog talasa na gornjem Dunavu, polavnog talasa na Tisi povratnog perioda 4 godine i poplavnog talasa povratnog perioda 3 godine na Savi.

Pri izdavanju real-time prognoze poplavnih talasa uspostavljene zavisnosti višestrukih koincidencija mogu biti korišćene za ocenu probabilističke značajnosti poplave na nizvodnom delu Dunava, kada su poznate prognoze hidrograma velikih voda na svim ključnim ulaznim profilima vodomernih stanica na Dunavu, Tisi i Savi, odnosno kada su poznate prognoze zapremina odgovarajućih hidrograma velikih voda.

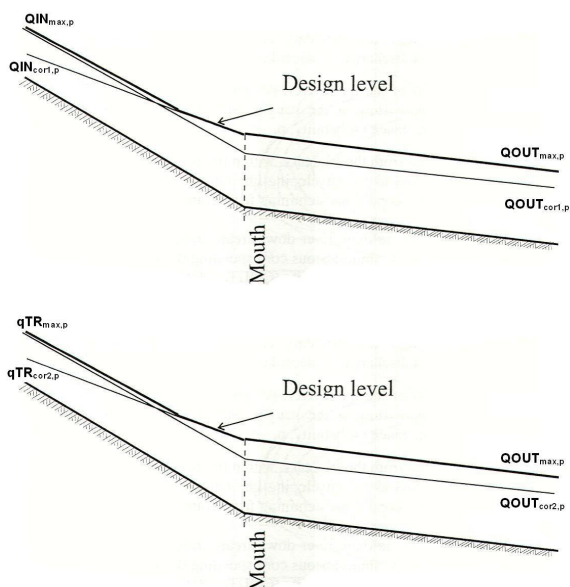
U neposrednoj zoni uticaja glavne reke i pritoke koriste se dvodimenzionalne (proste) koincidencije verovatnoća pojave poplavnih talasa na glavnoj reci (uzvodno i nizvodno od ušća pritoke) i pritoci. Poznato je da se merodavni (projektovani) nivoi u široj zoni ušća glavne reke i pritoke dobijaju putem hidrauličkog proračuna linija nivoa, a na bazi usvojenih graničnih uslova i usvojenih merodavnih protoka. U konkretnom slučaju značajnog međusobnog uticaja režima voda glavne reke i pritoke u zoni njihovog ušća, odabir merodavnih voda (protoka) vrši se na sledeći način:

1. Na sektoru glavne reke nizvodno od ušća – merodavni su nivoi koji se dobijaju na bazi teorijskih vrednosti maksimalnih godišnjih protoka za usvojenu verovatnoću pojave p , preko nekog zakona raspodele verovatnoća, na vodomernoj stanici koja se nalazi neposredno nizvodno od ušća pritoke – $QOUT_{max,p}$,
2. Na sektoru glavne reke uzvodno od ušća, a u zoni međusobnog uticaja glavne reke i pritoke merodavni nivo je anvelopa maksimalnog nivoa,

koja se dobija proračunom linija nivoa vodnog ogledala, a na osnovu protoka određenih kombinacijom promenljivih:

- Maksimalni godišnji protok na glavnoj reci nizvodno od ušća za usvojenu verovatnoću pojave p i odgovarajući protok na glavnoj reci uzvodno od ušća pritoke za istu verovatnoću koincidencije $P[p(QOUT_{max}) \cap p(QIN_{cor1})]$,
 - Odgovarajući protok na glavnoj reci nizvodno od ušća i maksimalni godišnji protok na glavnoj reci, uzvodno od ušća, za usvojenu verovatnoću pojave p , a prema koincidenciji za istu verovatnoću $P[p(QIN_{max}) \cap p(QOUT_{cor1})]$.
3. Na pritoci nizvodno od ušća, a u zoni međusobnog uticaja glavne reke i pritoke – merodavni nivo je anvelopa maksimalnog nivoa koja se dobija proračunom linija nivoa na osnovu sledećih kombinacija promenljivih:
 - Maksimalni godišnji protok na glavnoj reci nizvodno od ušća za usvojenu verovatnoću pojave p i odgovarajući protok na pritoci, uzvodno od ušća, za istu verovatnoću koincidencije $P[p(QOUT_{max}) \cap p(qTR_{cor2})]$,
 - Odgovarajući protok na glavnoj reci nizvodno od ušća i maksimalni godišnji protok, za usvojenu verovatnoću pojave p , a prema koincidenciji za istu verovatnoću pojave $P[p(qTR_{max}) \cap p(QOUT_{cor2})]$.
 4. Na glavnoj reci uzvodno od zone međusobnog uticaja glavne reke i pritoke merodavni nivoi odgovaraju maksimalnom godišnjem protoku na glavnoj reci (na uzvodnoj hidrološkoj stanici) za usvojenu verovatnoću pojave $QIN_{max,p}$.
 5. Na pritoci uzvodno od zone međusobnog uticaja glavne reke i pritoke – merodavni nivoi odgovaraju maksimalnom godišnjem protoku na pritoci (na ulaznoj hidrološkoj stanici) za usvojene verovatnoće pojave p , $qTR_{max,p}$.

