

## POVEĆANJE EFIKASNOSTI UPRAVLJANJA AKUMULACIJAMA U PERIODU ODBRANE OD POPLAVA - NA PRIMERU HIDROENERGETSKOG SISTEMA NA TREBIŠNJICI -

Branislav ĐORĐEVIĆ<sup>1</sup>, Tina DAŠIĆ<sup>1</sup>, Nedeljko SUDAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univerziteta u Beogradu - Građevinski fakultet

<sup>2</sup> Zavod za vodoprivredu, Bijeljina

Efikasnost višenamenskih sistema se povećava tokom eksploatacije, postupnom upravljačkom kibernetizacijom. Proces kibernetizacije podrazumeva postupno poboljšavanje upravljačko-informacionog dela sistema, posebno Estimatora u kome se simulacioni modeli postepeno zamenjuju prognostičkim i optimizacionim modelima, čime se značajno poboljšava efektivnost upravljanja u realnom vremenu. Preduslov za to je da se ostvari jedinstvo: ciljeva, baza podataka, informacione i programske podrške.

(B. Đorđević, *Cybernetics in Water Resources Management, WRP, 1993.*)

### REZIME

Postepeno pogoršanje ekstremnih hidroloških fenomena – povećanje talasa velikih voda i smanjenje malih voda i produženje njihovog trajanja – postavlja sve zahtevnije uslove da se akumulacije koriste za aktivnu odbranu od poplava i za poboljšanje režima malih voda. Zbog toga je i pred višenamensko-hidroenergetskim sistemom Trebišnjica postavljen zadatak da pored povećanja energetske efektivnosti ostvari u operativnom radu i najefikasniju aktivnu odbranu od poplava grada Trebinja. U procesu upravljačke kibernetizacije Sistema na Trebišnjici (HET-a), čiji je cilj poboljšanje ukupne efektivnosti tog sistema, urađen je projekat 'Upravljanje akumulacijama i hidroelektranama sistema Trebišnjice'. Važan deo tog projekta je matematički simulaciono-optimizacioni model upravljanja akumulacijama u periodu velikih voda koji daje predlog najpovoljnijeg upravljanja, po kriterijumu ostvarivanja najveće transformacije poplavnog talasa. Model omogućava određivanje i upravljački najpovoljnijih stanja u akumulacijama tokom godine, čime se optimizira i dugoročno upravljanje po vodoprivrednim i energetske kriterijumima i ostvaruje najbolja zaštita grada Trebinja.

**Ključne reči:** akumulacije, poplavni talasi, aktivna odbrana od poplava, matematičko modeliranje

### 1. UVOD

Primena aktivnih mera zaštite od poplava - ublažavanjem talasa velikih voda u akumulacijama - postaje sve važnija mera upravljanja vodama. Značaj ublažavanja povodanja u akumulacijama raste u uslovima pogoršavanja režima velikih voda usled klimatskih promena i nepovoljnih aktivnosti na slivovima. Postoje brojni slučajevi da se i veća naselja kroz koja protiču reke sa bujičnim režimima ne mogu uspešno braniti od poplava bez adekvatnog korišćenja akumulacija. Leskovac se od povodanja Veternice štiti akumulacijom Barje, Valjevo i dolina Kolubare biće potpuno zaštićeni stavljanjem u funkciju akumulacija Stubo-Rovni na Jablanici, akumulacija Čelije štiti donji tok Rasine, Užice se štiti akumulacijom Vrutci, Zaječar će biti efikasno zaštićen tek kada bude izgrađena akumulacija Bogovina na Crnom Timoku, itd.

