

Izvorni znanstveni članak | Original Scientific Paper | UDK 556.532(282 Sava)
556.532(282 Drina)

Primljeno (Received): 18.1.2016.; Prihvaćeno (Accepted): 8.2.2016.

KOINCIDENCIJA VELIKIH VODA SAVE I DRINE

prof. dr. Stevan Prohaska,
dipl. ing. građ.

Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi"
Jaroslava Černog 80,
11000 Beograd, Srbija
stevan.progaska@jcerni.co.rs

Aleksandra Ilić, dipl. ing. građ.

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

U radu je prikazana teorijska osnova za definiranje koincidencije velikih voda u zoni značajnog međusobnog utjecaja glavne rijeke i pritoke. Prikazane su matematičke osnove i procedure za definiranje linija istih vjerojatnosti pojave, kao i linija vjerojatnosti prekoračenja dvije slučajne varijable. Za slučaj složenog riječnog sustava, ograničenog s dva ulazna profila (na glavnoj rijeci i pritoci) i jednog izlaznog (na glavnoj rijeci), bez značajnog utjecaja dotoka s međusliva, definirane su relevantne konstelacije (kombinacije) maksimalnih godišnjih protoka i njegovih odgovarajućih (sinkronih) vrijednosti protoka na ostalim ulazno/izlaznim profilima. Precizirani su pravci praktičnog korištenja definiranih zavisnosti koincidencija velikih voda, a to su:

- definiranje mjerodavnih protoka za ekonomsko-optimalni proračun linija nivoa vodnog lica u zoni međusobnog utjecaja glavne rijeke i pritoke,
- definiranje mjerodavnih velikih voda različitih vjerojatnosti pojave na sektoru glavne rijeke, nizvodno od ušća pritoke, ako su poznati samo protoci na dva ulazna profila (na glavnoj rijeci i pritoci),
- ocjena statističke značajnosti povijesnih i prognoziranih poplava.

Rezultati primjene navedene procedure proračuna koincidencije velikih voda prikazani su za sektor rijeke Save, od vodomjerne postaje Županja do vodomjerne postaje Sremska Mitrovica, s uključivanjem donjeg toka rijeke Drine, od vodomjerne postaje Radalj do ušća u Savu. Rad je, numerički i grafički, ilustriran rezultatima proračuna pod a), b) i c), za navedeni sektor rijeka Save i Drine.

Ključne riječi: koincidencija velikih voda, linije istih vjerojatnosti pojave, vjerojatnosti prekoračenja, statistička značajnost poplave

1. UVODNE NAPOMENE

Klasičan pristup ocjeni rizika od poplava sastoji se u određivanju vjerojatnosti kojom poplava može premašiti unaprijed zadanu veličinu promatrane karakteristike poplavnog vala. Ovo je, zapravo, ekvivalentno određivanju povratnog perioda poplave. Procedura koja se pri tome provodi obuhvaća statističku analizu hidroloških

podataka na obližnjoj vodomjernoj postaji. S inženjerskog stajališta, ovakav pristup daje zadovoljavajuće rezultate u rješavanju velikog broja zadataka. Ova se konstatacija posebno odnosi na rješavanje problema zaštite od poplava u relativno jednostavnim slučajevima, točnije rečeno, kada se u branjenom području ne javljaju pritoke.

Međutim, kad branjeno područje obuhvaća i ušće pritoke, navedeni pristup ne daje pouzdanu procjenu promatrane karakteristike poplavnog vala. Naime, nastanak i razvoj poplave na dva vodotoka su po pravilu različiti, tako da se maksimalne karakteristike poplavnih valova ne javljaju istovremeno na oba vodotoka. Nadalje, poplavni val na jednom vodotoku može izazvati znatan utjecaj na režim tečenja u drugom. Pored toga, hidrološki se podatci obično prikupljaju na vodomjernim postajama lociranim izvan zone međusobnog utjecaja promatranih vodotokova. U takvim je uvjetima od posebnog značaja ocijeniti koincidenciju pojave poplave na glavnom toku i pritoci, a sustav za zaštitu od poplava mora se dimenzionirati na protok određenog povratnog perioda koji je definiran analizom dvodimenzionalne vjerojatnosti.

2. PRORAČUN KOINCIDENCIJE VELIKIH VODA

2.1 Teorijska osnova

Za određivanje računskih nivoa u zoni međusobnih utjecaja glavne rijeke i njenih pritoka potrebno je definirati vjerojatnost jednovremenske pojave, odnosno koincidencije poplava na promatranim vodotocima.

Izraz "koincidencija" označava vjerojatnost jednovremenske pojave dvije slučajne varijable X i Y , koje predstavljaju slučajne događaje na glavnom toku i na njegovoj pritoci (Prohaska, 2006.).

Kada su dvodimenzionalne slučajne varijable normalno raspodijeljene, funkcija raspodjele vjerojatnosti (linije istih vjerojatnosti pojave slučajnih varijabli X i Y) se može napisati na sljedeći način (Prohaska et al., 1978.):

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sqrt{1-R^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2(1-R^2)} \left[\frac{(x-\bar{X})^2}{\sigma_x^2} - \frac{2R(x-\bar{X})(y-\bar{Y})}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y-\bar{Y})^2}{\sigma_y^2} \right]} \quad (1)$$

Simboli imaju sljedeće značenje:

x i y – tekuće vrijednosti slučajnih varijabli X i Y
 \bar{X} i \bar{Y} – prosječne vrijednosti varijabli X i Y
 σ_x i σ_y – standardne devijacije varijabli X i Y
 R – koeficijent korelacije između varijabli X i Y .

Kumulativna funkcija raspodjele dvodimenzionalne slučajne varijable (linije prekoračenja slučajnih varijabli [$X \geq x$ i $Y \geq y$]) definirana je izrazom (Prohaska et al., 1978.):

$$\Phi(x, y) = P[X \geq x; Y \geq y] \quad (2)$$

gdje X i Y predstavljaju slučajne varijable (karakteristike poplavnog vala) glavnog toka i njegove

pritoke, dok su x i y odgovarajuće vrijednosti koje su istovremeno prekoračene s X i Y .

Imajući u vidu da promatrane varijable u pravilu ne podliježu normalnoj raspodjeli, potrebno ih je logaritmirati i djelomično standardizirati na način:

$$u = \log X \quad w = \log Y \\ \psi = u - \bar{u} \quad \xi = w - \bar{w}$$

Tako se funkcija raspodjele transformacijskih varijabli može pisati u formi:

$$f(\psi, \xi) = \frac{1}{2\pi \cdot (1-\rho^2)} e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} [\psi^2 - 2\rho\psi\xi + \xi^2]} \quad (3)$$

Vrijednosti varijanci σ_ξ^2 i σ_ψ^2 , kao i koeficijent korelacije ρ mogu se izračunati iz izmjerenih serija. Koristeći izračunatu vrijednost koeficijenta korelacije ρ varijabli ξ i ψ , iz jednadžbe

$$\Phi(\lambda) = 1 - \int_{-\infty}^{-t} e^{-\frac{t^2}{2(1-\rho^2)}} dt \quad (4)$$

zamjenom $t^2 = \psi^2 - 2\rho\psi\xi - \xi^2$, mogu se odrediti vrijednosti λ za bilo koju zadanu veličinu $\Phi(\lambda)$. Naime, vrijednost λ je dana jednadžbom:

$$\psi^2 - 2\rho\psi\xi + \xi^2 = \lambda^2 \quad (5)$$

odakle slijedi:

$$\xi^2 = 2\rho\psi\xi + (\psi^2 - \lambda^2) = 0 \quad (6)$$

Rješavanjem kvadratne jednadžbe (6) za bilo koju veličinu ψ dobije se odgovarajući par veličina $\xi_{1,2}$. Drugim riječima, za svaku standardiziranu promjenjivu veličinu $\psi = \log X - \log \bar{X}$ postoje dvije standardizirane vrijednosti $\xi_{1,2} = \log Y - \log \bar{Y}$.

Kada se za svaku odabranu vrijednost ψ u koordinatnom sustavu nanesu odgovarajuće veličine ξ_1 i ξ_2 , mogu se konstruirati elipse koje predstavljaju željenu vjerojatnost $f(\lambda)$. Riječ je o korelacijskim elipsama i one predstavljaju presjek horizontalne ravnine i površine koja definira dvodimenzionalnu normalnu raspodjelu (Yevjevich, 1972.). Tada se, koristeći inverznu proceduru, antilogaritmiranjem mogu izračunati veličine prirodnih nestandardiziranih varijabli X i Y .

Ako tako određene odgovarajuće vrijednosti varijabli X i Y ucrtamo u pravokutni koordinatni sustav, elipse se transformiraju u zatvorene krivulje nepravilnog oblika.

Sljedeći korak je procjena vjerojatnosti jednovremenske pojave da je X manje ili jednako od zadane vrijednosti x , odnosno da je istovremeno Y manje ili jednako od zadane veličine y . U prethodnom se razmatranju krenulo od pretpostavke da dvodimenzionalne slučajne varijable ψ i ξ podliježu zakonu dvodimenzionalne raspodjele sa srednjim vrijednostima m_ψ i m_ξ , varijancama σ_ψ^2 i σ_ξ^2 , i koeficijentom korelacije ρ . Ako je pretpostavka zadovoljena, zahtijevana vjerojatnost se može se izraziti na način:

$$P_r(X \leq h_o; Y \leq k_o) = \int_{-\infty}^{\frac{h_o - m_\psi}{\sigma_\psi}} \int_{-\infty}^{\frac{k_o - m_\xi}{\sigma_\xi}} g(s, t, \rho) \cdot ds \cdot dt = \quad (7)$$

$$L \cdot \left[-\left(\frac{h_o - m_\psi}{\sigma_\psi} \right); -\left(\frac{k_o - m_\xi}{\sigma_\xi} \right); \rho \right]$$

Odgovor na osnovno pitanje: kolika je vjerojatnost da varijabla X bude veća od zadane veličine h_o , a da istovremeno Y bude veća od zadane veličina k_o , može se definirati kao:

$$P\{X \geq h_o, Y \geq k_o\} = 1 - P_r\{X \leq h_o, Y \leq k_o\} \quad (8)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti je dakle:

$$\frac{1}{2 \cdot \sigma_\psi \cdot \sigma_\xi \cdot \sqrt{1 - \rho^2}} e^{\left[\frac{G}{2(1 - \rho^2)} \right]} = \quad (9)$$

$$= \frac{1}{\sigma_\psi \cdot \sigma_\xi} \cdot g\left(\frac{\psi - m_\psi}{\sigma_\psi}; \frac{\xi - m_\xi}{\sigma_\xi}; \rho \right)$$

gdje je:

$$G = \frac{(\psi - m_\psi)^2}{\sigma_\psi^2} - \frac{2\rho \cdot (\psi - m_\psi) \cdot (\xi - m_\xi)}{\sigma_\psi \cdot \sigma_\xi} + \frac{(\xi - m_\xi)^2}{\sigma_\xi^2}$$

Proračun zahtijevane vjerojatnosti opisan je izrazima (7) i (8). Rješenja se zapravo dobivaju rješavanjem jednadžbe (9). Rješenje ove jednadžbe dano je grafički u literaturi (Abramowitz i Stegun, 1972.).