Dužina rečne deonice gde se mogu postići uštede u projektovanju linijskih sistema za obranu od velikih voda, u slučaju korišćenja rezultata proračuna koincidencije velikih voda glavnog toka i pritoke, jednaka je dužine anvelope maksimalnih nivoa u zoni međusobnog uticaja. Efekat uštede je obrnuto srazmeran čvrstini korelacione zavisnosti između razmatranih slučajnih promenljivih.



Slika 5. Šematski prikaz određivanja merodavnih nivoa na Dunavu u zoni uticaja Tise

Simboli u gore navedenom tekstu i na slici označavaju sledeće:

- $QOUT_{max,p}$ – maksimalni godišnji protok Dunava kod Slankamena za verovatnoću pojave p ,
- $QIN_{max,p}$ – maksimalni godišnji protok Dunava kod Bogojeva za verovatnoću pojave p ,
- $qTR_{max,p}$ – maksimalni godišnji protok Tise kod Sente za verovatnoću pojave p ,
- QIN_{cor1} - odgovarajući protok Dunava kod Bogojeva pri pojavi maksimalnog godišnjeg protoka Dunava kod Slankamena,
- $QOUT_{cor1}$ – odgovarajući protok Dunava kod Slankamena pri pojavi maksimalnog godišnjeg protoka Dunava kod Bogojeva,
- $QOUT_{cor2}$ – odgovarajući protok Dunava kod Slankamena pri pojavi maksimalnog godišnjeg protoka Tise kod Sente,
- qTR_{cor2} – odgovarajući protok Tise kod Sente pri pojavi maksimalnog godišnjeg protoka Dunava kod Slankamena,
- $P[p(QOUT_{max}) \cap p(QIN_{cor1})]$ – koincidencija maksimalnog godišnjeg protoka Dunava kod Slankamena i odgovarajućeg protoka Dunava kod Bogojeva,
- $P[p(QOUT_{max}) \cap p(QOUT_{cor1})]$ – koincidencija maksimalnog godišnjeg protoka Dunava kod Bogojeva i odgovarajućeg protoka Dunava kod Slankamena,
- $P[p(QOUT_{max}) \cap p(qTR_{cor2})]$, – koincidencija maksimalnog godišnjeg protoka Dunava kod Slankamena i odgovarajućeg protoka Tise kod Sente,
- $P[p(qTR_{max}) \cap p(QOUT_{cor2})]$, – koincidencija maksimalnog godišnjeg protoka Tise kod Sente i odgovarajućeg protoka Dunava kod Slankamena.

Navedene konstatacije ukazuju na značaj primene rezultata proračuna koincidencije velikih voda u cilju ekonomičnijeg dimenzionisanja linijskih sistema za odbranu od poplava u zoni međusobnog uticaja glavne reke i pritoke. Ovi rezultati se mogu primenjivati u svim fazama projektovanja, izgradnje, rekonstrukcije i eksploatacije sistema. Pored pružanja pomoći pri izradi strategija izgradnje i rekonstrukcije odbrambenih sistema praktična korist primenjivanja izložene procedure može se kvantitativno iskazati.

U službi odbrane od poplava, kada se pojavi potreba aktiviranja potencijalnih nizinskih retenzija na razmatranom sektoru Dunava, formirane višestruke zavisnosti koincidencija velikih voda, mogu se koristiti za pouzdaniju procenu smanjenja rizika od poplava nizvodnog područja.

5. ZAKLJUČAK

Brojni navedeni primeri primene razrađene metodologije definisanja višestruke koincidencije poplavnih voda na Dunavu, Savi i Tisi ukazuju na široku mogućnost primene u više vodoprivrednih grana. Najaktuelnije oblasti primene su zaštita od poplava i regulacija vodotoka, a može se koristiti i u službi izdavanja real-time hidroloških prognoza i upozorenja o nailasku katastrofalnih poplava. Doprinos ovoga rada je u unapređivanju praktične hidrologije kao nauke o vodama, posebno sa aspekta sagledavanja geneze poplavnih talasa na složenim rečnim sistemima, kao i sa gledišta pouzdanije i sveobuhvatnije ocene rizika od poplava.

Generalno, rezultati proračuna koincidencije velikih voda mogu imati višestruk značaj. Prvo, mogu se koristiti za ocenu statističke značajnosti različitih parametara hidrograma velikih voda, a i poplave u

celini, kako na Dunavu, tako i na njegovim glavnim pritokama. Praktični značaj ovih rezultata je u tome da se u slučaju odsustva koincidencije, gledano u celini, može ići na niži nivo zaštite priobalja u zoni međusobnog uticaja glavne reke i pritoke, u odnosu na klasičnu jednodimenzionalnu proceduru definisanja objekata, a da se obezbedi isti stepen zaštite sa gledišta rizika od poplava.