Brojna novija istraživanja bave se problemima velikih voda i rizika od poplava. Radovi (Pavlović i Vukmirović, 2010) i (Vukmirović, 2010) bave se osnovnim uzročnikom poplava, kišama velikih intenziteta, sa kojima i započinje proces geneze povodanja. Tim člancima su dati dragoceni doprinosi metodici probabilističkih analiza tog fenomena. Problemima višestruke koincidencije poplavnih talasa

na složenim rečim sistemima, što je pojava koja je vrlo bitna sa gledišta strategije odbrane od poplava na većim rečnim slivovima, bavi se rad (Prohaska i Ilić, 2010a). Razmatra se i jedna do sada manje istraživana pojava – mogućnost pojave izuzetno neravnomernih vodnih režima – i poplava i suša tokom iste godine, pa se u radu (Prohaska i Ilić, 2010b) istražuje uslovna verovatnoća pojave takvih nepovoljnih događaja. Taj fenomen i analize tog tipa sve više će se koristiti kao jedan od indikatora pogoršavanja vodnih režima. Sa gledišta obaveza koje imaju sve zemlje u skladu sa Direktivom EU o poplavama, veoma su značajna istraživanja rizika od poplava i kartiranja tih zona (Jovanović i drugi, 2009). Vrlo važan cilj takvih istraživanja je da se poplavama ugroženi prostori unesu u odgovarajuće prostorne planove i planove detaljne regulacije, sa ciljem da se spreči izgradnja u plavnim zonama i zaustavi dosadašnji stalni porast potencijalnih šteta od poplava. Svedoci smo i izuzetno velikih povodanja na nekim rekama, pa je dobar primer blagovremenog analitičkog razmatranja takvih pojava rad (Kalajđisalihović i Bibović, 2011) u kome se prikazuje razvoj numeričkog modela propagacije poplavnih talasa na reci Neretvi. U tom radu se daje prikaz mogućnosti savremene 3D grafike za determinisanje dolinskih zona ugroženih poplavama.

Za većinu višenamenskih akumulacija još je pri projektovanju i dimenzionisanju određen poseban rezervisan prostor za ublažavanje poplavnih talasa. Međutim, to nije dovoljno da bi se ostvarili puni efekti aktivne odbrane od poplava. Najveći efekti zaštite se mogu ostvariti tek nakon izrade i uvođenja u operativno korišćenje upravljačkih modela, čiji je jedan od kriterijuma minimizacija  $Q_{max}$  izlaznog talasa ( $Q_{max} \rightarrow min$ ). Taj važan deo osavremenjavanja upravljanja nije obavljen na najvećem broju akumulacija, tako da se još uvek ne koriste realne mogućnosti aktivnog ublažavanja povodanja u postojećim akumulacijama. Međutim, korišćenje brana sa snažnim evakuacionim organima (ustavama na prelivima, temeljnim ispustima velikog kapaciteta), zahteva da se primenjuju najsavremenije metode upravljanja kako bi se ostvarili najveći efekti ublažavanja poplavnih talasa.

Na objektima koji nemaju takve modele dešavalo se da se ne izvrši adekvatno ublažavanje poplavnih talasa. Jedan od takvih primera je reka Neretva, na kojoj je neadekvatnim otvaranjem evakuacionih organa povećan prirodni povodanj. Zbog toga se rad takvih brana mora striktno usloviti izradom, proverom, revizijom i stavljenjem u obaveznu upotrebu operativnih, brzih matematičkih modela, koji treba apriorno da pokažu kakve će biti posledice neke upravljačke operacije sa ustavama.

U Republici Srpskoj sistem Hidroelektrana na Trebišnjici (HET), sa Bilećkom i Trebinjskom akumulacijom, uspešno se koristi se za aktivnu zaštitu od poplava grada Trebinja. Ta mera je tokom vremena postala znatno važnija i upravljački složenija zbog nekontrolisane izgradnje urbanih sadržaja Trebinja na vodnom zemljištu, u zoni korita za veliku vodu. Zbog građevinske (zlo)upotrebe vodnog zemljišta<sup>1</sup> grad sada ugrožava već i protok od oko 400 m<sup>3</sup>/s, dok je nekada taj prag bio oko 750 m<sup>3</sup>/s, koliko približno iznosi velika voda verovatnoće 1%.



Slika 1. Sistem Hidroelektrana na Trebišnjici

<sup>1</sup> **Vodno zemljište**, prema vodnom zakonodavstvu većine zemalja čine površine koje obuhvataju korita reka, jezera i akumulacija, kao i njihove obale do nivoa stogodišnjih velikih voda, odnosno do nivoa najviše moguće kote koja se može pojaviti u akumulaciji pri evakuaciji računskih velikih voda. U vodno zemljište ulazi i pojas zemljišta od ureza vode 1% u širini 10÷50 m, zavisno od lokalnih okolnosti. Na vodnom zemljištu je zabranjeno građenje bilo kojih stalnih objekata koji ugrožavaju protočnost i funkcije sistema.