Grafičko rješenje se temelji na sljedećoj jednadžbi:

$$L(h, k, \rho) = L\left(h, 0, \frac{(\rho \cdot h - k) \cdot \operatorname{sgn} h}{\sqrt{h^2 - 2\rho \cdot h \cdot k + k^2}} \right) + \quad (10)$$

$$+ L\left(k, 0, \frac{(\rho \cdot h - k) \cdot \operatorname{sgn} k}{\sqrt{h^2 - 2\rho \cdot h \cdot k + k^2}} \right)$$

$$- \begin{cases} 0; & \text{za } h \cdot k \geq 0 \text{ i } h + k \geq 0 \\ \frac{1}{2}; & \text{za sve druge slučajeve} \end{cases}$$

gdje su ($\operatorname{sgn} h$) i ($\operatorname{sgn} k$) jednaki jedinici kad su h i k veći ili jednaki nuli, odnosno -1 za negativne vrijednosti h i k . Proračun odgovarajućih vjerojatnosti provodi se na sljedeći način: vrijednosti $\log X$ i $\log Y$ unose se u koordinatni sustav X i Y te se izaberu granične vrijednosti h_o za varijablu X i k_o za varijablu Y . Potom se odredi vjerojatnost zajedničkog događaja, tj. vjerojatnost da će varijable X i Y premašiti unaprijed zadane veličine h_o i k_o . Prethodno se moraju izračunati srednje vrijednosti varijance varijabli X i Y te njihov koeficijent korelacije. Tada se veličine h i k određuju na temelju jednadžbi:

$$h = \frac{h_o - m_\psi}{\sigma_\psi}; \quad k = \frac{k_o - m_\xi}{\sigma_\xi} \quad (11)$$

gdje h_o i k_o predstavljaju granične vrijednosti od $\log X$ i $\log Y$. Zatim se izračunavaju svi neophodni elementi za jednadžbu (10) iz nomograma dostupnih u literaturi (Abramowitz i Sregun, 1972.) za izračunate veličine h , k i ρ te se očitaju vjerojatnosti dane jednadžbom (8).

Tako izračunata vjerojatnost u biti predstavlja vjerojatnost prekoračenja događaja kombinacije X i Y , tako da točke određene apscisom X i kordinatom Y padaju desno od vrijednosti h_o i iznad vrijednosti k_o . Procedura se ponavlja za sve točke smještene u blizini točke presjeka X i Y . Na taj se način dobiva mreža točaka od kojih je svaka okarakterizirana vjerojatnošću pojave kombinacije X i Y i manje su od točke ove koordinate. Na temelju vjerojatnosti u točki presjeka željenih veličina X i Y izračunavaju se linije istih vjerojatnosti. Postupak je sljedeći: jedna od varijabli, recimo X , uzeta je kao apscisa na mreži vjerojatnosti. Za konstantnu veličinu $X = x_i$ vjerojatnosti P_i očitavaju se za različite vrijednosti $Y = y_j$ na način da se dobije dijagram $P - Y$ za odabranu veličinu x_i . Ista procedura ponavlja se za dovoljno veliki broj točaka x_i kako bi se mogla definirati familija krivulja $P - Y$

od kojih se svaka odnosi na jednu veličinu X . Tada se za izabranu vrijednost jednostavno očita Y na svakom dijagramu za svaki X te se dobije serija parova $X - Y$ s istim vjerojatnostima P .

Opisana procedura ponavlja se za svaku željenu veličinu.

Za ocjenu značajnosti izračunatih koeficijenata korelacije računaju se njihove greške pomoću jednadžbe (Yevjevich, 1972.):

$$\sigma_R = \frac{1-R^2}{\sqrt{N}} \quad (12)$$

gdje su:

σ_R – greška koeficijenta korelacije R

N – ukupan broj podataka.

Usvojen je najčešće korišten kriterij za ocjenu značajnosti koeficijenta korelacije, tj. da se koeficijent korelacije značajno razlikuje od nule, ako njegova apsolutna vrijednost premašuje vrijednost njegove trostruke greške:

$$|R| \geq 3 \cdot \sigma_R \quad (13)$$

Prema apsolutnoj vrijednosti koeficijenta korelacije razlikujemo sljedeća tri stupnja statističke značajnosti koincidencije dvije slučajne varijable i to prema kriterijima:

1. Približno apsolutno statistički značajne koincidencije:

$$a) |R| \geq 0.95 - 1.0 \quad (14)$$

2. Statistički značajne koincidencije:

$$b) |R| \geq 3 \cdot \sigma_R - 0.95 \quad (15)$$

3. Statistički beznačajne koincidencije:

$$c) |R| \leq 3 \cdot \sigma_R \quad (16)$$

2.2 Definiranje promjenjivih veličina

Analiza koincidencije velikih voda glavnog toka i pritoke temelji se na definiranju dvoparametarskog zakona raspodjele sljedećih kombinacija varijabli (Prohaska et al., 1999.):

1. maksimalna godišnja vrijednost odabranog parametra poplavnog vala na glavnoj rijeci X –

maksimalna godišnja vrijednost istog parametra poplavnog vala na pritoci Y ,

2. maksimalna godišnja vrijednost odabranog parametra poplavnog vala na glavnoj rijeci X – odgovarajuća vrijednost istog parametra poplavnog vala na pritoci Y_{cor} ,

3. maksimalna godišnja vrijednost odabranog parametra poplavnog vala na pritoci Y – odgovarajuća vrijednost istog parametra poplavnog vala na glavnoj rijeci X_{cor} .

Kao rezultat proračuna koincidencije dobiva se linija istih vjerojatnosti navedenih kombinacija odabranog parametra poplavnog vala (diferencijalni zakon raspodjele), kao i linije koje definiraju vjerojatnost prekoračenja istih konstelacija varijabli, tj.:

$$P[X > x; Y > y] = \int_{X_1}^{\infty} \int_{Y_1}^{\infty} g(X, Y, R) dx dy$$

$$P[X > x; Y_{cor} > y] = \int_{X_1}^{\infty} \int_{Y_1}^{\infty} g(X, Y_{cor}, R) dx dy_{cor} \quad (17)$$

$$P[X_{cor} > x; Y > y] = \int_{X_1}^{\infty} \int_{Y_1}^{\infty} g(X_{cor}, Y, R) dx_{cor} dy$$

Poplavni val je predstavljen hidrogramom čiji maksimum premašuje unaprijed zadanu veličinu. Ta zadanu veličinu može se izabrati s prosječne linije trajanja protoka ili na neki drugi način. Za poplavni se val mogu analizirati sljedeći karakteristični parametri:

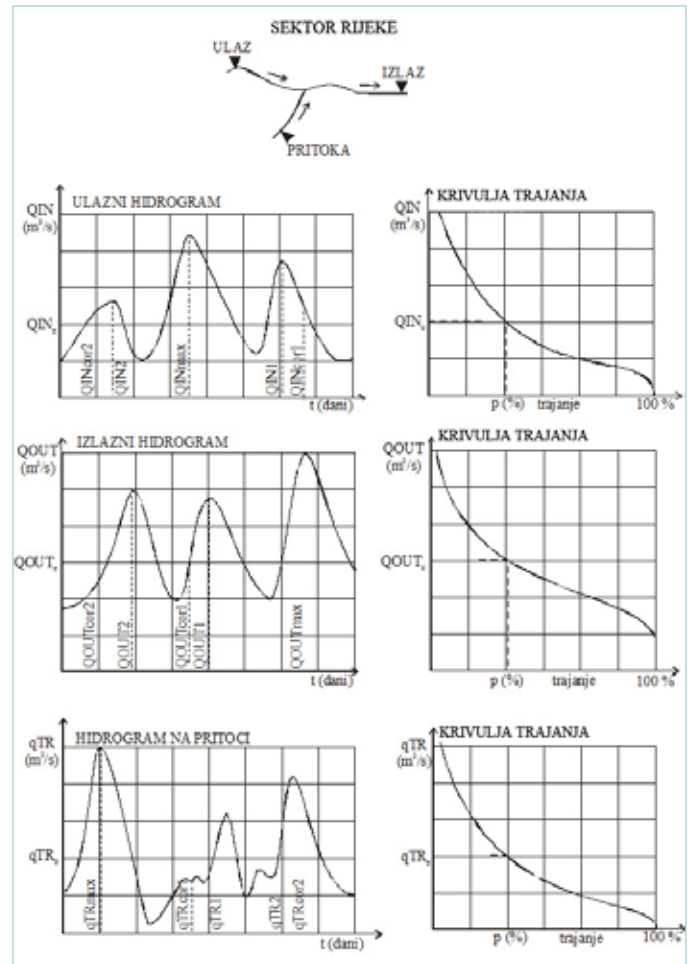
- maksimalna vrijednost protoka – Q_{max}
- zapremina poplavnog vala iznad unaprijed utvrđenog protoka – W
- trajanje poplavnih valova iznad zadanog protoka – T
- vremenska razlika između maksimalnog protoka na dvije promatrane točke vodotoka – τ_{max} .

Ovisno o hidrološkim uvjetima, zadanu vrijednost protoka može biti premašena više puta tijekom kalendarske godine. To znači da se broj prethodno definiranih događaja može mijenjati od godine do godine. Dakle, godišnja učestalost poplava predstavlja iznimno važnu karakteristiku koja se mora definirati kroz prethodnu analizu. Nadalje, postoji i interes za sagledavanje perioda godine u kojem se poplava može dogoditi.

Pri analizi koincidencije velikih voda na glavnom toku i pritoci ili na dva profila istog vodotoka uzvodno i nizvodno od pritoke, mora se posvetiti odgovarajuća pažnja genezi poplavnog vala. S tim u vezi, najznačajnije karakteristike koincidencije poplavnih valova koje se analiziraju u postupku definiranja koincidencije velikih voda, shematski su opisane na slici 1.

