

HIDRAULIČKA ANALIZA ZAŠTITE OD POPLAVA PRIOBALJA DUNAVA I SAVE NA PODRUČJU BEOGRADA

Miodrag JOVANOVIĆ, Marko IVETIĆ, Nikola ROSIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu
Zoran GREGOROVIĆ
Hidrozaovod DTD, Novi Sad

REZIME

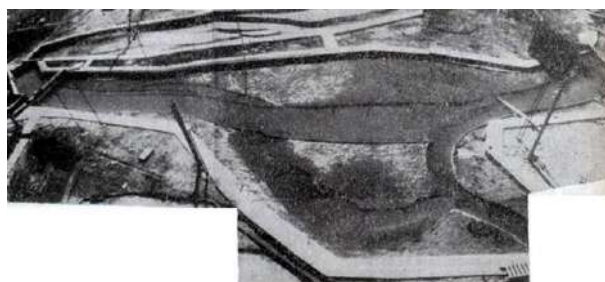
U ovom radu su prikazani rezultati najnovijih hidrauličkih proračuna koji su obavljani sa ciljem da se preispita postojeći sistem zaštite od velikih voda beogradskog priobalja. Koristeći ažurirane hidrološke ulazne podatke, sračunate su najviše kote nivoa Dunava i Save pri raznim kombinacijama njihovih ekstremno velikih protoka. Na osnovu dobijenih rezultata, definisan je novi kriterijum za zaštitu od poplava na širem području Beograda.

Ključne reči: velike vode, hidraulički proračun, Dunav i Sava kod Beograda

1. UVOD

Navršilo se 54 godine od objavljivanja kapitalnog dela Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ - monografije pod naslovom: „Dunav i Sava kod Beograda – hidrotehnički problemi i hidraulička proučavanja“ [17], u kojoj je postavljen koncept vodoprivrednog uređenja beogradskog hidročvora. U okviru ove studije rešavani su složeni problemi hidrologije i hidraulike ušća, rečne morfologije, hidrauličkog transporta i dr. U izradi su učestovali najeminentniji naučnici i profesori tog vremena - Mladen Boreli, Bata Geza, Stevan Bruk, Ivo Vušković i dr. Akademik Miladin Pećinar napisao je izuzetno nadahnut predgovor ovoj monografiji, čiji su autori za svoj rad zasluženo dobili najviše tadašnje priznanje – Oktobarsku nagradu grada Beograda. Rezultati njihovog rada se danas čine još impresivnijim ako se imaju u vidu skromne računski mogućnosti tog vremena i saznanje da su se hidrauličke analize skoro isključivo zasnivale na fizičkim modelima (Slika 1), koji iziskuju značajna finansijska sredstva i dugotrajna merenja.

Četrdeset godina kasnije (2005-2008), Dunav i Sava kod Beograda su bili ponovo predmet obimnih



Slika 1. Fizički model ušća Save u Dunav izgrađen početkom šezdesetih godina prošlog veka u Hidrauličkoj laboratoriji Instituta „Jaroslav Černi“ (razmera za dužine 1:250, razmera za visine 1:40, stepen distorzije 6,25) [17].

hidrauličkih istraživanja, ovoga puta isključivo pomoću savremenih matematičkih – računskih modela [5, 9]. Složena strujanja na spoju dve velike reke numerički su simulirana pomoću linijskih (1D), ravanskih (2D) i prostornih (3D) modela, uz njihovu kalibraciju pomoću savremene, tada prvi put kod nas primenjene, ADCP tehnologije. Istovremeno je urađeno i nekoliko hidrauličkih studija na rešavanju lokalnih problema (Makiš [10, 25], Čukarički zaliv [6, 7, 8, 13, 14, 15, 26]).

Katastrofalne poplave iz maja 2014. godine inicirale su preispitivanje stepena zaštite postojećih objekata za odbranu od poplava na široj teritoriji Beograda. Na osnovu ažuriranih hidroloških podataka, izrađena je hidrološka studija velikih voda Dunava i Save, sa definisanjem verovatnoće koicidencije ekstremno velikih protoka ovih reka [11]. Zatim je u okviru odgovarajuće hidrauličke analize definisan prostorni raspored ekstremnih kota nivoa, da bi se: (i) izvršila provera objekata postojećeg odbrambenog sistema i (ii) predložile kote zaštite na lokacijama gde je, prema aktuelnim hidrološkim podacima, postojeći sistem nedovoljan. Na osnovu dobijenih rezultata, definisani su

novi kriterijumi zaštite i dato je idejno rešenje rekonstrukcije postojećih nasipa i dogradnje odbrambene linije sistemom mobilne zaštite [11]. Ovaj članak prikazuje rezultate hidrauličkih analiza na kojima je zasnovan predlog novog kriterijuma za zaštitu od poplava priobalja Dunava i Save na području Beograda.

2. RAČUNSKI MODEL

Imajući u vidu veličinu računске oblasti i raspoložive podloge, odlučeno je da se hidraulički proračuni obave pomoću modela linijskog (1D) tečenja. Izabran je programski paket HEC-RAS [21], koji se standardno koristi u našoj praksi. Svi proračuni su obavljani pod pretpostavkom ustaljenog režima tečenja.

2.1. Diskretizacija računске oblasti i metoda proračuna

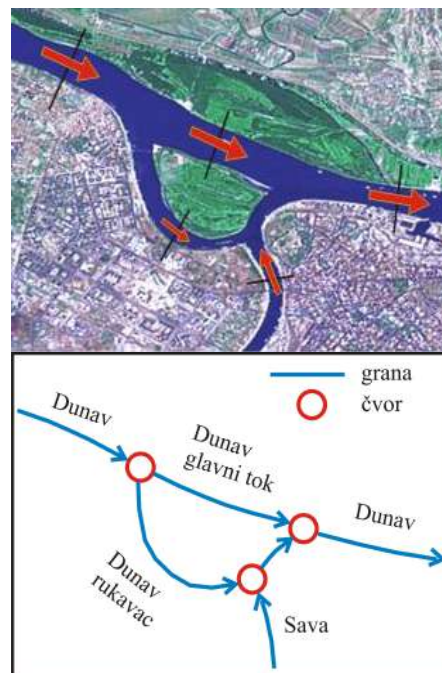
Linijsko (1D) tečenje podrazumeva da je dužina toka dominantna u odnosu na njegovu širinu i dubinu, tako da se hidrauličko stanje u koritu pri nekom protoku može definisati kotom nivoa u računskom poprečnom profilu i odgovarajućom srednjom profilskom brzinom. Proračun se odvija od profila do profila, u uzvodnom smeru kada je tečenje mirno, što je uvek slučaj kod velikih reka kao što su Dunav i Sava.

Kada se modelira sistem od više vodotoka, računska mreža linijskog modela može biti granata ili prstenasta. Na primer, Dunav se račva na glavni tok i rukavac, da bi se nizvodno, rukavac spojio sa rekam Savom, a na kraju, vode rukavca i Save spojile sa glavnim tokom Dunava (Slika 2). Na Savi takođe postoji račvanje toka u zoni Ade Medice (Čukarički rukavac je pregrađen i više nije aktivan). Prstenaste računске mreže se rasčlanjuju na *grane* (računskie deonice) i *čvorove*. Grane se diskretizuju nizom poprečnih profila. U uzvodnim i nizvodnim graničnim profilima računске oblasti zadaju se *spoljašnji granični uslovi* – protoci u uzvodnim profilima, a kote nivoa, u nizvodnim. U računskim čvorovima mreže se menja protok i koriste se tzv. *unutrašnji granični uslovi* [1, 12, 16, 21].

Modeliranje čvorova i unutrašnji granični uslovi. Za matematičko modeliranje čvorova koriste se: zakon održanja mase („jednačina kontinuiteta“):

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0 \quad (1)$$

gde je N broj grana koje se susreću u jednom čvoru, i zakon održanja energije („Bernulijeva jednačina“):



Slika 2. Primer prstenaste mreže u linijskom modelu.

$$Z_u + \frac{V_u^2}{2g} = Z_n + \frac{V_n^2}{2g} + \Delta E_{u \rightarrow n} \quad (2)$$

gde su Z i V - kota nivoa i srednja brzina u poprečnom preseku, a $\Delta E_{u \rightarrow n}$ gubitak energije između preseka uzvodno od čvora (u) i preseka nizvodno od njega (n). Za svaki čvor se ispisuje $N-1$ Bernulijeva jednačina.