■ Četvrti element UIDS je 'Estimator', koji sakuplja informacije iz okruženja i na bazi njih dostavlja upravljačkom organu DUO informacije o ulazima ( $x$ ) i slučajnim poremećajima ( $v$ ), kako bi isti donosio upravljačke odluke na bazi što pouzdanijih informacija o svim komponentama ulaza i slučajnih poremećaja u sistemskoj okolini.

Na šemi se uočava da postoje povratne sprege na svim nivoima, uključujući i spregu označenu sa (!?) koja omogućava da DUO može da obavesti viši nivo upravljanja da su neki zahtevi dobijeni sa tog nivoa neostvarljivi, bilo po definisanim ciljevima ( $\Gamma$ ) (preambicionizni ciljevi!), kriterijumima ( $J$ ), ograničenjima ( $L$ ) ili po nivou zahteva u pogledu mogućnosti korišćenja modela ( $M$ ). Element  $\otimes$  je važan element povratne sprege jer se preko njega upoređuju postavljeni zahtevi u pogledu traženih izlaza i stanja ( $y^z$  i  $s^z$ ) sa zaista realizovanim izlazima i stanjima ( $y'$  i  $s'$ ), kako bi blok donošenja upravljačkih odluka (DUO) pri odlučivanju o narednom upravljačkom koraku imao u vidu i ta odstupanja po izlazu ( $\epsilon_y$ ) i stanju ( $\epsilon_s$ ).

**Sušтина kibernetizacije upravljanja** upravo je u postupnom razvoju informacionih delova sistema i razvoju Estimatora. Razlikuju se dve generalne faze razvoja i korišćenja Estimatora.

**I faza.** U uslovima kada informacioni deo sistema koji obezbeđuje pribavljanje informacija iz okruženja još nije doveden do nivoa operativnosti (brzine sakupljanja i prenošenja informacija do upravljačkog centra) koji omogućava izradu pouzdanih prognostičkih modela, Estimator je na nivou simulacionog modela. Na tom nivou razvoja on bloku DUO dostavlja podatke na bazi uopštavanja (simulacije) procesa iz prošlosti. Najčešće se radi o raznim vidovima sintetičkih zavisnosti (pluviograma, hidrograma, itd.) koji imaju očekivane odlike procesa koji se mogu javiti. U nekim okolnostima se mogući ulazi daju i na nivou 'pesimističnih simulacija', ukoliko je potrebno da se odabere neko što pouzdanije upravljanje, npr. u uslovima zaštite od povodanja ili u nekim vanrednim situacijama.

**II faza.** U uslovima kada se 'IDS sadejstva sa okruženjem' opremi dovoljno operativnom opremom, koja omogućava dostavu informacija potrebnih za

prognozu ulaza u realnom vremenu, Estimator dobija nov kvalitet: prerasta u prognostički model, koji bloku DUO dostavlja prognozirane veličine vektora ulaza ( $\hat{x}$ ) (svih ulaznih veličina koje su neophodne za prognozu) i vektora slučajnih poremećaja ( $\hat{v}$ ) (slika 2). U tom slučaju i blok DUO dobija nov kvalitet, jer može da poboljša kvalitet upravljačke odluke, tako da se u upravljački algoritam umesto simuliranih vrednosti uvode prognozirane veličine ( $\hat{x}$ ) i ( $\hat{v}$ ) (jedn.1), dok je  $u_{t-\tau}$  upravljanje u prethodnih  $\tau$  upravljačkih koraka, tako da opšti algoritam upravljačkog modela dobija oblik:

$$u(t) = W(u_{t-\tau}, \epsilon_y, \epsilon_s, \hat{x}, \hat{v}, t) \quad (1)$$

Prerastanjem Estimatora u prognostički model povećava se efektivnost sistema, jer sistem prerasta u višu upravljačku klasu, u *sistem sa povratnom spregom i prognozom ulaza*. Nov kvalitet te klase sistema je značajno smanjenje entropije sistema, što se ostvaruje zahvaljujući prognoznoj informaciji koja se dobija iz Estimatora. Entropija sistema na početku  $m$ -tog intervala, ukoliko nema prognoze ulaza  $x_m$ , jednaka je  $H(x_m)$ , što je slučaj kada je poznata samo raspodela verovatnoće ulaza  $x_m$  u tom intervalu:  $f(x_{m,m})$ . Ukoliko se na vreme dobije informacija o prognoziranom vektoru ulaza ( $\hat{x}_m$ ), u tom slučaju je entropija sistema  $H(x_m | \hat{x}_m)^2$ . Može se pokazati (Đorđević, 1993) da je priraštaj informacije  $\Delta I_m$  kao rezultat dobijanja prognozne veličine ( $\hat{x}_m$ ) jednak:

$$\Delta I_m = H(x_m) - H(x_m | \hat{x}_m) \geq 0 \quad (2)$$

Veličina entropije  $H(x_m | \hat{x}_m)$  zavisi od kvaliteta prognoze, sa tendencijom da se smanjuje sa poboljšavanjem tačnosti prognozirane veličine  $\hat{x}_m$ . U zavisnosti od kvaliteta modela Estimatora i pratećih informacionih i mernih sistema mogu se javiti dva ekstremna slučaja.

(a) Ukoliko je kvalitet estimacije vrlo loš, pa estimacijom dobijeni ulazi ne smanjuju neizvesnost o ulazu, tada je:  $H(x_m) = H(x_m | \hat{x}_m)$ , pa ne postoji priraštaj informacije, te je  $\Delta I_m = 0$ . U tom slučaju se zadatak upravljanja svodi na stohastički zadatak, isti kao kada se raspolaže samo sa funkcijom raspodele  $f(x_{m,m})$ . To je ređi slučaj, jer se u uslovima operativnog sakupljanja

<sup>2</sup> Entropija  $H(x_m | \hat{x}_m)$  definiše preostalu neizvesnost o slučajnom ulazu  $x_m$  pod uslovom da je na početku  $m$ -tog intervala pristigla prognozna informacija da će taj ulaz biti  $\hat{x}_m$ .

informacija iz sistemske okoline pomoću monitoring sistema, može obezbediti relativno prihvatljiva prognoza vektora ulaza  $\hat{x}_m$ , koja smanjuje entropiju sistema i poboljšava kvalitet upravljačke odluke.

(b) Drugi ekstrem je dostizanja vrlo kvalitetne prognoze, kada je  $H(x_m | \hat{x}_m) \approx 0$ , jer je  $x_m \approx \hat{x}_m$ . U tom slučaju se dobija najveća količina apriorne informacije  $\Delta I_m \approx H(x_m) = \max$  i tada se upravljački zadatak pretvara u determinističko upravljanje, koje omogućava donošenje vrlo kvalitetne upravljačke odluke.

Savremene metode modeliranja i razvoj opreme i metoda veoma operativnog monitoringa, sa 'on line' prenosom informacija neophodnih za modeliranje u realnom vremenu, omogućavaju da se ostvare kvalitetne prognoze vektora ulaza  $\hat{x}_m$ , tako da ostvaruje pozitivan priraštaj informacije  $\Delta I_m = H(x_m) - H(x_m | \hat{x}_m) > 0$ , što omogućava rešavanje zadatka upravljanja sa estimacijom / prognozom ulaza.

Razmotrimo efektivnosti upravljanja (EF) za tri klase upravljačkog zadatka: (a)  $EF_{stoh}$  – u slučaju stohastičkog zadatka, kada je poznata samo funkcija raspodele ulazne veličine  $f(x_m, m)$ , (b)  $EF_{est}$  – efektivnost u slučaju zadatka se estimacijom ulaza, kada se iz Estimatora dobije prognozirana veličina ulaza  $\hat{x}_m$ , (c)  $EF_{det}$  - kvazideterministički zadatak, u uslovima kada je  $\hat{x}_m \approx x_m$  (slučaj vrlo kvalitetne prognoze, kada je  $\Delta I_m \approx H(x_m) = \max$ ). Može se dokazati (Đorđević, 1993) vrlo važna zakonitost poboljšanje efektivnosti upravljanja:

$$EF_{det} \} EF_{est} \} EF_{stoh} \quad (3)$$

gde znak  $\}$  označava 'bolje'<sup>3</sup>. Uočava se da se uvođenjem Estimatora i prognoze ulaznog vektora  $\hat{x}_m$  dobija bolja efektivnost sistema, dok se najbolja efektivnost ostvaruje kada se ostvari visok kvalitet prognoze, kada se zadatak pretvara u kvazideterministički zadatak upravljanja, kojim se kvalitet upravljanja približava najbolje mogućem upravljanju sa takvom klasom sistema.

U slučaju aktivne odbrane od poplava estimacija realizovana kao prognoza donosi vrlo bitan kvalitet, jer blagovremena prognoza i veoma brzo donošenje optimalne upravljačke odluke omogućavaju da se forsiranim radom svih raspoloživih agregata hidroelektrana i pretpražnjenjem akumulacija, u cilju

pripreme za što bolje prihvatanje talasa povodnja u delimično ispražnjenjnoj akumulaciji obezbede najveći efekti na ublažavanju vrha povodnja, po kriterijumu  $Q_{max} \rightarrow \min$ .

Može se zaključiti da se proces kibernetizacije sistema svodi na poboljšavanje upravljačkih performansi UIDS, pre svega Estimatora i bloka DUO. To je najracionalniji način da se poboljša efektivnost postojećeg sistema. Da bi se to ostvarilo neophodno je da se ostvari jedinstvo: ciljeva, baza podataka, informacione i programske podrške.

Sledeća klasa sistema kojoj se teži kroz proces postupnog otklanjanja sistemskih neizvesnosti i poboljšavanja efektivnosti sistema, jeste još bolje izučavanje zakonitosti ponašanja sistema i geneze formiranja ulaza (preslikavanje na relaciji: geofizički parametri  $\rightarrow$  padavine  $\rightarrow$  oticaj). Na taj način sistem postepeno prerasta u '**sistem upravljanja sa samoobučavanjem**', koji je najviši nivo kibernetizacije sistema. Samoobučavanje podrazumeva softversku osposobljenost UIDS, posebno bloka DUO sistema, da svoj upravljački model stalno poboljšava na bazi iskustava u procesu upravljanja. Time se proizvodna i zaštitna efektivnost sistema postepeno približavaju njegovim najvišim potencijalnim mogućnostima. Najrazvijeniji sistemi iz te klase obavezno dobijaju i postepeno sve više usavršavaju Ekspertni sistem za upravljanje u svim upravljačkim situacijama. Ekspertni sistem je posebno važan za upravljanje u periodima ekstremno velikih voda, kao i za upravljanje u raznim vanrednim situacijama.

Kao što se vidi, kroz proces postepenog poboljšavanja upravljačkog dela sistema, takav prvobitni *tehnički sistem sa povratnim spregama*, koji iskorišćava samo jedan deo svojih potencijalnih proizvodnih i zaštitnih mogućnosti, kroz proces razrade novih upravljačkih softvera postepeno prerasta u klasu **kibernetizovanih sistema** (Đorđević, 1993) koji ima tako razvijen nivo upravljanja da može tokom eksploatacije da kroz proces optimizacije ostvari potencijalno najveće moguće proizvodne, regulacione i zaštitne efektivnosti. U slučaju HET-a to su najveća energetska proizvodnja, najveći efekti ublažavanja poplavnih talasa i planirani efekti zaštite Trebišnjice u periodu malih voda i kriznih ekoloških stanja.

<sup>3</sup> Pojam 'bolje' je uveden zbog toga što se kriterijum za vrednovanja upravljanja može definisati na dva načina – kao maksimizacija svih dobiti ili minimizacija troškova i šteta. Zbog toga nisu mogući znakovi  $>$ , odnosno  $<$ .

Na osnovu hidroloških stanja i stanja u Sistemu i sistemskoj okolini razlikuju se sledeći režimi eksploatacije.