Simboli na slici 1 označavaju:

- QIN_{max} : maksimalni godišnji protok glavne rijeke na ulaznom profilu promatranog riječnog sektora
- $QOUT_{max}$: maksimalni godišnji protok glavne rijeke na izlaznom profilu promatranog riječnog sektora
- QTR_{max} : maksimalni godišnji protok pritoke na promatranom riječnom sektoru
- QIN_{cor1} : odgovarajući protok glavne rijeke u ulaznom profilu u trenutku pojave maksimalnog godišnjeg protoka na izlaznom profilu glavne rijeke na promatranom riječnom sektoru
- $QOUT_{cor1}$: odgovarajući protok glavne rijeke u izlaznom profilu u trenutku pojave maksimalnog godišnjeg protoka na ulaznom profilu glavne rijeke na promatranom riječnom sektoru
- QTR_{cor1} : odgovarajući protok pritoke u trenutku pojave maksimalnog godišnjeg protoka na ulaznom profilu glavne rijeke na promatranom riječnom sektoru
- QIN_{cor2} : odgovarajući protok glavne rijeke u ulaznom profilu u trenutku pojave maksimalnog godišnjeg protoka na pritoci
- $QOUT_{cor2}$: odgovarajući protok glavne rijeke u izlaznom profilu u trenutku pojave maksimalnog godišnjeg protoka na pritoci
- QTR_{cor2} : odgovarajući protok pritoke u trenutku pojave maksimalnog godišnjeg protoka na izlaznom profilu glavne rijeke na promatranom sektoru
- QIN_1 : maksimalni vršni protok poplavnog vala na glavnoj rijeci u ulaznom profilu za vrijeme pojave maksimalnog godišnjeg protoka na izlaznom profilu glavne rijeke na promatranom riječnom sektoru
- $QOUT_1$: maksimalni vršni protok poplavnog vala na glavnoj rijeci u izlaznom profilu za vrijeme pojave maksimalnog godišnjeg protoka na ulaznom profilu glavne rijeke na promatranom riječnom sektoru
- QTR_1 : maksimalni vršni protok poplavnog vala na pritoci za vrijeme pojave maksimalnog godišnjeg protoka na ulaznom profilu glavne rijeke na promatranom riječnom sektoru
- QIN_2 : maksimalni vršni protok poplavnog vala na glavnoj rijeci u ulaznom profilu za vrijeme pojave maksimalnog godišnjeg protoka na pritoci
- $QOUT_2$: maksimalni vršni protok poplavnog vala



Slika 1: Shematski prikaz karakterističnih simbola za analizu koincidencije protoka

na glavnoj rijeci u izlaznom profilu za vrijeme pojave maksimalnog godišnjeg protoka na pritoci

- QTR_2 : maksimalni vršni protok poplavnog vala na pritoci za vrijeme pojave maksimalnog godišnjeg protoka na izlaznom profilu glavne rijeke na promatranom riječnom sektoru

2.3 Kombinacije varijabli

Za analizu koincidencije velikih voda Save i Drine najzanimljivije su sljedeće kombinacije varijabli:

- a) Istovremene sinkrone pojave
 - a.1 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke prije ušća pritoke – odgovarajući protok glavne rijeke poslije ušća pritoke ($QIN_{max}; QOUT_{cor1}$)
 - a.2 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke prije ušća pritoke – odgovarajući protok pritoke ($QIN_{max}; QTR_{cor1}$)

- a.3 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke poslije ušća pritoke – odgovarajući protok pritoke glavne rijeke prije ušća pritoke ($QOUT_{max}; QIN_{cor1}$)
- a.4 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke poslije ušća pritoke – odgovarajući protok pritoke ($QOUT_{max}; QTR_{cor2}$)
- a.5 Maksimalni godišnji protok pritoke – odgovarajući protok glavne rijeke poslije ušća pritoke ($QTR_{max}; QOUT_{cor2}$)
- a.6 Maksimalni godišnji protok pritoke – odgovarajući protok glavne rijeke prije ušća pritoke ($QqTR_{max}; QIN_{cor2}$)
- b) Genetski – istovremeno
- b.1 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke prije ušća pritoke – maksimalni protok glavne rijeke poslije ušća pritoke genetski istog poplavnog vala ($QIN_{max}; QOUT_1$)
- b.2 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke prije ušća pritoke – maksimalni protok pritoke genetski istog poplavnog vala ($QIN_{max}; QTR_1$)
- b.3 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke poslije ušća pritoke – maksimalni protok glavne rijeke prije ušća pritoke genetski istog poplavnog vala ($QOUT_{max}; QIN_1$)
- b.4 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke poslije ušća pritoke – maksimalni protok pritoke genetski istog poplavnog vala ($QOUT_{max}; QTR_2$)
- b.5 Maksimalni godišnji protok pritoke – maksimalni protok glavne rijeke prije ušća pritoke genetski istog poplavnog vala ($QTR_{max}; QIN_2$)
- b.6 Maksimalni godišnji protok pritoke – maksimalni protok glavne rijeke poslije ušća pritoke genetski istog poplavnog vala ($QTR_{max}; QOUT_2$)
- c) Makro-godišnje istovremeno
- c.1 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke prije ušća pritoke – maksimalni godišnji protok poslije ušća pritoke ($QIN_{max}; QOUT_{max}$)
- c.2 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke prije ušća pritoke – maksimalni godišnji protok pritoke ($QIN_{max}; QTR_{max}$)
- c.3 Maksimalni godišnji protok glavne rijeke poslije ušća pritoke – maksimalni godišnji protok pritoke ($QOUT_{max}, QTR_{max}$)

2.4 Preporuke za korištenje rezultata analize koincidencije

Rezultati proračuna velikih voda na ušćima glavne rijeke i pritoka mogu se praktično koristiti u sljedeće svrhe:

1. Definiranje mjerodavnih maksimalnih nivoa na hidrološki izučenom ušću glavne rijeke i pritoke (Prohaska i Ilić, 2010.);
2. Definiranje mjerodavnih maksimalnih nivoa na hidrološki nedovoljno izučenom ušću glavne rijeke i pritoke – nedostaju podaci na nizvodnom sektoru glavne rijeke (Prohaska et al., 2009.);
3. Ocjena statističke značajnosti koincidencije navedenih karakterističnih parametara registriranih (povijesnih i budućih) hidrograma velikih voda na ušću glavne rijeke i pritoke (Prohaska i Ilić, 2008.).

U tekstu koji slijedi se daje kratki prikaz teorijskih postavki za sve navedene aspekte praktičnog korištenja rezultata proračuna koincidencije velikih voda na ušću glavne rijeke i pritoke.

2.4.1 Proračun koincidencije velikih voda s ciljem definiranja mjerodavnih (projektnih) nivoa na hidrološki izučanim ušćima

Pod pojmom hidrološki izučeno ušće (slika 5) podrazumijeva se da na ulaznim profilima (na glavnom toku i pritoci) te na izlaznom profilu (na glavnom toku nizvodno od ušća) postoje svi neophodni hidrološki podaci (hidrološke postaje) (Prohaska i Ilić, 2010.). Za definiranje mjerodavnih nivoa neophodno je raspolagati sljedećim podacima:

- serijama maksimalnih godišnjih protoka na ulaznim profilima (glavnoj rijeci i pritoci) i izlaznom profilu (glavnoj rijeci), te
- rezultatima proračuna koincidencije velikih voda sljedećih kombinacija varijabli:
 - maksimalni godišnji protok glavne rijeke i maksimalni godišnji protok na pritoci;
 - maksimalni godišnji protok glavne rijeke i odgovarajući protok na pritoci, te
 - maksimalni godišnji protok na pritoci i odgovarajući protok na glavnoj rijeci.

Mjerodavni (projektni) nivoi u široj zoni ušća glavne rijeke i pritoke dobivaju se hidrauličkim proračunom linija nivoa, a na temelju usvojenih graničnih uvjeta i usvojenih mjerodavnih protoka. Mjerodavni protoci, u uvjetima hidrološki izučenih ušća, usvajaju se na sljedeći način:

- na sektoru glavne rijeke nizvodno od ušća: mjerodavni nivoi su dobiveni na temelju teorijske vrijednosti maksimalnog godišnjeg protoka $QOUT_{max,p}$ za usvojenu vjerojatnost pojave p , na hidrološkoj postaji koja se nalazi na glavnoj rijeci nizvodno od ušća pritoke;
- na sektoru glavne rijeke uzvodno od ušća, a u zoni međusobnog utjecaja glavne rijeke i pritoke: mjerodavni nivo je anvelopa maksimalnih nivoa koja se dobiva proračunom linija nivoa vodnog lica, a na temelju protoka određenih kombinacija varijabli:

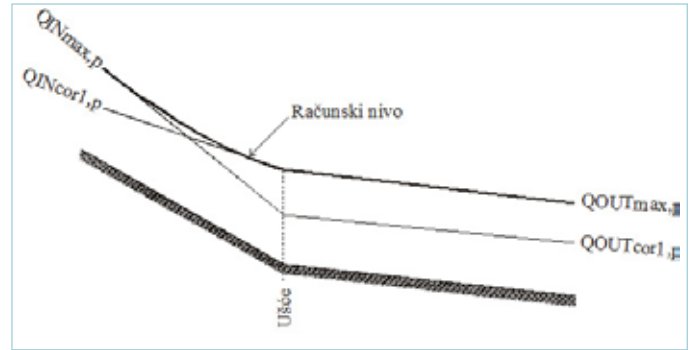
- maksimalnih godišnjih protoka na glavnoj rijeci nizvodno od ušća za usvojenu vjerojatnost pojave p i odgovarajući protok na glavnoj rijeci, uzvodno od ušća za istu vjerojatnost koincidencije $(QOUT_{max}; QIN_{cor1})_p$;
- odgovarajući protok na glavnoj rijeci nizvodno od ušća i maksimalni godišnji protok na glavnoj rijeci, uzvodno od ušća, za usvojenu vjerojatnost pojave p , a prema koincidenciji za istu vjerojatnost $(QIN_{max}; QOUT_{cor1})_p$;
- na pritoci uzvodno od ušća, a u zoni međusobnog utjecaja glavne rijeke i pritoke – mjerodavni nivo je anvelopa maksimalnog nivoa koji se dobiva proračunom linija nivoa na temelju sljedećih kombinacija varijabli:
 - maksimalni godišnji protok na glavnoj rijeci nizvodno od ušća za usvojenu vjerojatnost pojave p i odgovarajući protok na pritoci, uzvodno od ušća za istu vjerojatnost koincidencije $(QOUT_{max}; QTR_{cor2})_p$;
 - odgovarajući protok na glavnoj rijeci nizvodno od ušća i maksimalni godišnji protok na pritoci, uzvodno od ušća, za usvojenu vjerojatnost pojave p , a prema koincidenciji za istu vjerojatnost $(QTR_{max}; QOUT_{cor2})_p$;
- na glavnoj rijeci uzvodno od zone međusobnog utjecaja glavne rijeke i pritoke – mjerodavni nivoi odgovaraju maksimalnom godišnjem protoku na glavnoj rijeci (na ulaznoj hidrološkoj postaji) za usvojenu vjerojatnost pojave $QIN_{max,p}$;
- na pritoci uzvodno od zone međusobnog utjecaja glavne rijeke i pritoka – mjerodavni nivoi odgovaraju maksimalnom godišnjem protoku na pritoci (na ulaznoj hidrološkoj postaji) za usvojene vjerojatnosti pojave p , $QTR_{max,p}$.

Shematski prikaz određivanja mjerodavnih linija nivoa na primjeru sektora međusobnog utjecaja glavne rijeke i pritoke, dan je na slici 2. Usvojeni stupanj zaštite odgovara usvojenoj vjerojatnosti pojave p (Prohaska i Ilić, 2008.).

2.4.2 Proračun koincidencije velikih voda s ciljem definiranja mjerodavnih (projektnih) nivoa na hidrološki nedovoljno izučanim ušćima

Pod pojmom hidrološki nedovoljno izučeno ušće podrazumijeva se širi sektor ušća, u smislu definicije u poglavlju 2.2, gdje na jednoj ulazno–izlaznoj postaji ne postoje odgovarajući podatci. Na temelju raspoloživih podataka definiraju se sve neophodne vjerojatnosti i koincidencije varijabli definirane u poglavlju 2.3.

U cilju pojednostavljenja procedure, u tekstu koji slijedi daje se prikaz procedure proračuna za slučaj



Slika 2: Shematski prikaz izbora mjerodavnog nivoa u zoni ušća rijeka

izostajanja podataka na izlaznom profilu glavne rijeke (Prohaska et al., 2009.). To praktično znači da su na raspolaganju podatci o serijama dnevnih protoka na ulaznim profilima: na ulaznom profilu glavne rijeke (QIN_{max}) i na ulaznom profilu pritoka (QTR_{max}).