Modeliranje grana i spoljašnji granični uslovi.

Ustaljeno tečenje duž grana mreže modelira se takođe Bernulijevim jednačinama tipa (2), pri čemu se za svaku granu ispisuje N_p-1 jednačina, gde je N_p - broj poprečnih preseka (računskih profila) duž razmatrane grane. U uslovima ustaljenog, mirnog tečenja, zadaje se jedan granični uslov u vidu kote nivoa (u ovom slučaju Dunava) na nizvodnom kraju računске oblasti. U uzvodnim graničnim profilima računске oblasti (u ovom slučaju Dunava i Save), granični uslovi su protoci.

Računski postupak. Hidraulički proračun ustaljenog tečenja u prstenastim mrežama je iterativan. Postupak će se objasniti na primeru tečenja Dunava oko Velikog Ratnog Ostrva (Slika 2).

(1) Sa poznatim zbirnim protokom Dunava i Save, kao i odgovarajućom kotom nivoa na nizvodnoj granici računске oblasti, računa se linija nivoa uzvodno, do ušća Save.

(2) Oduzimanjem protoka Save od protoka Dunava, dobija se protok Dunava uzvodno od ušća Save. Na uzvodnom kraju Velikog Ratnog Ostrva pretpostavi se podela protoka Dunava, po glavnom koritu i po rukavcu - Dunavcu. Sabiranjem protoka Dunavca i Save, dobija se protok u Savi uzvodno od njenog ušća.

(3) Na ušću Save u Dunav, raspolaže se sa 3 veličine: (i) kotom nivoa u Dunavu; (ii) dotokom Dunava sa uzvodne deonice i (iii) dotokom Save. Postavljanjem i rešavanjem dve Bernulijeve jednačine, dobijaju se kote nivoa u Dunavu i Savi, neposredno uzvodno od ušća Save u Dunav.

(4) Računaju se linije nivoa u: (i) Savi, od ušća, uzvodno do spoja sa Dunavcem; (ii) Dunavcu, od spoja sa Savom do kraja Velikog Ratnog Ostrva (profil „Lido“); (iii) Dunavu, po glavnom toku, od ušća Save, uzvodno do profila „Lido“.

(5) U čvoru „Lido“ raspolaže se sa 4 veličine: (i) pretpostavljenim protokom Dunava po glavnom koritu; (ii) pretpostavljenim protokom u Dunavcu; (iii) kotom nivoa u glavnom koritu Dunava i (iv) kotom nivoa na uzvodnom kraju Dunavca. Postavljaju se dve Bernulijeve jednačine koje vezuju računajuće grane

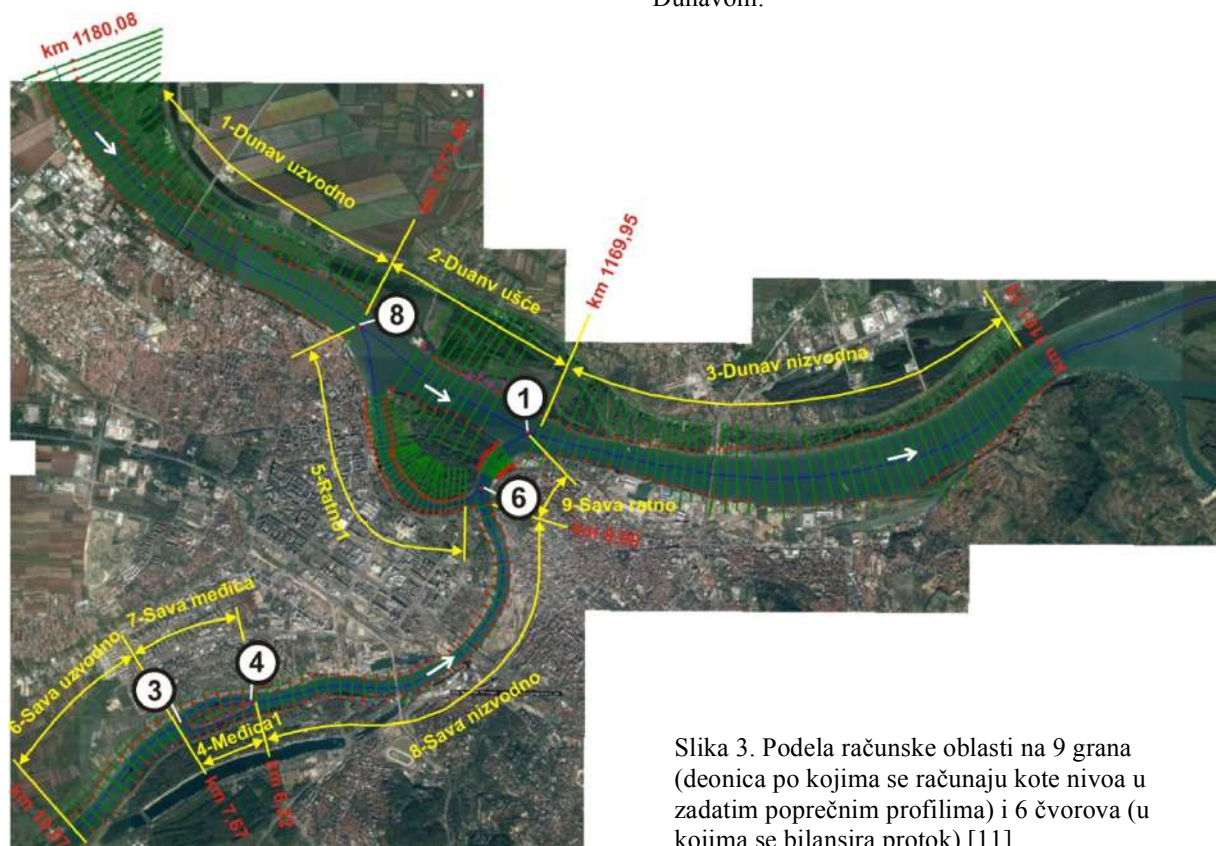
Dunava sa njegovom uzvodnom deonicom kod Zemuna. Ukoliko je je pretpostavljena podela protoka u čvoru „Lido“ tačna, obe Bernulijeve jednačine daće istu kotu energije na nizvodnom kraju deonice kod Zemuna. U protivnom, mora se pretpostaviti nova podela protoka Dunava oko Velikog Ratnog Ostrva i ponoviti proračun, sve dok razlika prethodne i novo-sračunate kote energije ne postane prihvatljivo mala.

(6) Na kraju se računa linija nivoa od čvora „Lido“ do uzvodne granice računске oblasti.