Drugo, predložena metodologija omogućuje dobijanje merodavnih kvantitativnih pokazatelja optimalnih kombinacija razmatranih slučajno promenljivih sa gledišta ekonomičnosti i sigurnosti objekata.

Pored toga, navedena procedura se može koristiti i u slučaju ravničarskih reka, gde se često pojavljuje poteba da se celokupno područje mora istovremeno braniti od poplava na dva ili više vodotoka. Klasična nezavisna rešenja zaštite od poplava navedenih vodotokova su obično skupa, a često tehnički neizvodljiva, pošto se radi o ograničenom prostoru i po pravilu se traži visok stepen zaštite (urbana područja). Ova metodologija omogućuje da se rešenje zaštite od poplava na ovim vodotocima posmatra integralno, vodeći računa o koincidenciji njihovih velikih voda. Jedna od namena ovakvog rešenja je da se, na primer između dva vodotoka, izgradi tzv. "rasteretni kanal" (jedan ili više njih, sa ili bez ustava i drugih hidrotehničkih objekata). Svrha rasteretnog kanala je da u slučaju odsustva koincidencije poplavnih talasa na oba vodotoka, deo velikih voda jednog vodotoka uputi ka drugom vodotoku i obnuto.

ZAHVALNICA

Predstavljeno istraživanje je sprovedeno za potrebe naučnog projekta br. 22005: „Ekstremne hidrološke situacije: poplave i suše u Srbiji“, koji je finansiralo Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Petković T., Prohaska S. (2004): Estimation of the Maximum Water Discharge on the Ungauged River Basin in the Zapadna Morava basin, XXII Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Brno, Czech Republic
- [2] Prohaska S., Isailović D., Srna P., Marčetić I. (2000): The Danube and its Basin – A Hydrological Monograph Follow-up volume IV, Coincidence of Flood Flow of the Danube River and its Tributaries, Regional Co-operation of the Danube Countries in the Frame of the International Hydrological Programme of UNESCO, pp 1-187, Water Research Institute Bratislava, Slovakia
- [3] Prohaska S., Isailović D., Srna P. (2002): Flood coincidence of the Danube and Tisza rivers in Serbia and Montenegro, International Conference on Research Basins and Hydrological Planning, Hefei, P.R. China; edited by: Ru-Ze Xi, Wei-Zu Gu and Klaus-Peter Seiler
- [4] Prohaska S. (2006): Hidrologija II, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Rudarsko-geološki fakultet, Republički hidrometeorološki zavod, Beograd
- [5] Prohaska S., Simić Z., Orlić A., Stanić Ž. (2007): Mathematical Model for the Definition of Flood Wave Formulation Genesis on Small Non-monitored Watersheds, International Conference "Erosion and Torrent Control as a Factor in Sustainable River Basin Management", University of Belgrade, Faculty of Forestry, Belgrade
- [6] Prohaska S., Ilić A., Majkić B. (2008): Multiple-coincidence of flood waves on the Danube river and its tributaries XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Bled, Slovenia

NEW METHOD FOR DEFINING MULTIPLE COINCIDENCE OF FLOOD WAVES IN COMPLEX RIVER SYSTEMS

by

dr Stevan PROHASKA, Aleksandra ILIĆ
Institute for Development of Water Resources "Jaroslav Černi", Belgrade

Summary

Assessment of statistical significance of future flooding in complex hydrological conditions of flood wave formation on the mouths of major river tributaries, as well as the selection of design hydrological parameters for construction of flood protection facilities in these areas, remains a priority task for contemporary hydrological science. So far, the applied classical approach of one-dimensional assessment of probability, in a situation where floods in two or more streams do not occur simultaneously, does not give satisfactory results in the evaluation of flood risks. It is necessary to develop such a procedure that will define the probability of flood in the downstream area on a multidimensional space of probabilities of floods at the inflow profiles of the main river and tributaries. In other words, it is necessary to account for the problem of coincidence of floods in the complex river system.

The subject of this research is a practical solution to this problem. In this particular case, the procedure for defining multiple dependencies of flood occurrence on the main river and tributaries is developed, i.e. a practical method is offered for defining of multiple coincidences of flood wave on the Danube and its tributaries, Tisa and Sava rivers. At this stage of development of the mathematical model, the flood wave volume was accepted as representative parameter for evaluating the importance of the flood.

The paper shows practical examples of partial and multiple coincidence of flood waves on the Danube, Tisa and Sava rivers.

Key words: multiple coincidence, flood wave, flood wave volume, two-dimensional distribution function, cumulative distribution function, cumulative exceedence probability

Redigovano 19.11.2010.