U tom je slučaju neophodno definirati koincidencije (linije istih vjerojatnosti pojave $f(x,y)$) i kumulativne linije prekoračenja vjerojatnosti $\Phi(x,y)$ za sljedeće konstelacije varijabli definirane u poglavlju 2.3 i to samo za istovremene sinkrone pojave:

- a.2 maksimalni godišnji protok glavne rijeke prije ušća pritoke – odgovarajući protok pritoke ($QIN_{max}; QTR_{cor1}$)
- a.6 maksimalni godišnji protok pritoke – odgovarajući protok glavne rijeke prije ušća pritoke ($QTR_{max}; QIN_{cor2}$)

U konkretnom slučaju, za potrebe ocjene maksimalnog godišnjeg protoka određene vjerojatnosti pojave $QOUT_{max,p}$ razmatraju se samo po dvije točke presjeka (1 i 2) na navedenim linijama koincidencija na oba grafa koincidencije i to:

1.
$$P[(QIN_{max} > qIN_{max}) \cap (QTR_{cor1} > qTR_{cor1})] = p$$

$$i \quad f(QIN_{max}, QTR_{cor1}) = p$$
2.
$$P[(QTR_{max} > qTR_{max}) \cap (QIN_{cor2} > qIN_{cor2})] = p$$

$$i \quad f(QTR_{max}, QIN_{cor2}) = p$$

gdje je:

p – vjerojatnost pojave

Koordinate točaka sjecišta su:

1. Na grafu 1:
 - točka 1 ($QIN_{max}^1; QTR_{cor1}^1$)_p
 - točka 2 ($QIN_{max}^2; QTR_{cor1}^2$)_p
2. Na grafu 2:
 - točka 1 ($QTR_{max}^1; QIN_{cor2}^1$)_p
 - točka 2 ($QTR_{max}^2; QIN_{cor2}^2$)_p

Mjerodavna vrijednost maksimalnog protoka na nizvodnom sektoru glavne rijeke, nakon ušća pritoke za vjerojatnost pojave p tj. $QOUT_{max,p}$ je jednaka srednjoj vrijednosti zbroja koordinata obje točke na oba grafa, tj:

$$Q_{OUT_{max,p}} = \left\{ \sum_1^2 (QIN^1_{max,p} + QTR^1_{cor1,p}) + \sum_1^2 (QIN^2_{max,p} + QTR^2_{cor1,p}) + \sum_1^2 (QTR^1_{max,p} + QIN^1_{cor2,p}) + \sum_1^2 (QTR^2_{max,p} + QIN^2_{cor2,p}) \right\} / 4$$

Osnovna pretpostavka kod ove procedure je da na promatranom dijelu sektora između ulaznih i izlaznog profila ne postoji značajan doprinos međusliva u formiranju poplavnog vala na izlaznom profilu glavne rijeke.

2.4.3 Proračun ko incidencije velikih voda s ciljem ocjene statističke značajnosti poplavnih valova

Osnovna namjena grafičkih prikaza izračunatih ko incidencija promatranih karakteristika parametara hidrograma velikih voda je da se oni koriste za ocjenu statističke značajnosti poplave na glavnoj rijeci i pritoci, kako povijesnih, tako i budućih poplava.

Postupak za ocjenu statističke značajnosti sastoji se u tome da se karakteristični parametri željene kombinacije varijabli nanose na odgovarajuće dijagrame (Prohaska i Ilić, 2008.). Dobivene se empirijske točke zatim uspoređuju s linijama prekoračenja ko incidencije različitih vjerojatnosti pojave. Logaritamskom (odnosno linearnom) interpolacijom određuju se vjerojatnosti prekoračenja nanijete empirijske točke. Recipročna vrijednost iz dobivene vjerojatnosti predstavlja povratni period, odnosno statističku značajnost promatranih parametara hidrograma velikih voda na ušću glavne rijeke i pritoke.

3 PRIKAZ REZULTATA PRORAČUNA

3.1 Proračun ko incidencije velikih voda Save i Drine

Osnovna pretpostavka je da je za izgradnju sustava za obranu od poplava u zoni ušća rijeke Drine u rijeku Savu, neophodno ekonomski optimalno dimenzionirati sve objekte za zaštitu od poplava (Prohaska, 1983.). U konkretnom slučaju, glavni objekti su riječni nasipi. Po pravilu, riječni se nasipi prostiru duže od same zone međusobnog utjecaja Save i Drine u periodima velikih

voda, na primjer od ulaznih vodomjernih postaja Županja na rijeci Savi i Radalj na rijeci Drini do izlaznog profila – vodomjerne postaje Sremska Mitrovica na rijeci Savi. Shematski prikaz riječnog sektora dan je na slici 3.

Primjenom klasične procedure, za slučaj približno apsolutne statistički značajne ko incidencije (stupanj pod *a*) u poglavlju 2.1 ovoga rada, osnova za dimenzioniranje nasipa bile bi teorijske vrijednosti protoka različitih povratnih perioda koje su dobivene na temelju nizova maksimalnih godišnjih protoka na promatranim profilima vodomjernih postaja za period 1931.–2014. pomoću Log Pearson III teorijske funkcije raspodjele. Te vrijednosti za navedene vodomjerne postaje na promatranom sektoru Save i Drine dane su u tablici 1.

Tablica 1: Teorijske vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka rijeka Save i Drine za različite vjerojatnosti pojave – $Q_{max,p}$ ($m^3 s^{-1}$)

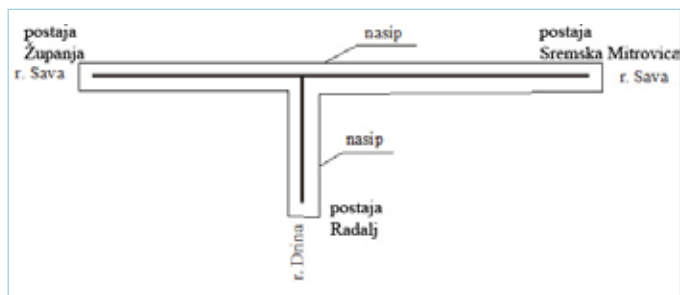
Vjerojatnost pojave u %	Rijeka Sava		Rijeka Drina postaja Radalj*
	postaja Županja	postaja Sremska Mitrovica	
0.1	5910	8449	9568
1	4838	6897	5979
2	4514	6427	5116
5	4080	5800	4101

*vjerojatnost pojave maksimalnih godišnjih protoka rijeke Drine u profilu Radalj izračunata je uključivanjem vrijednosti povijesno maksimalnog protoka iz 1896. godine.

Međutim, neposredno uzvodno od ušća, u zoni međusobnog utjecaja obje rijeke, mjerodavni protoci za dimenzioniranje nasipa nisu protoci definirani u tablici 1, već izvedene veličine koje ovise od čvrstoći ko incidencije velikih voda Save i Drine, a prema kriterijima *b*) i *c*) definiranim u poglavlju 2.1 ovoga rada. U principu, optimalno je usvojiti najvjerojatniju konstelaciju varijabli ko incidencija protoka Save i Drine, s krivulje prekoračenja ko incidencije, a za usvojeni stupanj zaštite, tj. povratni period.

U konkretnom slučaju, proračun ko incidencije velikih voda Save i Drine je proveden za sljedeće konstelacije varijabli:

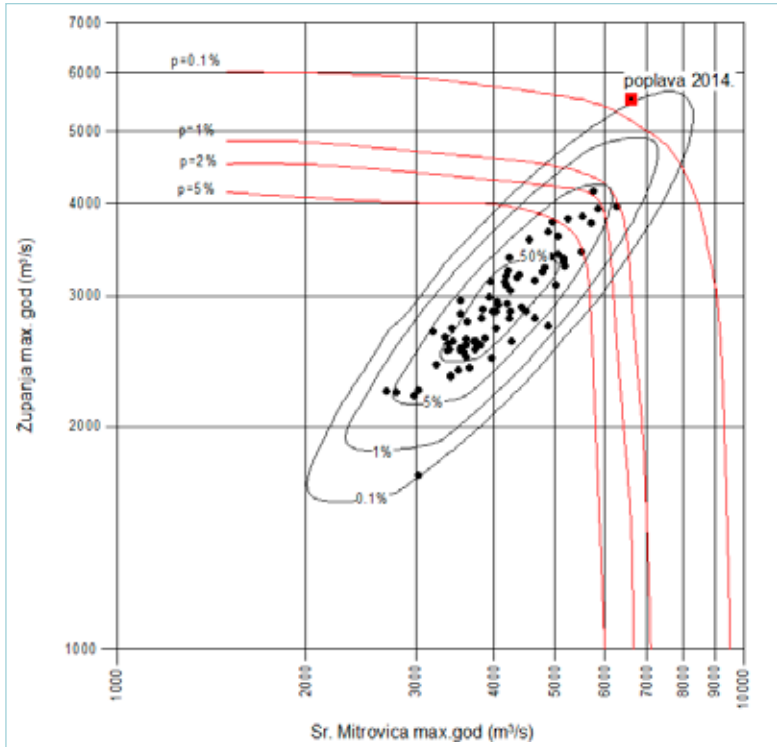
- maksimalni godišnji protok postaje Županja – maksimalni godišnji protok u profilu postaje Sremska Mitrovica ($Q_{max}^Z; Q_{max}^{SM}$) \equiv (IMOM),
- maksimalni godišnji protok u profilu postaje Županja – odgovarajući protok u profilu postaje Sremska Mitrovica ($Q_{max}^Z; Q_{cor1}^{SM}$) \equiv (IMOC),
- odgovarajući protok u profilu postaje Županja – maksimalni godišnji protok postaje Sremska Mitrovica ($Q_{cor2}^Z; Q_{max}^{SM}$) \equiv (TCOM),
- maksimalni godišnji protok u profilu postaje Županja – maksimalni godišnji protok u profilu postaje Radalj ($Q_{max}^Z; Q_{max}^R$) \equiv (IMTM),
- maksimalni godišnji protok u profilu postaje Županja – odgovarajući protok u profilu postaje Radalj ($Q_{max}^Z; Q_{cor1}^R$) \equiv (IMTC),



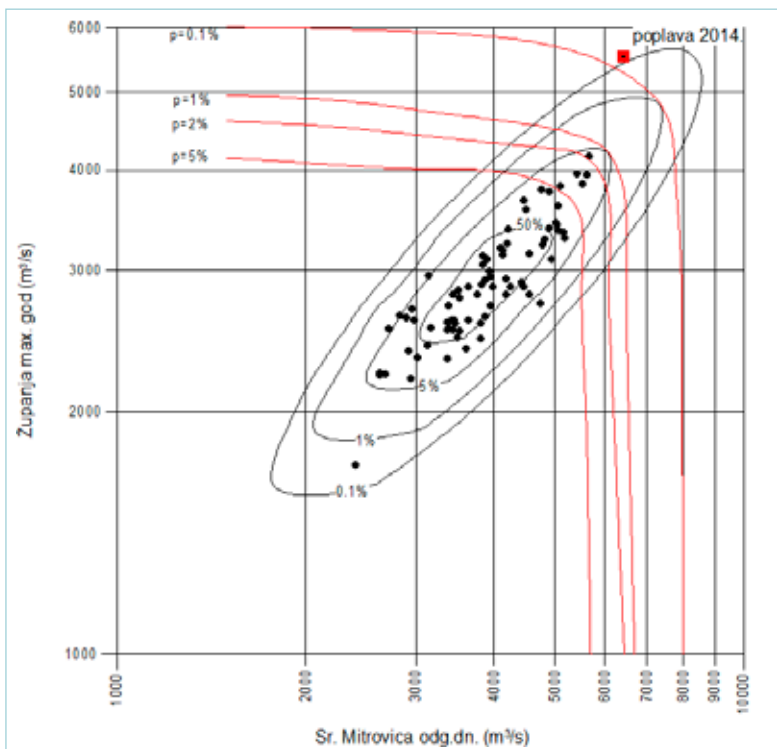
Slika 3: Shematski prikaz sektora za obranu od poplava u široj zoni ušća Drine u Savu

- odgovarajući protok u profilu postaje Županja – maksimalni godišnji protok postaje Radalj ($Q_{cor2}^Z; Q_{max}^R$) \equiv (ICTM),
- maksimalni godišnji protok u profilu postaje Sremska Mitrovica – maksimalni godišnji protok u profilu postaje Radalj ($Q_{max}^{SM}; Q_{max}^R$) \equiv (TMOM),
- maksimalni godišnji protok u profilu postaje Sremska Mitrovica – odgovarajući protok u profilu postaje Radalj ($Q_{max}^{SM}; Q_{cor1}^R$) \equiv (TCOM),
- odgovarajući protok u profilu postaje Sremska Mitrovica – maksimalni godišnji protok postaje Radalj ($Q_{cor2}^{SM}; Q_{max}^R$) \equiv (TMOC).