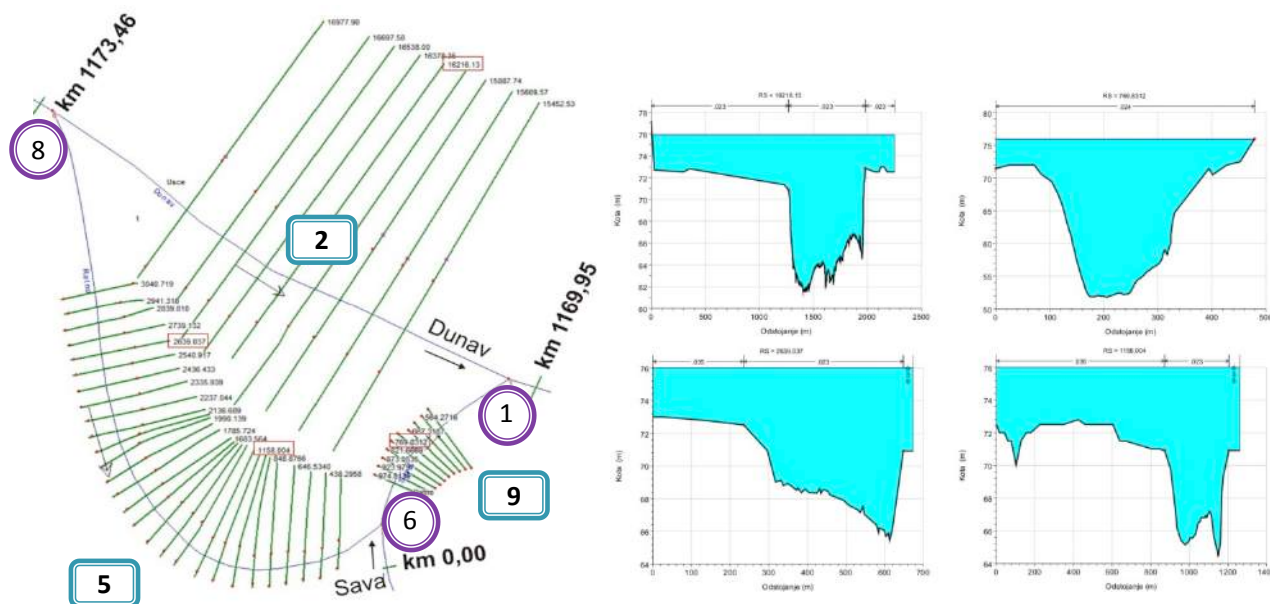
Opisani iterativni računski postupak je u pogledu podele protoka potpuno automatizovan u programskom paketu HEC-RAS [21].

2.2 Dekompozicija beogradskog hidročvora

Na Slici 3 prikazan je računski domen sa ukupno 9 grana (računskih deonica) i 5 čvorova u kojima menja protok. Obuhvaćen je potez Dunava dužine oko 19 km (uzvodno od „Pupinovog mosta“ u Zemunu do profila „Bela stena“ nizvodno od Višnjice) i oko 10 km na Savi (od vodozahvata na Adi Ciganliji do ušća Dunavca), kao i 0,46 km Save od ušća Dunavca do spoja sa Dunavom.



Slika 3. Podela računске oblasti na 9 grana (deonica po kojima se računaju kote nivoa u zadatim poprečnim profilima) i 6 čvorova (u kojima se bilansira protok) [11].



Slika 4. Detalj računске mreže: levo: grane 2, 5 i 9 sa računskim prilifima koji obuhvataju inundacije, kao i pripadajući čvorovi 1, 6 i 8; desno: izgled osnovnog korita u izabranim poprečnim profilima [11].

2.3. Granični uslovi

Imajući u vidu da su Dunav i Sava veliki aluvijalni vodotoci sa mirnim režimom tečenja, u računskom modelu se, kao što je već rečeno, zadaju dva tipa graničnih uslova: na uzvodnom kraju razmatrane oblasti – protoci, a na njenom nizvodnom kraju – kota nivoa. Shodno tome, na ulazu deonice 1 – “Dunav uzvodno” i deonice 6 – “Sava uzvodno” (Slika 3), zadati su protoci na osnovu statističke analize verovatnoće koincidencije protoka Dunava i Save. Na nizvodnom kraju deonice 3 – “Dunav nizvodna”, tj. na nizvodnom kraju računске oblasti (Slika 3), zadata je kota nivoa koja odgovara zbiru izabranih protoka Dunava i Save. (Konkretne vrednosti graničnih uslova biće date u nastavku, u Tabelama 1 i 2).

Na ovom mestu je uputno objasniti izbor nizvodnog graničnog profila. Ovaj profil, koji se nalazi na računskoj stacionaži Dunava km 1161,15 (Slika 5), oko 6,6 km uzvodno od hidrološke stanice (HS) “Pančevo” (km 1154,54).

Kako je za profil hidrološke stanice poznata zavisnost kote nivoa od povratnog perioda, odnosno verovatnoće prevazilaženja (Slika 6), normalno bi bilo da se u hidrauličkim proračunima ta zavisnost koristi kao nizvodni granični uslov. Međutim, profil HS “Pančevo” nije hidraulički pogodan, zbog korita u krivini i račvanja toka

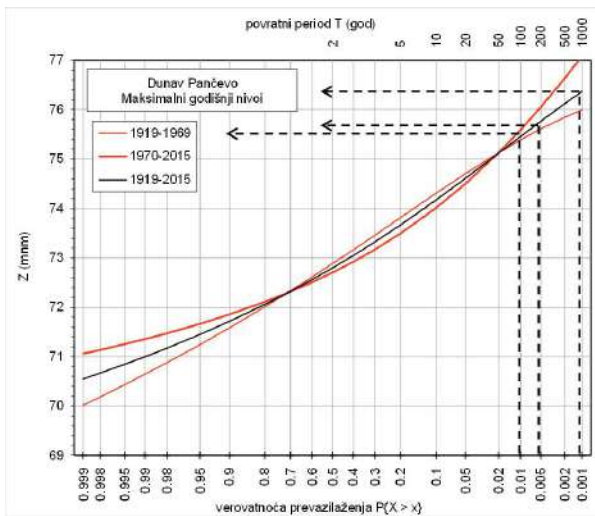
(Slika 5). Zbog toga je nizvodni granični profil “pomeren” uzvodno, na km 1161,15, gde je korito jedinstveno i pravolinijsko. To je u izvornoj meri komplikovalo definisanje nizvodnog graničnog uslova, kao što pokazuje postupak opisan u nastavku.



Slika 5. Položaj nizvodnog graničnog profila u odnosu na hidrološku stanicu “Pančevo”.

(1) Pretpostavlja se da usvojenoj kombinaciji protoka Dunava i Save sa određenom verovatnoćom koincidencije odgovara kota nivoa u Pančevu sa istom verovatnoćom. (Izvesno je da verovatnoće protoka i nivoa nisu saglasne, ali usvojena pretpostavka daje rezultate koji su na strani sigurnosti.)

U konkretnom slučaju, povezane su verovatnoće koincidencije velikih voda Dunava i Save $P=1\%$, $0,5\%$ i $0,1\%$ (povratni periodi $T=100$, 200 i 1000 godina) sa odgovarajućim verovatnoćama prevazilaženja maksimalnih godišnjih nivoa u profilu „Pačevo“ (Slika 6).



Slika 6. Verovatnoće prevazilaženja maksimalnih godišnjih kota nivoa u profilu "Pančevo" [11].

(2) Pretpostavljajući da je kota nivoa u nizvodnom graničnom računskom profilu ista kao u profilu "Pančevo", računa se linija nivoa za datu kombinaciju protoka Dunava i Save.

(3) Računa se uzdužni nagib nivoa i denivelacija na deonici dužine 6,6 km, između nizvodnog graničnog profila (km 1161,15) i profila „Pančevo“ (km 1154,54).

(4) Dodavanjem sračunate denivelacije na kotu nivoa u profilu "Pančevo", očitane sa dijagrama na Slici 6, dobija se kota nivoa (Z_n), koja predstavlja nizvodni granični uslov u računskom modelu. Rezultati opisanog postupka dati su u Tabeli 1.