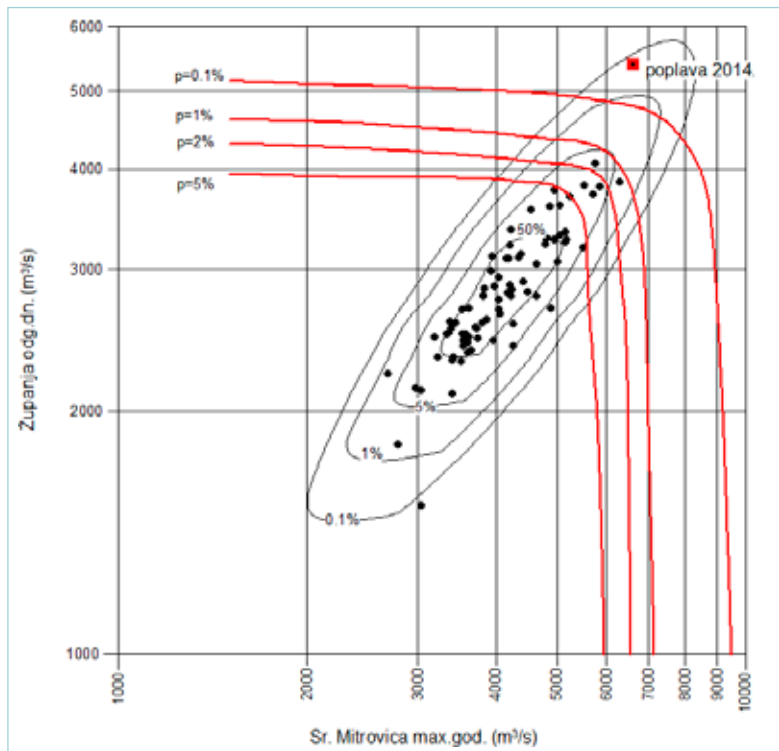
Rezultati proračuna koincidencije velikih voda rijeka Save i Drine prikazani su grafički na slikama 4–9. Na gafovima su prikazane linije istih vjerojatnosti pojave (funkcije gustoće), zatim linije vjerojatnosti prekoračenja (funkcija raspodjele) i empirijske točke.



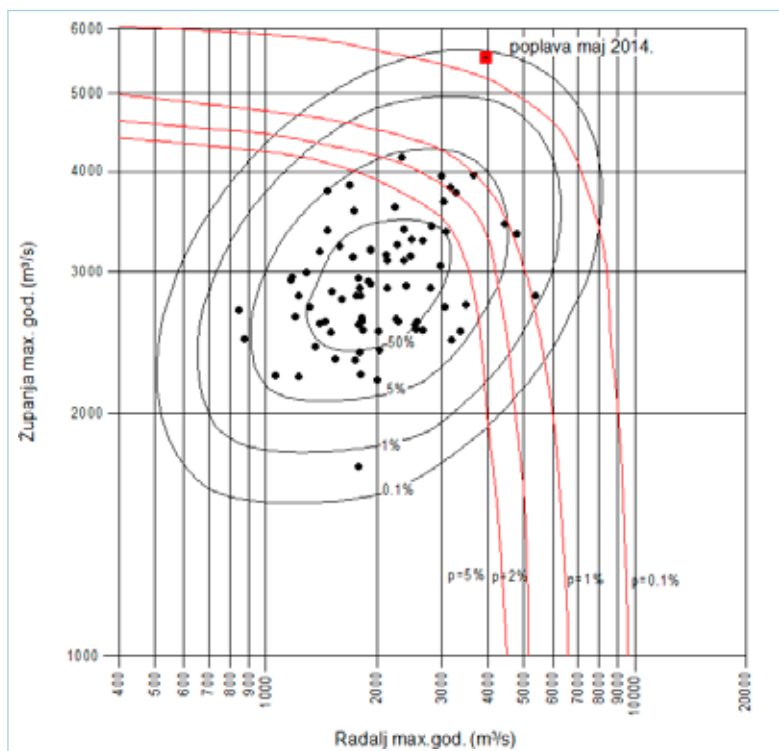
Slika 4.a): Koincidencija maksimalnih godišnjih protoka rijeke Save u profilima vodomjernih postaja Županja i Sremska Mitrovica



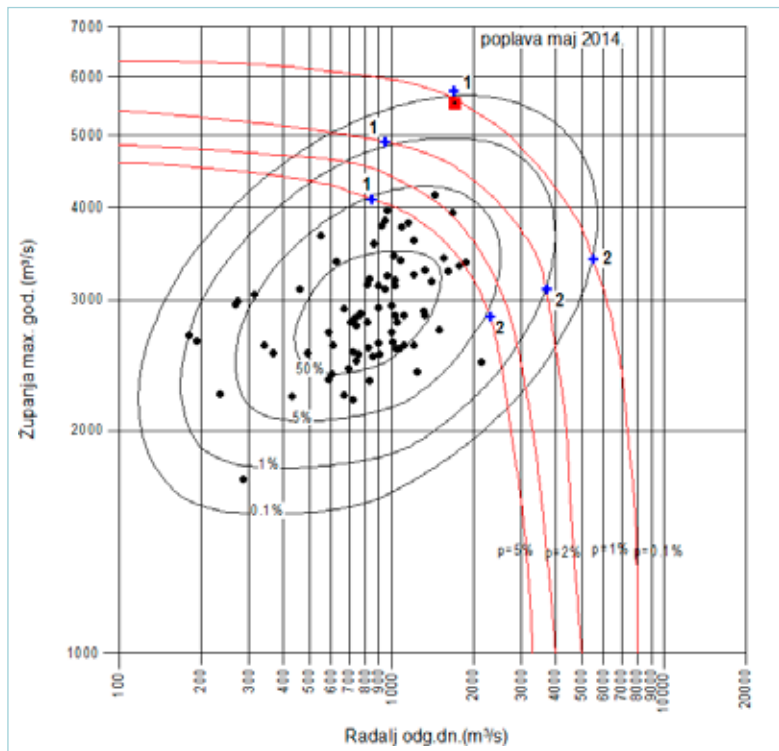
Slika 4.b): Koincidencija maksimalnog godišnjeg protoka rijeke Save kod postaje Županja i odgovarajućeg protoka rijeke Save kod postaje Sremska Mitrovica



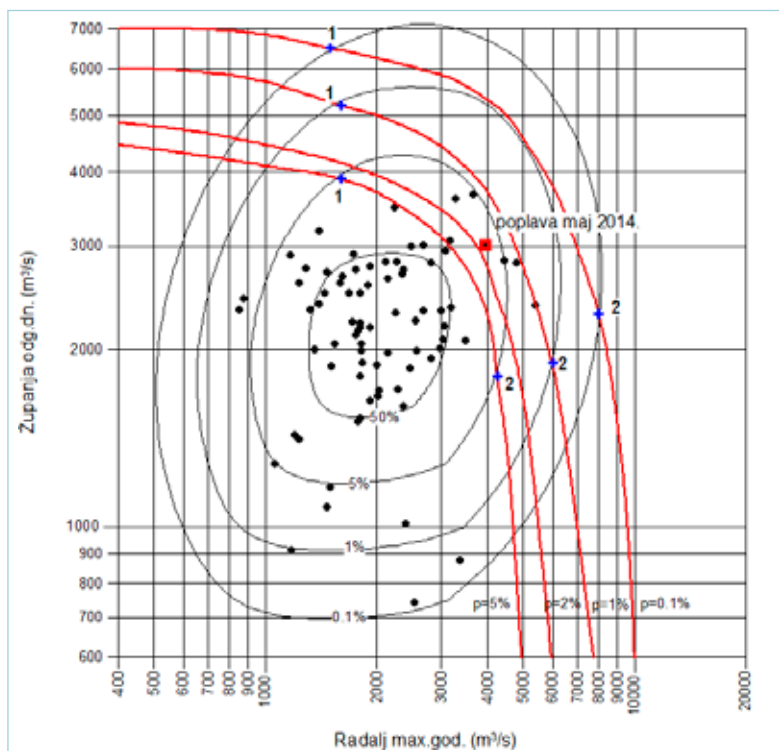
Slika 4.c): Koincidenca maksimalnog godišnjeg protoka rijeke Save kod postaje Sremska Mitrovica i odgovarajućeg protoka rijeke Save kod postaje Županja



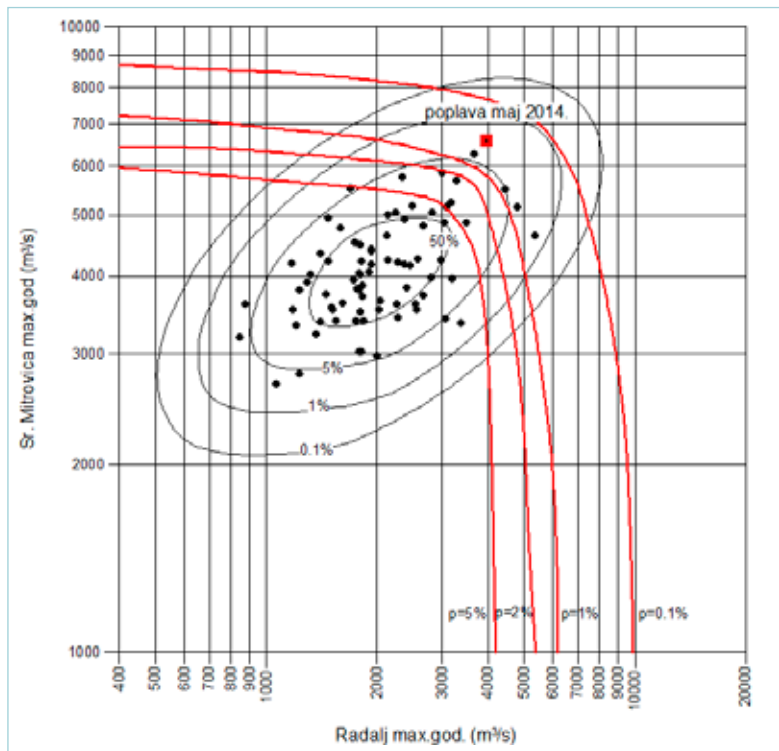
Slika 4.d): Koincidenca maksimalnih godišnjih protoka rijeke Save kod postaje Županja i rijeke Drine kod postaje Radalj