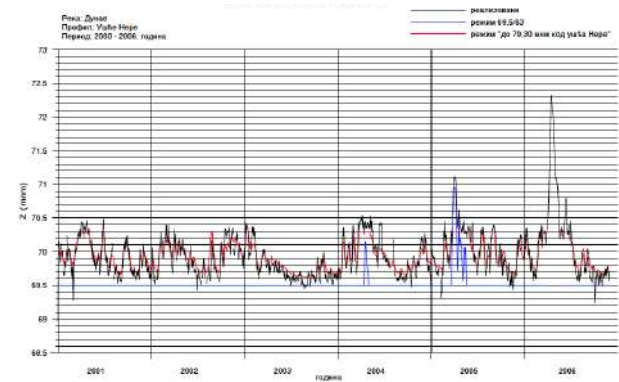
Tabela 1. Nizvodni granični uslovi [11].

| P | 1% | 0.5% | 0,1% |
|------------|-------|-------|-------|
| Z_n (mm) | 75,71 | 76,01 | 76,63 |

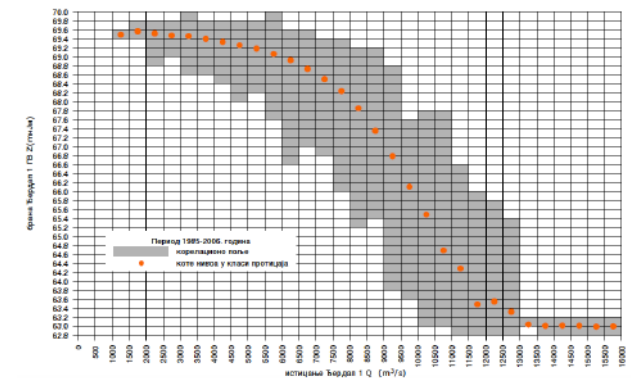
Uticaj rada HE "Đerdap 1". Osnovna premisa je da će pri nailasku velikih poplava HE Đerdap 1 "oboriti" nivo na brani do kote 63,00 mm, tako da u profilu HS "Pančevo" bude uspostavljen prirodni režim nivoa. (Režim rada sistema Đerdap 1 i Đerdap 2 u cilju obezbeđenja stabilnosti obala i zaštite priobalja od poplava definisan je Pravilnikom o organizaciji i radu dispečerske službe [18] i sadržan je u odgovarajućoj tehničkoj dokumentaciji [2, 3].)

Trenutno je na snazi režim 70,30 mm kod ušća Nere, kojim se dispečerske službe HE Đerdap i FE Portile de Fier obavezuju na postepeno snižavanje nivoa vode uzvodno od brane Đerdap 1, sa kote 69,00 mm pri protocima većim od 8400 m³/s, do kote 63,00 mm za protok $Q_1 \approx 11500$ m³/s.

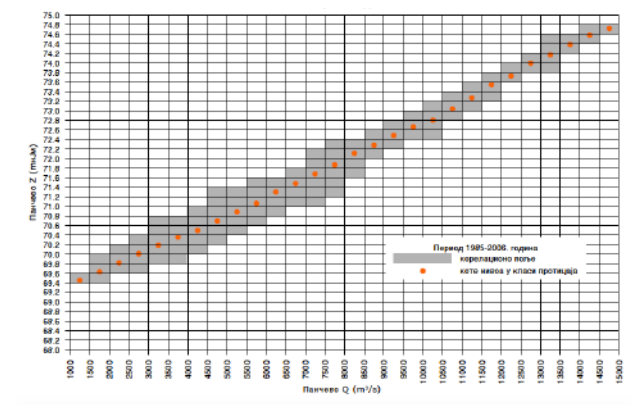
Pri dotoku Q_1 , kota nivoa na brani treba da bude 63,00 mm, a na ušću Nere, 70,30 mm. Za protoke veće od Q_1 na ušću Nere se održava prirodni režim. Na osnovu analiza koje je radio Institut Jaroslav Černi [3], taj uslov je poštovan u periodu, od 1985. do 2006. godine. (Slike 7-9).



Slika 7. Nivogrami na ušću Nere u periodu 2001-2006 [3].



Slika 8. Kote nivoa gornje vode na brani Đerdap 1 u zavisnosti od protoka u periodu 1985-2006 [3].



Slika 9. Osmotrena kriva protoka u profilu HS "Pančevo" u periodu 1985-2006 [3].

Može se primetiti da zavisnost na Slici 9 ima specifičan oblik zbog uticaja uspora za protoke manje od oko 10000 m³/s. Najniži deo osmotrene krive protoka na HS „Pančevo“ ima linearan (a ne, kao što je uobičajeno, krivolinijski) oblik. Tek u rasponu protoka 12000-15000 m³/s, uočava se početak blage zakrivljenosti, pri čemu razlici protoka od 3000 m³/s odgovara razlika nivoa od oko 1,2 m. Procena je da i u narednom rasponu protoka od 3000 m³/s (od 15000 - 18000 m³/s) porast kote nivoa može iznositi takođe oko 1,2 m. To znači da pri protoku Dunava od 18000 m³/s, kota nivoa u profilu HS „Pančevo“ može biti oko 76,00 mnm. Ova ekstrapolacija podataka o režimu rada HE Đerdap 1 i njegovom uticaju na nivoe kod Pančeva, veoma su bitni za definisanje i proveru usvojenog nizvodnog graničnog uslova u računskom modelu.

2.4 Kalibracija računskog modela

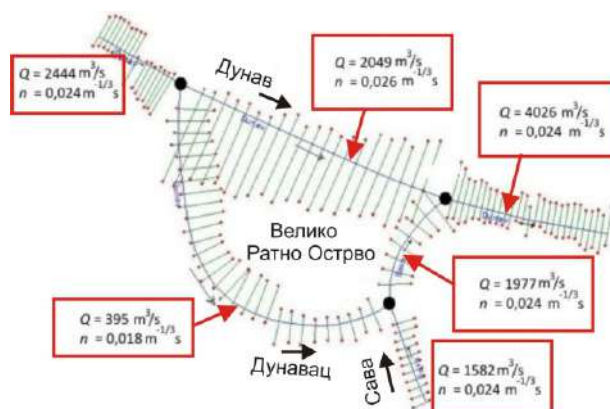
Hidraulički otpori obuhvataju se u proračunu kroz gubitak energije koji je srazmeran vrednosti nekog empirijskog koeficijenta. U našoj praksi se standardno koristi Manningov koeficijent otpora [1, 16, 21, 22]. U linijskom (1D) modelu, Manningov koeficijent (n) je globalni parametar koji obuhvata sve linijske i lokalne gubitke energije na datoj deonici. Vrednost ovog parametra zavisi od karakteristika rečnog korita (geometrije i apsolutne rapavosti), kao i od protoka, odnosno dubine toka.

Kalibracija računskog modela podrazumeva da se vrednost Manningovog koeficijenta odredi probanjem, dok se ne usklade računski nivoi sa nivoima snimljenim na terenu. U slučaju prstenaste mreže vodotoka, postupak kalibracije linijskog modela je iterativan i podrazumeva dva iteraciona ciklusa – „unutrašnji“ i „spoljašnji“.

Unutrašnji interacioni ciklus se odnosi na određivanje rasporeda protoka po granama računске mreže, na način koji je ranije opisan, za *pretpostavljeni* raspored vrednosti koeficijenta n po računskim deonicama.

Spoljašnji interacioni ciklus se odnosi na optimizaciju rasporeda koeficijenta n po računskoj oblasti, dok se ne ispuni uslov da sračunati protoci odgovaraju izmerenim protocima, a sračunate kote nivoa registrovanim kotama.

U periodu 2004-2007 obavljene su 3 serije terenskih merenja na Dunavu i Savi pomoću ADCP tehnologije [5]. U toku merenja registrovani su i podaci o vodostajima na HS „Zemun“ na Dunavu i HS „Beograd“ na Savi. Na Slici 10 prikazan je rezultat kalibracije modela na osnovu jednog od obavljenih merenja.



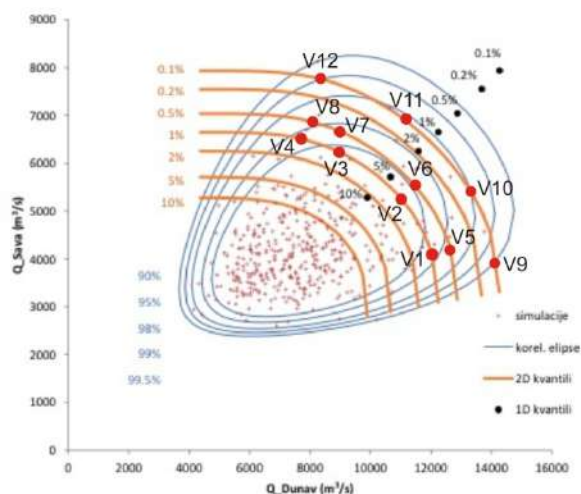
Slika 10. Raspored vrednosti koeficijenta n pri hidrološko-hidrauličkim uslovima na dan merenja 28.12.2004. god. [5].

Zapaženo je da su pri malim i srednjim vodama, vrednosti koeficijenta rapavosti u Dunavskom rukavcu značajno manje od onih u glavnom koritu Dunava, a da u periodu velikih voda, te vrednosti teže da budu izjednačene, jer porastom dotoka, propusne moći dve rečne grane teže da se izjednače.

3. REZLTATI PRORAČUNA

Računske varijante su definisane za verovatnoće koincidencije velikih voda Dunava i Save $P=1\%$, $0,5\%$ i $0,1\%$, odnosno za povratne periode $T=100$, 200 i 1000 godina. Sa dijagrama dvodimenzione raspodele koincidencije *maksimalnih godišnjih protoka* Dunava i Save [11], izabrano je za svaku verovatnoću 4 kombinacije protoka, što daje ukupno 12 računskih varijanti (Slika 11). Konkretno vrednosti date su u Tabeli 4.

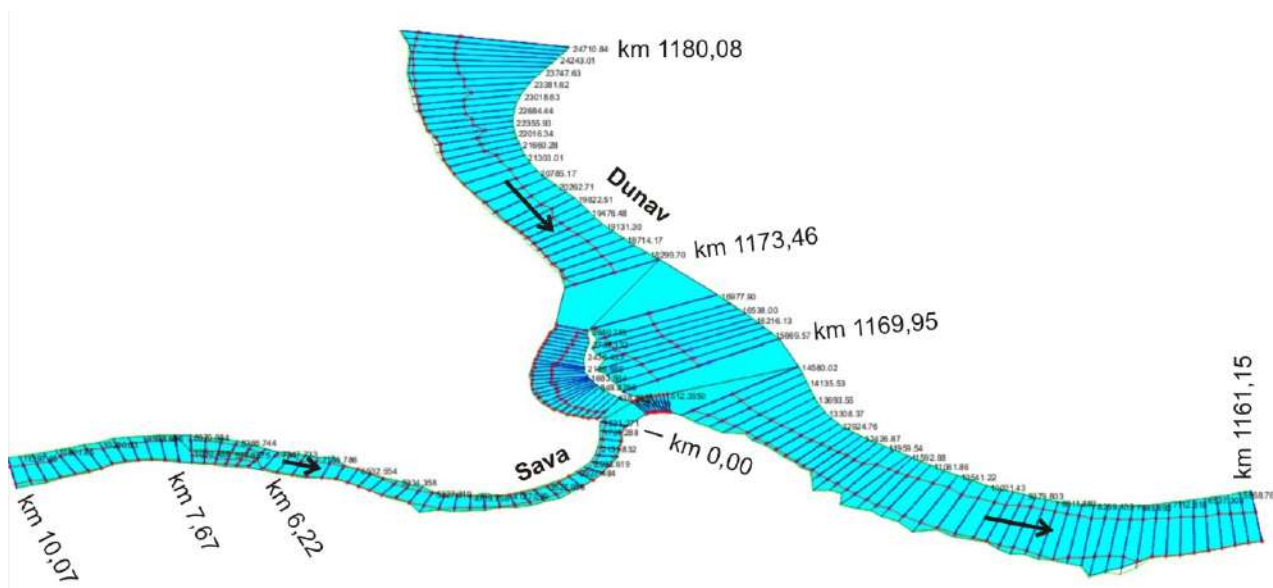
Treba naglasiti da su navedene teorijske verovatnoće koincidencije računane na osnovu maksimalnih godišnjih protoka - vršnih protoka najvećih poplavnih talasa registrovanih u višegodišnjem periodu. Ove godišnje koincidencije predstavljaju šansu da se određeni protoci Dunava i Save jave u jednoj (bilo kojoj) godini, ali ne nužno u istom trenutku! Računska pretpostavka da se radi o *istovremenoj* koincidenciji izabranih protoka na Dunavu i Savi uzma u obzir najnepovoljniji slučaj, da bi stepen zaštite od velikih voda bio što više na strani sigurnosti.



Slika 11. Izabrane kombinacije protoka Dunava i Save za 12 računskih varijanti: V1, V2, ..., V12 [11].

Glavni rezultati proračuna su uzdužni profili nivoa, dobijeni na osnovu sračunatog rasporeda protoka. Ilustracije radi, na Slici 12 je dat prikaz nivoa vode pri jednoj ekstremnoj kombinaciji protoka Dunava i Save. Na Slici 13 su dati uzdužni profili nivoa Dunava, Dunavca i Save za sve računске varijante. Može se konstatovati da za jednu verovatnoću koincidencije razne kombinacije protoka Dunava i Save daju potpuno različite linije nivoa. Za dati povratni period, na svakoj deonici je merodavna linija nivoa sa najvećim kotama. Maksimalne kote nivoa u računskoj oblasti, koje se javljaju u najuzvodnijim profilima Dunava i Save, navedene su u Tabeli 3.

Rezultati hidrauličkih proračuna daju osnovu ne samo za donošenje globalne odluke u pogledu stepena zaštite na području beogradskog hidročvora, već i za konkretizaciju mera zaštite na pojedinim sektorima, uzimajući u obzir lokalne uslove na terenu i troškove nadogradnje postojećih nasipa i nabavke mobilne opreme.



Slika 12. Aksometrijski prikaz nivoa vode pri jednoj ekstremno retkoj koincidenciji protoka Dunava i Save (V10: $P=0,1\%$, $T=1000$ god.); može se uočiti značajno plavljenje i inundacija duž leve obale Dunava, kao i Velikog Ratnog Ostrva [11].

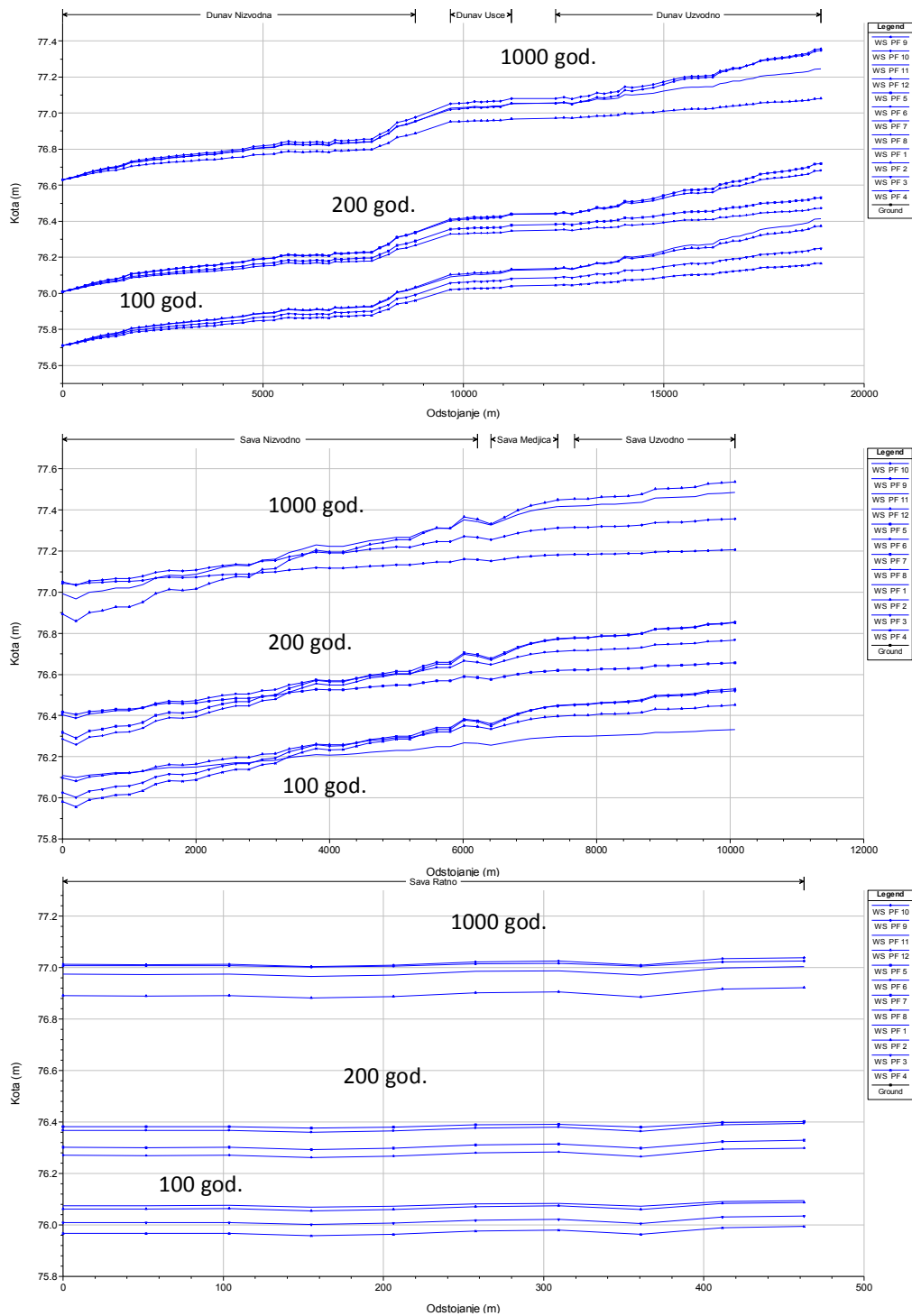
Tabela 2. Varijante proračuna sa graničnim uslovima [11].