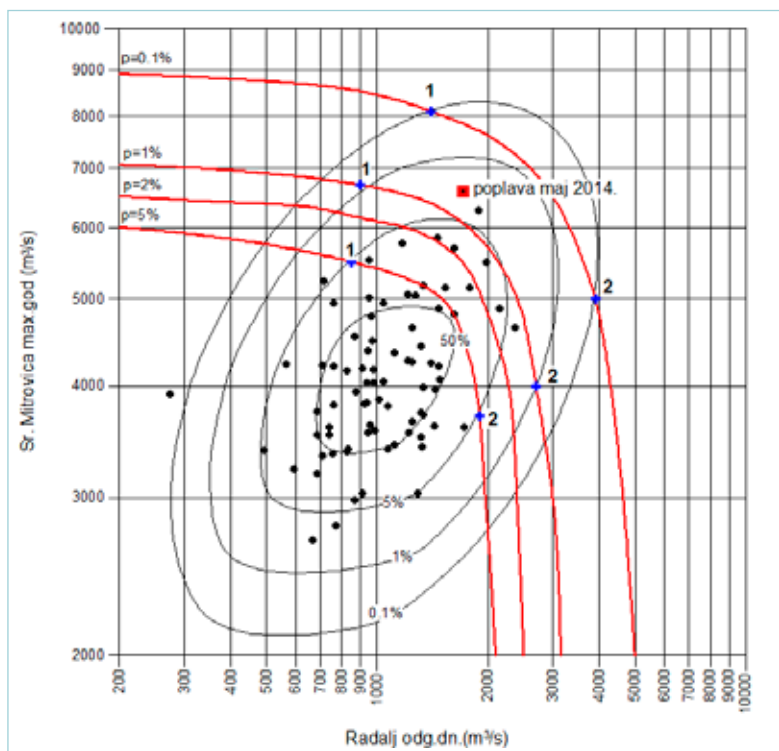
Slika 4.e): Koicidencija maksimalnog godišnjeg protoka rijeke Save kod postaje Županja i odgovarajućeg protoka rijeke Drine kod postaje Radalj



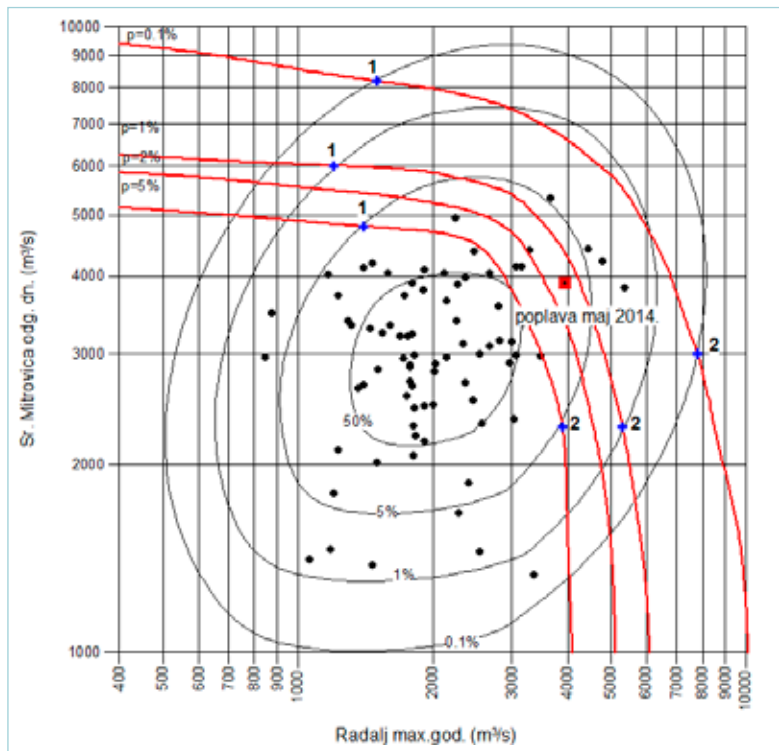
Slika 4.f): Koicidencija maksimalnog godišnjeg protoka rijeke Drine kod postaje Radalj i odgovarajućeg protoka rijeke Save kod postaje Županja



Slika 4.g): Koicidencija maksimalnih godišnjih protoka rijeke Save kod postaje Sremska Mitrovica i rijeke Drine kod postaje Radalj



Slika 4.h): Koicidencija maksimalnog godišnjeg protoka rijeke Save kod postaje Sremska Mitrovica i odgovarajućeg protoka rijeke Drine kod postaje Radalj



Slika 4.i): Koincidencija maksimalnog godišnjeg protoka rijeke Drine kod postaje Radalj i odgovarajućeg protoka rijeke Save kod postaje Sremska Mitrovica

Tablica 2: Prikaz rezultata ocjene statističke značajnosti promatranih konstelacija varijabli

Postaje	konstelacije varijabli	R	N	σ	3σ	statistička značajnost
Županja – Sremska Mitrovica	max – max	0,88134	79	0,025116	0,075349	DA
	max – odg	0,86783	79	0,027775	0,083326	DA
	odg – max	0,87897	79	0,025586	0,076757	DA
Županja – Radalj	max – max	0,3856	79	0,09578	0,28734	DA
	max – odg	0,42735	79	0,091962	0,275885	DA
	odg – max	0,19204	79	0,10836	0,325079	NE
Radalj – Sremska Mitrovica	max – max	0,5563	79	0,077691	0,233072	DA
	odg – max	0,4535	79	0,08937	0,26811	DA
	max – odg	0,25967	79	0,104922	0,314767	NE

Za ocjenu statističke značajnosti izračunatih varijabli koincidencija protoka velikih voda rijeke Save i Drine u tablici 2 dani su osnovni pokazatelji čvrstoće uspostavljenih koincidencijskih veza i to: koeficijent linearne korelacije i standardna greška ocjene koeficijenta korelacije.

Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da postoji statistički značajna koincidencija između svih promatranih konstelacija maksimalnih godišnjih i odgovarajućih protoka rijeka Save i Drine u profilima

vodomjernih postaja Županja, Sremska Mitrovica i Radalj, s izuzećem konstelacije maksimalnog protoka rijeke Drine i odgovarajućih protoka rijeke Save te u slučaju vodomjerne postaje Županja i za slučaj vodomjerne postaje Sremska Mitrovica. Vrijednosti dane u tablici 2 su u granicama statističke značajnosti koje, sukladno postavljenim kriterijima, u potpunosti potvrđuju ispravnost primjene predložene metodologije za proračun koincidencije velikih voda na promatranom sektoru šire zone ušća rijeke Drine u rijeku Savu.

Tablica 3: Prikaz mjerodavnih protoka za različite vjerojatnosti koincidencije velikih voda rijeka Save i Drine (sukladno točki 3.1)

p%	Sava - uzvodno			Sava - nizvodno			Drina		
	Q_{max}^Z	Q_{cor1}^{SM}	Q_{cor1}^R	Q_{max}^{SM}	Q_{cor2}^Z	Q_{cor1}^R	Q_{max}^R	Q_{cor2}^{SM}	Q_{cor1}^Z
0.1	5910	3400	1100	8449	4000	1000	9568	1600	1000
1.0	4838	2500	900	6897	3000	650	5979	1500	1900
2.0	4514	2300	850	6427	2700	530	5116	1300	2050
5.0	4080	2000	800	5800	2300	500	4101	1200	2100

3.2 Izbor mjerodavnih protoka za definiranje linija nivoa na promatranom sektoru Save i Drine

Kvantitativni pokazatelji izračunatih vrijednosti protoka za različite vjerojatnosti koincidencije velikih voda rijeka Save i rijeka Drine, neophodnih za definiranje mjerodavnih (projektiranih) nivoa u široj zoni promatranog ušća (točka 3.1), prikazane su u tablici 3.

Praktična primjena rezultata koincidencije vjerojatnosti (tablica 3) u slučaju dimenzioniranja nasipa na promatranom širem sektoru ušća rijeka Drine u rijeku Savu za, na primjer, nivo zaštite koji odgovara 100-godišnjem povratnom periodu, sastoji se u sljedećem:

Za dionicu rijeka Save od postaje Sremska Mitrovica do ušća rijeka Drine mjerodavan je protok u iznosu: $Q_{max,1\%}^{SM} = 6897 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Izbor mjerodavnih protoka u zoni neposrednog međusobnog utjecaja velikih voda rijeka Save i rijeka Drine ovisi o stupnju njihove koincidencije:

Za sektor rijeka Save uzvodno od ušća rijeka Drine, a u zoni međusobnog utjecaja Save i Drine, mjerodavni nivo je anvelopa maksimalnih nivoa koja se dobiva proračunima linije nivoa vodnog lica, a na temelju protoka sljedećih kombinacija varijabli:

- stogodišnji maksimalni protok rijeka Save nizvodno od ušća rijeka Drine, što u konkretnom slučaju iznosi $Q_{max,1\%}^{SM} = 6897 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, i odgovarajući protok rijeka Save uzvodno od ušća, za istu stogodišnju vjerojatnost prekoračenja (koincidencije), s grafa ($Q_{cor2}^Z; Q_{max}^{SM}$) koji iznosi $Q_{cor2}^Z = 3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, i
- odgovarajući protok rijeka Save nizvodno od ušća rijeka Drine i maksimalni godišnji protok rijeka Save uzvodno od ušća $Q_{max,1\%}^Z = 4838 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, za stogodišnju vjerojatnost koincidencije s grafa ($Q_{max}^Z; Q_{cor1}^{SM}$), što u konkretnom slučaju iznosi $Q_{cor1}^{SM} = 2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

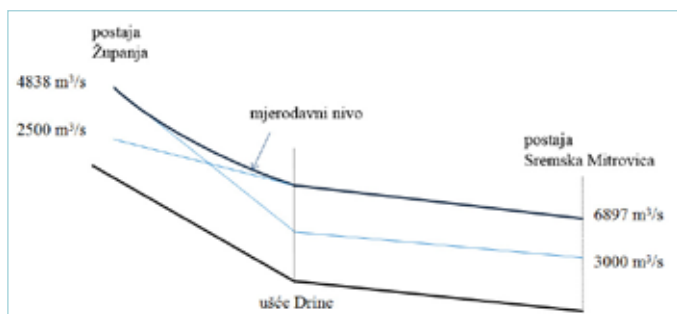
Na rijeci Savi uzvodno od zone međusobnog utjecaja velikih voda Save i Drine, mjerodavni nivo se računa sa stogodišnjim maksimalnim protokom rijeka Save u profilu postaje Županja, tj. $Q_{max,1\%}^Z = 4838 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Shematski prikaz usvojenih mjerodavnih protoka za proračun stogodišnjeg nivoa vodnog lica na cijelom sektoru rijeka Save od postaje Sremska Mitrovica do postaje Županja, dan je na slici 5.