(P – verovatnoća koincidencije protoka Dunava i Save; T – povratni period;
 Z_{niz} – kota nivoa nizvodnog graničnog uslova; V1-V12 – računске varijante;
 stacionaža profila je data na Slici 3)

| Pačunska deonica | Stacionaža | P=1%, T=100 год. $Z_{niz}=75,71$ mm | | | | | | P=0,5%; T=200 год. $Z_{niz}=76,01$ mm | | | | | | P=0,1%; T=1000 год. $Z_{niz}=76,63$ mm | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| | | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 |
| 1 Dunav uzvodno | km 1180,08 | 12000 | 11000 | 9000 | 7800 | 12500 | 11500 | 9000 | 8100 | 14200 | 13300 | 11200 | 8300 | | | | | | | | | | | | |
| 6 Sava uzvodno | km 10,07 | 4150 | 5250 | 6200 | 6500 | 4450 | 5500 | 6650 | 6850 | 3900 | 5400 | 6850 | 7800 | | | | | | | | | | | | |
| 3 Dunav nizvodna | km 1161,15 | 16150 | 16250 | 15200 | 14300 | 16950 | 17000 | 15650 | 14950 | 18100 | 18700 | 16100 | | | | | | | | | | | | | |

Tabela 3. Maksimalne kote nivoa [11].

| Povratni period | Dunav (km 1180,08) | | | Sava (km 10,07) | | |
|-----------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| | Opseg vrednosti (V1-V12) | Visinska razlika (m) | Aps. maks. kota (mm) | Opseg vrednosti (V1-V12) | Visinska razlika (m) | Aps. maks. kota (mm) |
| 100 | 76,17-76,41 | 0,24 | 76,41 | 76,33-76,53 | 0,20 | 76,53 |
| 200 | 76,47-76,72 | 0,25 | 76,72 | 76,66-76,85 | 0,19 | 76,85 |
| 1000 | 77,08-77,36 | 0,28 | 77,36 | 77,21-77,54 | 0,33 | 77,54 |



Slika 13. Uzdužni profili nivoa za 12 razmatranih varijanti koincidencije protoka V1-V12 (PF1-PF12); odozgo na dole: Dunav, km 1161,15 – km 1180,08; Sava uzvodno od ušća Dunavca, km 0,00 – km 10,07; Sava nizvodno od ušća Dunavca [11].

4. UTICAJ TALASA USLED VETRA

Analiza talasa usled vetra zasniva se na statističkoj obradi mernih podataka o intenzitetu, pravcu, smeru i trajanju vetra, prikupljenih na meteorološkim stanicama. Za projektovanje obaloutvrda obično je merodavan vetar povratnog perioda 25 godina (dozvoljava se i analiza vetrova ređe pojave – povratnih perioda 50, pa čak i 100 godina).

Visina talasa izazvanih vetrom zavisi od: brzine vetra (V_a), njegovog trajanja (T_a), dužine zaleta – „feča“ (F_a) i srednje dubine vode duž feča (h). Dužina zaleta, ili „feč“, predstavlja najduže pravolinijsko odstojanje duž vodene površine u pravcu merodavnog vetra, do obaloutvrde u kojoj se razmatra uticaj talasa. Teorija talasnog kretanja usled vetra je vaoma razrađena za velike vodene zapremine (mora i jezera) i iz te oblasti u literaturi postoji mnoštvo izvora. Kada su u pitanju reke, teorijska podloga je skromnija i uglavnom se nude empirijski obrasci, u čemu prednjači ruska literatura. U ovoj analizi je korišćen obrazac Zairova i dr. [19], zbog toga što uzima u obzir specifičnosti rečnih tokova i što je, upravo iz tog razloga, uvršćen u ruske tehničke standarde (SNIP, 1983).

Za užu teritoriju Beograda postoje podaci o izmerenoj trenutnoj brzini vetra (sa odgovarajućim pravcem i smerom), za meteorološke stanice „Beograd“ i „Surčin“. Na prvoj stanici, brzine vetra, zabeležene u 7h, 14h i 21h, čine bazu podataka koja se odnosi na period 1936-2014. Na drugoj stanici, podaci se odnose na period 1966-1997. Obe baze podataka su korišćene za analizu sezonske varijacije vetrova na severu Srbije [20].

Za dejstvo talasa usled vetra na konstrukciju, jedan od bitnih faktora je trajanje vetra (T_a). Računska brzina vetra V_a je *osrednjena* u vremenskom intervalu T_a . U praksi se usvaja *projektno* trajanje vetra. Kod nas je u konstrukterskom inženjerstvu merodavno projektno trajanje vetra od 10 min. Kod akumulacija je uobičajeno da se visina talasa računa sa srednjom brzinom vetra trajanja 1 sat. (Može se očekivati da brzine vetra budu veće za trajanja manja od jednog sata, a manje za duža trajanja.)

U regulaciji reka nema opšteg pravila za projektno trajanje vetra. Podaci o brzinama vetra izmerenim na stanicama „Beograd“ i „Surčin“ nisu dovoljno reprezentativni, jer se odnose na srednje dnevne vrednosti, a nema podatka o trajanju vetra određenog intenziteta, pravca i smera. Zato je analizu talasa usled vetra jedino bilo moguće sprovesti na osnovu maksimalnih vrednosti srednje dnevne brzine vetra (Tabela 4). Najveći broj registrovanih vrednosti je ispod 10 m/s (36 km/h).

Tabela 4. Maksimalne dnevne brzine vetra [20].

| Meteorol. stanica | Brzina vetra | | Datum |
|-------------------|--------------|--------|-------------------------|
| | (m/s) | (km/h) | |
| „Beograd“ | 16,7 | 60 | 14.12.1944, 22.11.1950. |
| | 17,9 | 64 | 29.01.1951. |
| | 19,1 | 68 | 14.11.1941. |
| „Surčin“ | 16,7 | 60 | 18.02.1967. |
| | 17,9 | 64 | 04.03.1970. |
| | 19,1 | 68 | 04.11.1966. |

Imajući u vidu navedene podatke, sračunate su visine talasa H za dve pretpostavljene dužine feča F_a : 1 i 2 km, nezavisno od pravca i smera duvanja vetra. Vrednosti visine talasa, kao tzv. „značajne visine talasa“ $H_s=1,6 H$, koje se u literaturi preporučuju za ocenu izdizanja nivoa vode uz konstrukciju, date su u Tabeli 5.

Tabela 5. Računske visine talasa [11].

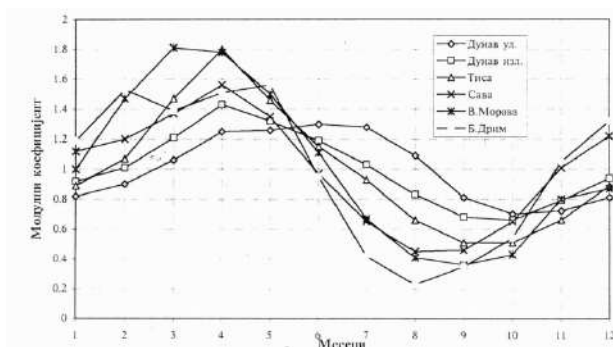
| V_a (m/s) | $F_a = 1$ km | | $F_a = 2$ km | |
|----------------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| | H (m) | H_s (m) | H (m) | H_s (m) |
| 10,0 | 0,17 | 0,27 | 0,23 | 0,37 |
| 16,7 | 0,30 | 0,47 | 0,41 | 0,65 |
| 17,9 | 0,32 | 0,51 | 0,44 | 0,70 |
| 19,1 | 0,34 | 0,55 | 0,47 | 0,75 |

Rezultati ovog proračuna su uzeti u obzir pri određivanju potrebnih kota krune linijskog sistema zaštite od poplava na teritoriji beogradskog hidročvora.

5. UTICAJ LEDA

Režim leda na Dunavu i Savi kod Beograda je tema koja zaslužuje posebnu studiju. Analiza ledenih pojava na ovim rekama ovoga puta nije razmatrana, jer se došlo do zaključka da uticaj leda ne utiče na reviziju stepena zaštite postojećeg odbrambenog sistema. Razlog za ovakav stav proizilazi iz sledećih činjenica:

(a) Pojava ekstremno velikih poplavnih talasa na Dunavu i Savi se po pravilu ne poklapa sa pojavom leda. Povodnji na Dunavu se javljaju krajem proleća i tokom leta, u periodu april-jul, kao što pokazuje dijagram na Slici 14. Na istom dijagramu se može zapaziti da su u zimskim mesecima srednji mesečni protoci na Dunavu niži (ili najviše jednaki) srednjem godišnjem protoku. Na Savi se najveći protoci javljaju krajem marta ili početkom aprila. Na ovoj reci je moguća pojava viših vodostaja i u zimskom periodu (novembar-decembar), ali se led na Savi retko kad opaža kod Beograda, jer je termički režim ovog vodotoka bitno izmenjen ispuštanjem tople vode iz TE „N. Tesla A“ i „N. Tesla B“.



Slika 14. Sezonski raspored povodnja naših velikih reka, izražen pomoću modularnog koeficijenta – odnosa srednjeg mesečnog i srednjeg godišnjeg protoka u višegodišnjem periodu osmatranja [23].

(2) Drugi razlog izostavljanja leda iz razmatranja je činjenica da su brzine toka u periodima prolaska velikih poplavnih talasa na obe reke relativno velike (> 1 m/s), što sprečava formiranje nevezanog leda želatinaste konzistencije, koji bi, potpuno prožimajući vodenu masu, izazvao usporavanje oticaja i pojavu ledenih poplava.

6. KRITERIJUMI ZAŠTITE

6.1 Važeći kriterijum

Prema važećim kriterijumima, kote zaštite duž desne obale Dunava i duž obala Save kod Beograda definisane su u odnosu na referentnu kotu na ušću Save u Dunav, 76,00 mnm pri 100-god. velikoj vodi na obe reke. Ovoj koti se dodaje rezervna visina, usvojena iskustveno, na osnovu inženjerske procene [4]:

- za nasipe na Dunavu: 1,5-1,7 m;
- za nasipe na Savi: 1,2-1,5 m;
- za kejske zidove: 0,5-1,5 m (0,8-1,2 m).

U novije vreme, navedeni kriterijum je upotpunjen zahtevom da se objektima, na području Beograda, mora obezbediti stepen zaštite od 1000-god. velike vode [4]. U definisanju navedenih zaštitnih kota razmatran je i uticaj uspora HE Đerdap 1, u režimu rada "69,5 mnm i više". Konstatovano je da je kod Beograda nivo malih voda povećan za oko 2 m i da ne postoji tendencija daljeg povećanja [3]. Nasipi na Dunavu duž đerdapske akumulacije dimenzionišu se na veliku vodu povratnog perioda 100 godina, sa rezervnom visinom koja obezbeđuje zaštitu od velikih voda povratnih perioda 500-1000 godina.

Za regulacione radove na teritoriji Beograda, definisane su 3 regulacione linije: (1) za malu vodu trajanja 290 dana/god – niveleta spoljne ivice krune nožice obaloutvrda: 70,5 mnm; (2) za vodu trajanja 20 dana/god – niveleta prve bankine obaloutvrda: 73,5 mnm; (3) za velike vode koje plave priobalje – niveleta krune nasipa: 76,8-77,5 mnm. Tamo gde nema mogućnosti izrade nasipa, zaštitni zid treba da ima krunu na koti 77,0 mnm.

6.2 Predloženi kriterijum

Na osnovu novih hidrološko-hidrauličkih proračuna i analiza, predložen je sledeći kriterijum zaštite od velikih voda Dunava i Save na teritoriji Beograda [11]:

Nasipi (bez zidova) - veća od dve merodavne računске kote:

$$\max \{ Z_{100} + 1,2 \text{ m}; Z_{1000} + 0,1 \text{ m} \};$$

Kejovi. veća od dve merodavne računске kote:

$$\max \{ Z_{100} + 0,8 \text{ m}; Z_{1000} + 0,1 \text{ m} \},$$

gde je: Z_{100} – kota nivoa velike vode povratnog perioda 100 godina, a Z_{1000} – kota nivoa velike vode vode povratnog perioda 1000 godina.

Navednim kriterijumom obezbeđena je i zaštita od velike vode povratnog perioda 200 godina.

Može se primetiti da predložene rezervne visine od 1,2, odnosno 0,8 m u odnosu na kotu Z_{100} ne odstupaju mnogo od sada važećih rezervnih visina. Međutim, ovoga puta su predložene vrednosti rezervnih visina proizašle iz analize talasa usled vetra na Dunavu i Savi. Kao što se vidi iz Tabele 5, pri nepovoljnijim uslovima, potrebne zaštitne visine usled talasa iznose 0,55-0,75 m.

Zaštita od velike vode povratnog perioda 1000 godina može se obezbediti na većini lokacija jedino mobilnom opremom. Smatra se da je u ovom slučaju rezervna visina od svega 0,1 m dovoljna. Ovo je zasnovano na proceni da je uslovna verovatnoća pojave ekstremnih nivoa vode i vetrova velikog intenziteta veoma mala. Čak i da se ovako retki događaji poklope, prelivanje mobilnih zidova bi bilo sasvim lokalnog karaktera i ne bi moglo ozbiljnije ugroziti priobalje.

Na kraju, treba naglasiti da je novim predlogom kriterijuma zaštite od velikih voda, stepen zaštite priobalja Dunava i Save kod Beograda realno povećan u odnosu na sadašnje stanje. Noveliranjem hidroloških podataka koji se odnose na maksimalne godišnje protoke Dunava i Save, definisanjem verovatnoće njihove koincidencije kod Beograda i analizom verovatnoće ekstremnih kota nivoa kod Pančeva, u hidraulički proračun su uneti trenutno najverodostojniji ulazni podaci. S tim podacima, rezultat proračuna pokazuje da pri 100-godišnjoj koincidenciji velikih voda Dunava i Save, na ušću kota nivoa iznosi 76,11 mnm, što je iznad do sada merodavne kote 76,00 mnm. Razlika od ovih desetak cm uvodi dodatnu sigurnost u predloženi kriterijum zaštite i donekle smanjuje uticaj neizvesnosti koje neminovno prate sve hidrološko-hidrauličke analize. Ako se tome doda i činjenica da je izbor rezervnih visina objektiviziran na osnovu procene visine talasa, može se sa pravom smatrati da je predloženi kriterijum zaštite pouzdan u meri u kojoj je to uopšte moguće.