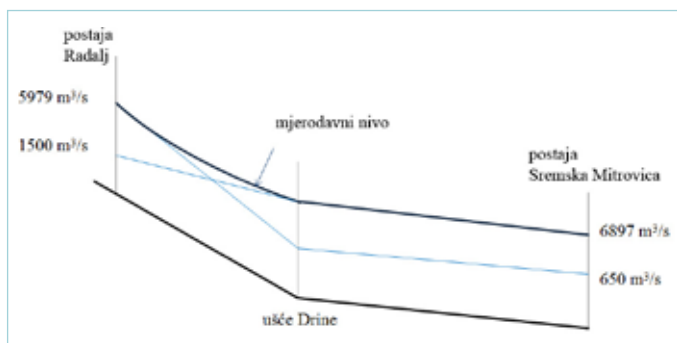
Za sektor rijeka Drine uzvodno od ušća u rijeku Savu, a u zoni međusobnog utjecaja Save i Drine, mjerodavni nivo je anvelopa maksimalnih nivoa koja se dobiva proračunima linije nivoa vodnog lica, a na osnovu protoka sljedećih kombinacija varijabli:

- stogodišnji maksimalni protok rijeka Save nizvodno od ušća rijeka Drine, što u konkretnom slučaju iznosi $Q_{max,1\%}^{SM} = 6897 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, i odgovarajući protok rijeka Drine uzvodno od ušća, za istu stogodišnju vjerojatnost prekoračenja (koincidencije), sa grafa ($Q_{cor1}^R; Q_{max}^{SM}$) koji iznosi $Q_{cor1}^R = 650 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, i
- odgovarajući protok rijeka Save nizvodno od ušća rijeka Drine i maksimalni godišnji protok rijeka Drine uzvodno od ušća, za stogodišnju vjerojatnost koincidencije sa grafa ($Q_{max}^R; Q_{cor2}^{SM}$), što u konkretnom slučaju iznose $Q_{max,1\%}^R = 5979 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ i $Q_{cor2}^{SM} = 1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Na rijeci Drini i uzvodno od zone međusobnog utjecaja velikih voda Save i Drine, mjerodavni nivo se računa



Slika 5: Prikaz mjerodavnih maksimalnih protoka za proračun stogodišnjeg nivoa vodnog lica duž rijeka Save na promatranom sektoru



Slika 6: Prikaz mjerodavnih maksimalnih protoka za proračun stogodišnjeg nivoa vodnog lica duž rijeka Save do ušća Drine i uz Drinu do profila postaje Radalj na promatranom sektoru

sa stogodišnjim maksimalnim protokom rijeke Drine u profilu postaje Radalj, tj. $Q_{\max,1\%}^D = 5979 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Shematski prikaz usvojenih mjerodavnih protoka za proračun stogodišnjeg nivoa vodnog lica na cijelom sektoru rijeke Save od postaje Sremska Mitrovica do ušća rijeke Drine i uz Drinu do postaje Radalj, dan je na [slici 6](#).

3.3 Proračun mjerodavnih protoka velikih voda na hidrološki nedovoljno izučenom profilu glavnog toka

Za primjenu izložene procedure proračuna koincidencije velikih voda radi definiranja mjerodavnih (projektiranih) nivoa na hidrološki nedovoljno izučenom profilu izvršeno je s pretpostavkom da na promatranom sektoru rijeke Save i Drine postoje samo dvije ulazne vodomjerne postaje Županja i Radalj, dok na nizvodnoj dionici, poslije ušća rijeke Drine, ne postoje mjereni podatci. Podatci s „nepostojeće“ vodomjerne postaje Sremska Mitrovica koriste se samo za provjeru rezultata proračuna.

U ovim uvjetima koriste se rezultati proračuna koincidencije samo za one konstelacije varijabli koje se odnose na vodomjerne postaje Županja i Radalj. U konkretnom slučaju to su koincidencije:

- maksimalni godišnji protok rijeke Save u profilu postaje Županja – odgovarajući protok rijeke Drine u profilu postaje Radalj – $(Q_{\max}^Z; Q_{\text{cor}1}^R)$ i
- maksimalni godišnji protok rijeke Drine u profilu postaje Radalj – odgovarajući protok rijeke Save u profilu postaje Županja – $(Q_{\max}^R; Q_{\text{cor}2}^Z)$.

Proračun računskih vrijednosti mjerodavnih maksimalnih protoka rijeke Save u profilu „nepostojeće“ postaje Sremska Mitrovica, za vjerojatnosti pojave $p = 0.1, 1.0$ i 5.0% , prikazan je u [tablici 4](#).

Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da je prikazana metodologija proračuna koincidencije velikih voda na glavnoj rijeci i pritoci vrlo pogodna i za definiranje teorijskih vrijednosti maksimalnih protoka određenih vjerojatnosti pojave na nizvodnom sektoru glavne rijeke od ušća pritoke, ako su poznate serije srednjih dnevnih i maksimalnih godišnjih protoka na oba ulazna profila na promatranom uzvodnom sektoru. U niže navedenom primjeru proračuna maksimalnih godišnjih protoka rijeke Save u profilu postaje Sremska Mitrovica ([tablica 4, slika 4 h](#)) je pretpostavljeno da postoje samo navedeni podatci na uzvodnom sektoru i to u profilu postaje Županja na rijeci Savi i u profilu postaje Radalj na rijeci Drini. Računske vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka rijeke Save kod Sremske Mitrovice dobivene pomoću definiranih zavisnosti koincidencije se vrlo dobro slažu s rezultatima klasične probabilističke analize čiji su rezultati prikazani u [tablici 1](#). Razlike između računskih vrijednosti preko koincidencije i statističke analize su minimalne i greške se kreću u rasponu od -8.0% (za pedesetogodišnju vodu) do $+0.5 \%$ (za tisućugodišnju vodu).

Analogni rezultati za slučaj proračuna maksimalnih godišnjih protoka Save u profilu postaje Županja (pretpostavka je da podatci na postaji Županja ne postoje), a na osnovu poznatih odgovarajućih zavisnosti koincidencija velikih voda Save kod postaje Sremska Mitrovica i Drine kod postaje Radalj prikazani su u [tablici 5, slika 4 i](#).

Tablica 4: Proračun računskih vrijednosti protoka rijeke Save u profilu „nepostojeće“ postaje Sremska Mitrovica za različite vjerojatnosti pojave

Konstelacija	Varijabla	5%			1%			0.1%		
		Točke		Σ	Točke		Σ	Točke		Σ
		1	2		1	2		1	2	
$(Q_{\max}^Z; Q_{\text{cor}1}^R)$	Q_{\max}^Z	4100	2850		4900	3100		5750	3400	
	$Q_{\text{cor}1}^R$	850	2300	10100	950	3700	12650	1700	5500	16350
$(Q_{\max}^R; Q_{\text{cor}2}^Z)$	Q_{\max}^R	1600	4200		1600	6000		1500	8000	
	$Q_{\text{cor}2}^Z$	3900	1800		5200	1900		6500	2300	
	Σ	5500	6000	11500	6800	7900	14700	8000	10300	18300
	$\Sigma\Sigma$			21600			27350			34650
	$\Sigma\Sigma/4$			5400			6838			8663
Sremska Mitrovica	$Q_{\max,p}^{Rač}$			5400			6838			8663
	$Q_{\max,p}^{Osm}$			5800			6897			8448
	$\Delta Q_{\max,p}(\%)$			-6.9			-0.9			+2.5

Tablica 5: Proračun računskih vrijednosti protoka rijeke Save u profilu „nepostojeće“ postaje Županja za različite vjerojatnosti pojave

Konstelacija	Varijable	5%			1%			0.1%		
		Točke		Σ	Točke		Σ	Točke		Σ
		1	2		1	2		1	2	
$(Q_{max}^{SM}; Q_{cor1}^R)$	Q_{max}^{SM}	5500	3700	9200	6700	4000	10700	8100	5000	13100
	Q_{cor1}^R	850	1900	2750	900	2700	3600	1400	3900	5300
	(-)			6450			7100			7800
$(Q_{max}^R; Q_{cor2}^{SM})$	Q_{max}^R	1400	3950	5350	1200	5300	6500	1500	7800	9300
	Q_{cor2}^{SM}	4800	2000	6800	6000	2300	8300	8200	3000	11200
	(-)			1550			1800			1900
	Σ(-)			8000			8900			9700
	Σ(-)/2			4000			4450			4850
Županja	$Q_{max,p}^{Rač}$			4000			4450			4850
	$Q_{max,p}^{Op}$			4080			4838			5910
	$\Delta Q_{max,p}(\%)$			-2.0			-8.0			-17.9

Dobiveni rezultati pokazuju znatno veće greške pri ocjeni maksimalnih protoka rijeke Save u profilu postaje Županja, pogotovo kod rijetkih vjerojatnosti pojave, što je svakako posljedica utjecaja značajne transformacije vrhova poplavnih valova koje se događaju na promatranom sektoru Save i Drine, od ulaznih profila Županje i Radlja, do izlaznog profila Sremska Mitrovica.

3.4 Korištenje rezultata proračuna koincidencije velikih voda za ocjenu statističke značajnosti povijesnih poplava

U okviru ovog projekta interesantno je proanalizirati povratne periode koincidencije prekoračenja registrirane poplave iz svibnja 2014. godine, kao i usvojene mjerodavne konstelacije maksimalnih godišnjih protoka rijeke Drine i rijeke Save nizvodno od ušća Drine za potrebe projektiranja nasipa na lijevoj obali rijeke Drine.

U cilju ocjene statističke značajnosti poplave iz svibnja 2014. godine, u odgovarajuće grafove izračunatih koincidencija velikih voda su unijete empirijske točke koje odgovaraju pojavi iz svibnja 2014. godine. Detaljnijom analizom zaključeno je da koincidencije, odnosno vjerojatnosti prekoračenja promatrane konstelacije maksimalnih godišnjih i odgovarajućih protoka iz svibnja 2014. godine na rijeci Savi i Drini imaju izuzetno male vjerojatnosti pojave. To se, prije svega, odnosi na konstelaciju maksimalnih protoka registriranih na vodomjernim postajama Županja i Radalj, čija je vjerojatnost prekoračenja (slika 4 a):

$$P\{(Q_{max}^{\check{Z}} \geq 5539) \cap (Q_{max}^R \geq 3950)\} = 0.0005,$$

odnosno ima povratni period:

$$T = \frac{1}{P} = \frac{1}{0.0005} = 2000 \text{ godina.}$$

Vjerojatnost prekoračenja konstelacije maksimalnog godišnjeg protoka Save kod Županje i odgovarajućeg protoka Drine kod postaje Radalj iznosi (slika 4 b):

$$P\{(Q_{max}^{\check{Z}} \geq 5539) \cap (Q_{cor1}^R \geq 1710)\} = 0.001,$$

odnosno ima povratni period:

$$T = \frac{1}{P} = \frac{1}{0.001} = 1000 \text{ godina.}$$

Vjerojatnost prekoračenja konstelacije maksimalnog godišnjeg protoka rijeke Drine na postaji Radalj i odgovarajućeg protoka rijeke Save na postaji Županja je znatno veća i iznosi (slika 4 c):

$$P\{(Q_{cor2}^{\check{Z}} \geq 2960) \cap (Q_{max}^R \geq 3950)\} = 0.017,$$

odnosno ima povratni period od:

$$T = \frac{1}{P} = \frac{1}{0.017} \cong 60 \text{ godina.}$$

Prema tome, poplava iz svibnja 2014. godine je jedna izuzetna pojava koja, sa stajališta rijeke Save uzvodno od ušća Drine, odgovara povratnom periodu pojave jednom u 1000 godina, što nikako ne znači da se u bliskoj budućnosti neće pojaviti slična njoj, pogotovo ako se ostvare prognoze da će, u uvjetima klimatskih promjena, ekstemne pojave biti učestalije. Vjerojatnost konstelacije maksimalni protok Drine i odgovarajući protok Save kod Županje tijekom svibanjske poplave 2014. godine je reda veličine povratnog perioda od 60 godina, što se ne može svrstati u kategoriju izuzetno rijetkih pojava.