7. ZAKLJUČCI

- (1) Rezultati sprovedene hidrauličke analize režima ekstremno velikih voda Dunava i Save kod Beograda, predstavljaju neophodnu osnovu za revidovanje stepena zaštite postojećeg sistema za odbranu od poplava i donošenje konkretnih odluka o njegovoj dogradnji i unapređenju.
- (2) Procena najviših kota nivoa, nije moguća bez određivanja verovatnoće koincidencije velikih voda Dunava i Save. U ovom slučaju obuhvaćene su verovatnoće koincidencije od 1% (100-god.), 0,5% (200-god.) i 0,1% (1000-god.), dobijene statističkom analizom maksimalnih godišnjih protoka u periodu 1919-2015. Za svaku verovatnoću, razmatrane su 4 karakteristične kombinacije protoka Dunava i Save, koje obuhvataju i slučajeve „velikog Dunava“ i „male Save“ i obrnuto. Razmatrano je ukupno 12 varijanti.

- (3) Rezultati proračuna pokazuju da na razmatranom području, pri koincidenciji maksimalnih godišnjih protoka verovatnoće 1%, kote nivoa na Dunavu ne prelaze 76,41 mnm, a na Savi, 76,53 mnm.
- (4) Pri koincidenciji verovatnoće protoka 0,5%, kote nivoa na Dunavu ne prelaze 76,72 mnm, a na Savi, 76,85 mnm.
- (5) Pri koincidenciji verovatnoće protoka 0,1%, kote nivoa na Dunavu ne prelaze 77,36 (77,11) mnm, a na Savi, 77,54 mnm.
- (6) Na osnovu najvećih brzina vetra, registrovanih na meteorološkim stanicama „Beograd“ i „Surčin“ u periodima 1936-2014, odnosno 1966-1997, mogu se, pri dužinama zaleta 1-2 km, bez obzira na pravac i smer duvanja vetra, očekivati maksimalne visine talasa od 0,34 - 0,47 m. Odgovarajuće visine izdizanja uz obalu su reda veličine 0,55 - 0,75 m.
- (7) Pojava leda nema uticaja na noveliranje stepena zaštite postojećeg odbrambenog sistema.
- (8) Kriterijum zaštite od poplava na široj teritoriji Beograda može se definisati većom od dve merodavne kote: $\max\{Z_{100}+1,2 \text{ m}; Z_{1000}+0,1 \text{ m}\}$ za nasipe, odnosno: $\max\{Z_{100}+0,8 \text{ m}; Z_{1000}+0,1 \text{ m}\}$ za kejove, gde je: Z_{100} – kota nivoa velike vode povratnog perioda 100 godina, a Z_{1000} – kota nivoa velike vode vode povratnog perioda 1000 godina.

LITERATURA

- [1] Cunge, J.A., Holly, F.M., Verwey, A., Practical Aspects of Computational Hydraulics, Pitman, London, 1980.
- [2] Elaborat "Proračun uspornih nivoa vode u akumulaciji HE Đerdap", Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, 2002.
- [3] Elaborat „Proračun uspornih nivoa vode u akumulaciji HE "Đerdap 1" u režimu definisanom u prilogu 1 Konvencije o eksploataciji i održavanju HE "Đerdap 1" i HE "Đerdap 2", Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, 2007.
- [4] Generalni urbanistički plan Beograda, Sužbeni list grada Beograda, br. LX, 11, 2016.
- [5] Grupa autora, „Hidrauličko-morfološka studija Dunava na ušću Save“, Građevinski fakultet Beograd, 2014.

- [6] Grupa autora, „Hidraulička studija Čukaričkog zaliva i njegovog spoja sa rekom Savom“, Građevinski fakultet Beograd, 2005.
- [7] Grupa autora, „Studija uticaja ispuštanja materijala izbagerovanog iz Čukaričkog zaliva u korito reke Save na ulazu u Čukarički zaliv u Beogradu“, Građevinski fakultet Beograd, 2006.
- [8] Grupa autora, „Studija uticaja mosta na donjem špicu Ade Ciganlije na stujno polje i morfologiju korita reke Save na ulazu u Čukarički zaliv u Beogradu“, Građevinski fakultet Beograd, 2006.
- [9] Grupa autora, „Hidraulička analiza strujanja u kanalu „Galijaš“ na Velikom Ratnom Ostrvu“, Građevinski fakultet Beograd, 2007.
- [10] Grupa autora, „Hidraulička studija funkcionisanja vodozahvata „Makiš“, Građevinski fakultet Beograd, 2007.
- [11] Grupa autora, „Obaloutvrde reke Dunav i reke Save na širem području ušća Save u Dunav“, Hidrološko-hidraulička studija, Hidrozavod DTD i Građevinski fakultet Beograd, 2017.
- [12] Jansen, P. Ph., et al., Principles of river engineering - the non-tidal alluvial river, Pitman, 1979.
- [13] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B., Numerička simulacija koncentrisanog ispuštanja izbagerovanog nanosa u maticu reke, Vodoprivreda, Vol. 39, br. 1-3, 2007.
- [14] Jovanović, M., Kapor, R., Zindović, B., Hidraulička analiza zasipanja zaliva, 16. Savetovanje Srpskog društva za hidraulička istraživanja (SDHI), Donji Milanovac, 2012.
- [15] Jovanović, M., Kapor, R., Zindović, B., Analiza nekih uticaja na životnu sredinu izgradnje mosta na Adi, Vodoprivreda, 0350-0519, 44(2012) 255-257, 2012.
- [16] Jovanović, M., Regulacija reka - rečna hidraulika i morfologija, Građevinski fakultet, Beograd, 2008.
- [17] Monografija „Dunav i Sava kod Beograda – hidrotehnički problemi i hidraulička proučavanja“, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, 1963.
- [18] Pravilnik o organizaciji i radu Zajedničke dispečerske službe za energetiku HE Đerdap 1 i FE Portile de Fier, 1998.
- [19] Przednjojski, B., Blazejenski, R., Pilarczyk, K.NJ., River Training Techniques - Fundamentals, Design and Applications, Balkema, Rotterdam, 1995.
- [20] Tošić, I., et al „Seasonal prevailing surface winds in Northern Serbia“, Theoretical and Applied Climatology, 10.1007/s00704-017-2044-6, Feb., 2017.
- [21] U.S.Army Corps of Engineers, HEC-RAS - River Analysis System, Hydraulic reference manual, V. 4.1.0, 2010.
- [22] Ven Te Chow, "Open Channel Hydraulics", McGraw Hill, 1959.
- [23] Vodoprivredna osnova Republike Srbije, Ministarstvo za poljoprivredu, šumarstvo i vodoprivredu, Institut za vodoprivredu „J. Černi“, Beograd, 1996.
- [24] Zakon o konvenciji između Savezne vlade Savezne Republike Jugoslavije i Vlade Rumunije o eksploataciji i održavanju hidroenergetskih i plovidbenih sistema HE Đerdap 1 i Đerdap 2, 1998.
- [25] Zindović, B., Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Đorđević, D., Numerička simulacija strujnog polja u blizini vodozahvata, Vodoprivreda, 42(2010) 246-248, 2010.
- [26] Zindović, B., Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Đorđević, D., Oblikovanje ulaza u zaliv primenom modela ravanskog i prostornog tečenja, Vodoprivreda, Vol. 39, br. 1-3, 2007.

HYDRAULIC ANALYSIS OF FLOOD PROTECTION
ALONG THE DANUBE AND SAVA RIVERS AT BELGRADE

by

Miodrag JOVANOVIĆ, Marko IVETIĆ, Nikola ROSIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu
Zoran GREGOROVIĆ
Hidrozaovod DTD, Novi Sad

Summary

This paper presents the results of the latest hydraulic calculations carried out in order to re-examine the existing flood protection system along the Danube and Sava rivers at Belgrade. Using the updated hydrological input data, the highest water levels are calculated for various combinations of the extremely high flows of the

two rivers. On the basis of the obtained results, a new criterion for flood protection in the region of Belgrade is proposed.

Key words: floods, hydraulic computations, the Danube and Sava rivers at Belgrade

Redigovano 12.10.2017.