4 ZAKLJUČCI

Dobiveni rezultati izvršenih analiza koincidencije imaju višestruki značaj. Prvo, u široj zoni ušća služe za ocjenu statističke značajnosti koincidencije različitih parametara hidrograma velikih voda i poplave u cjelini, kako na glavnom toku, tako i na njegovim glavnim pritokama. Praktični značaj ovih rezultata je u tome da se u slučaju odsustva koincidencije može ići, u cjelini, na niži nivo zaštite priobalja u zoni međusobnog utjecaja glavne rijeke i pritoke u odnosu na klasičnu jednodimenzionalnu proceduru dimenzioniranja objekata, a da se osigura isti stupanj zaštite sa stajališta rizika od poplave. Predložena metodologija proračuna koincidencije omogućuje dobivanje mjerodavnih kvantitativnih pokazatelja optimalnih kombinacija promatranih slučajnih varijabli sa stajališta ekonomičnosti i sigurnosti objekata. Rezultati tih proračuna mogu se koristiti za definiranje mjerodavnih (projektnih) nivoa na ušćima, gdje ne postoje potrebni (odgovarajući) podatci na jednoj od ulazno-izlaznih vodomjernih postaja.

Razrađena metodologija proračuna koincidencije velikih voda na glavnom toku i pritoci pogodna je i za definiranje mjerodavnih maksimalnih protoka u slučaju da na nekom od ulazno-izlaznih profila ne postoje odgovarajući podatci. Sprovedeni proračuni za slučaj nedostatka podataka na profilima postaje Sremska Mitrovica i postaje Županja ukazuju da su greške koje se dobivaju tim proračunima u dozvoljenim granicama.

Pored toga, navedena se procedura može koristiti i za povećanje ukupne propusne moći kod ravničarskih rijeka, gdje se često događa da se cjelokupno područje mora istovremeno braniti od dva bliska vodotoka. Klasična nezavisna rješenja zaštite od poplava od oba vodotoka obično su skupa i često tehnički neizvediva, s obzirom da se radi o ograničenom prostoru, a po pravilu se traži visok stupanj zaštite (urbano područje).

Opisana metodologija omogućuje da se rješenje zaštite od poplava na oba vodotoka promatra integralno, vodeći računa o koincidenciji njihovih velikih voda. Osnovna pretpostavka ovakvog rješenja je da se između dva vodotoka izgradi tzv. „rasteretni kanal“ (jedan ili više, sa ili bez ustava i drugih hidrotehničkih objekata). Svrha rasteretnog kanala je da se u slučaju odsustva koincidencije poplavnih valova na oba vodotoka dio velikih voda jednog vodotoka uputi ka drugom vodotoku, ovisno o propusnoj moći korita drugog vodotoka. U slučaju poplave na drugom vodotoku, rasteretni kanal ima suprotnu ulogu po istom principu.

Sa stajališta ocjene statističke značajnosti poplave u cjelini, prikazana metodologija služi za ocjenu značajnosti različitih hidrograma velikih voda, kako povijesnih, tako i budućih poplava na istom profilu rijeke. U konkretnom slučaju izvršena je ocjena statističke značajnosti registrirane poplave iz svibnja 2014. godine. Zaključeno je da je vjerojatnost koincidencije protoka Save na Županji i Drine na Radlju, za slučaj istovremene pojave maksimalnih protoka kao iz promatranog događaja, povratnog perioda od 2000 godina. Za konkretne datume nailaska vrha poplavnog vala na jednoj rijeci i odgovarajućeg protoka na drugoj, povratni periodi su nešto niži i to 1000 godina u slučaju nailaska vrha poplavnog vala Save kod Županje (17.05.2014. g.) i 60 godina u slučaju nailaska vrha poplavnog vala Drine kod Radlja (15.05.2014. g.).

ZAHVALA

Prikazani rezultati i analize su predmet istraživanja znanstvenog projekta „Ocjena utjecaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ (TR-37005) za period 2011.–2015. godine“ Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Autori se zahvaljuju ministarstvu na pruženoj finansijskoj 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.
- Prohaska, S.; Marjanović, N.; Čabrić, M. (1978.): *Dvoparametarsko definiranje velikih voda*, Vode Vojvodine, Novi Sad.
- Prohaska, S. (1983.): *Koincidencija velikih voda donje Save sa velikim vodama Dunava i Drine*, Vode Vojvodine, Novi Sad.
- Prohaska S.; Isailović D.; Srna P., Marčetić I. (1999.): *The Danube and its Basin – A Hydrological Monograph Follow-up volume IV*, Coincidence of Flood Flow of the Danube River and its Tributaries, Regional Cooperation of the Danube Countries in the Frame of the International Hydrological Programme of UNESCO, pp 1-187, Water Research Institute Bratislava, Slovakia.

- Prohaska S. (2006.) *Hidrologija II deo*, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Rudarsko-geološki fakultet i RHMZ Srbije, Beograd.
- Prohaska S.; Ilić A. (2008.): *Coincidence of the Probability of Flood Waves*, International Conference „Planning and Management of Water Resources Systems“, Organized to celebrate the 50th anniversary of the scientific and educational work, and the 75th birthday of Prof. dr Miloradov Milorad, 25-27 September 2008, Novi Sad, pp. 171-183.
- Prohaska S.; Ilić A.; Majkić B. (2008.): *Multiple-coincidence of flood waves on the main river and its tributaries*, IOP Electronic Journal, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 4 (2008) 012013, rad na 8 str., 2008. doi: 10.1088/1755-1307/4/1/012013
- Prohaska S.; Ilić A.; Majkić B.; Orlić A.; Stanić Ž. (2009.): *Postupak za definiranje višedimenzionalnih*

- vjerojatnosti pojave poplava na složenim riječnim sustavima, Monografija «Upravljanje vodnim resursima Srbije '09», Institut za vodoprivredu «Jaroslav Černi», Beograd, ISBN 978-86-82565-24-6, str. 215-232.
- Prohaska S.; Ilic A. (2010.): *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, p. 175-226. DOI: 10.1007/978-90-481-3423-6_6
- Prohaska S.; Ilić A.; Bartoš Divac, V. (2010.): *Tehničko rješenje: Nova metoda za definisanje višestruke koincidencije poplavnih talasa na složenim rečnim sistemima*. Baza privredne komore Beograda.
- Yevjevich, V. (1972.): *Probability and Statistics in Hydrology*; Water Resources Publications, Fort Collins, Colo. U.S.A.
- Yevjevich, V. (1972.): *Stochastic Processes in Hydrology*; Water Resources Publications, Fort Collins, Colo. U.S.A.

COINCIDENCE OF FLOOD WAVES IN THE SAVA AND DRINA RIVERS

Abstract. The paper presents a theoretical basis for defining the coincidence of flood waves in the zone of significant interaction between the mainstem and its tributary. It shows the mathematical bases and procedures for defining the lines of same probabilities of occurrence and the lines of probabilities of exceedance for two random variables. In the case of a complex river system, limited by two inlet profiles (on the mainstem and its tributary) and one outlet profile (on the mainstem), without a significant influence of inflow from the inter-catchment, the relevant constellations (combinations) of maximum annual discharges and their corresponding (synchronous) discharge values on other inlet/outlet profiles were determined. The following practical uses of the defined dependences of flood wave coincidences were determined:

- Definition of design discharges for economically optimal calculation of water table lines in the zone of interaction between the mainstem and its tributary;
- Definition of design floods of different probabilities of occurrence on the mainstem section downstream of the tributary mouth, if only the discharges on two inlet profiles (on the mainstem and its tributary) are known;
- Assessment of the statistical significance of historical and forecast floods.

The application results of this procedure of the calculation of flood coincidences are presented for the section of the Sava River from the gauging station Županja to the gauging station Sremska Mitrovica, with the inclusion of the Lower Drina River from the gauging station Radalj to its confluence with the Sava River. The calculation results mentioned under points a), b) and c) for these Sava and Drina sections are used for numerical and graphic illustration of the paper.

Keywords: flood coincidence, same probability of occurrence, exceedance probability, statistical significance of floods

GLEICHZEITIGES AUFTRETEN VON SAVE- UND DRINA-HOCHWASSER

Zusammenfassung. Im Beitrag wird die theoretische Grundlage zur Bestimmung des gleichzeitigen Auftretens (Koinzidenz) von Hochwässern auf dem Gebiet der Wechselwirkungen zwischen Hauptfluss und Nebenfluss dargestellt. Die mathematischen Grundlagen und die Verfahren zur Bestimmung von Linien gleicher Wahrscheinlichkeiten des Ereignisses sowie von Linien der Wahrscheinlichkeiten der Überschreitung zweier zufälliger Variablen werden auch dargestellt. Für den Fall eines komplexen Flusssystemes, das durch zwei Einlaufprofile (an Hauptfluss und Nebenfluss) und ein Auslaufprofil (am Hauptfluss) begrenzt ist, ohne signifikante Wirkung des Zuflusses vom Zwischeneinzugsgebiet, werden relevante Konstellationen (Kombinationen) von maximalen Jahresdurchflüssen und entsprechenden (synchronen) Durchflusswerten an anderen Einlauf-/Auslaufprofilen bestimmt. Die bestimmten Abhängigkeiten der Koinzidenz von Hochwässern können praktisch angewendet werden wie folgt:

- Bestimmung von Durchflüssen, die maßgebend für die wirtschaftlich optimale Berechnung der Niveaulinien des Wasserspiegels auf dem Gebiet der Wechselwirkungen zwischen Hauptfluss und Nebenfluss sind,
- Bestimmung von maßgebenden Hochwässern mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit des Ereignisses im Bereich des Hauptflusses, flussabwärts von der Mündung des Nebenflusses, wenn nur die Durchflüsse an zwei Einlaufprofilen (an Hauptfluss und Nebenfluss) bekannt sind,
- Beurteilung der statistischen Signifikanz der vergangenen und prognostizierten Überschwemmungen.

Die Ergebnisse der Anwendung dieses Verfahrens zur Berechnung der Koinzidenz von Hochwässern werden für den Bereich des Flusses Save von der Messstation Županja bis Messstation Sremska Mitrovica einschließlich des Unterlaufs der Drina von Messstation Radalj bis Mündung in die Save dargestellt. Die Berechnungen unter a), b) und c) für den genannten Bereich der Flüsse Save und Drina sind auch numerisch und graphisch dargestellt.

Schlüsselwörter. Koinzidenz von Hochwässern, Linien gleicher Wahrscheinlichkeiten des Ereignisses, Wahrscheinlichkeiten der Überschreitung, statistische Signifikanz der Überschwemmung