- Režim eksploatacije u normalnim hidrološkim i energetske okolnostima.
- Režim eksploatacije u periodu pojave velikih voda.
- Režim upravljanja u periodu malih voda.
- Režimi upravljanja koji su uslovljeni vanrednim događajima.

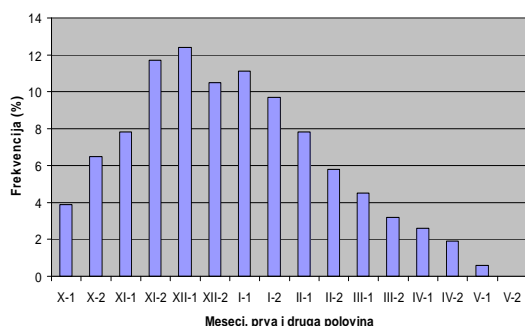
U ovom radu će se razmatrati samo suboptimizacija upravljanja u periodu velikih voda, u okviru ukupne optimizacija rada HET-a kao višenamenskog sistema.

## 2. GENEZA VELIKIH VODA U SLIVU TREBIŠNJICE

Na genezu talasa velikih voda odlučujuće utiču: • modifikovani maritimni režim padavina, sa izrazito neravnomernim režimom i ekstremnim padavinama u hladnom delu godine; • dinarska planinska orografija koja deluje kao 'prva barijera' na kojoj se pri pojavi sredozemnih ciklona izlučuju velike padavine i po ukupnoj veličini i po intenzitetu (u neposrednoj blizini je i zona Orijena sa najvećim padavinama u Evropi od oko 5000 mm), • izrazita karstifikacija sliva sa razvijenom podzemnom hidrografijom, koja utiče na vreme koncentracije povodanja.

Hidrološka analiza pokazuje da su povodnji najučestaliji u periodu [15.oktobar÷15.mart], pri čemu su posebno izraženi i veliki u periodu [01.11.÷31.02.] (slika 3).

Bilečko jezero: Frekvencija javljanja vrha talasa velike vode



Slika 3. Frekvencija pojave talasa velike vode na ulasku u Bilećku akumulaciju

Analize pokazuju da se sa stanovišta rizika od pojave povodanja i nužnosti preduzimanja posebnih upravljačkih mera radi njihovog ublažavanja u akumulacijama mogu izdvojiti četiri perioda:

- [01.05.÷01.10.] - **period bez rizika od povodnja**, kada HET radi bez ograničenja sa gledišta velikih voda i optimizira se samo po kriterijumu energetske efektivnosti.
- [01.10.÷15.10.] i [16.04.÷01.05.] - **period praćenja i opreza**: period kada dolazi do pojave talasa, ali su oni najčešće manjih zapremina; period energetske optimizacije, ali uz proveravanje svih talasa koji se formiraju, u zavisnosti od kota u Bilećkom jezeru, jer je moguć, ali ne i posebno verovatan prelazak i na upravljanje sa prioritonom odbrane od poplava.
- [16.10.÷15.04.] - **period verovatnih povodnja i prelaska na odbranu od poplava** - period kada postoji verovatnoća nailazaka talasa velikih voda, kada, zavisno od dostignute kote u Bilećkom jezeru, ublažavanje talasa može da postane prioritetan upravljački zadatak, u cilju zaštite od poplava područja nizvodno od brane Gorica.
- [01.11.÷31.03.] – period **najveće verovatnoće pojave talasa velikih voda i najvećeg opreza**, kada se javljaju najveći povodnji od padavina velikih intenziteta, koji se mogu superponirati sa oticajima od naglog topljenja snega. Tada može doći i do nadovezivanja jednog talasa na drugi, kao i do pojave talasa velikih zapremina. U tom periodu postoji velika verovatnoća da se sa rešavanja zadatka energetske optimizacije – kao prioritnog upravljačkog zadatka HET-a, mora preći na režim rada po kome prioritetan upravljački zadatak postaje ublažavanje poplavnih talasa i aktivna odbrana od poplava. Tada svi objekti u sistemu prelaze na rad po **obavezujućem režimu**, koji je u svim zemljama i zakonski regulisan kao period vanredne odbrane od poplava.

Analizom svih razmatranih talasa dobijaju se zaključci koji su bitni za naredne korake rešavanja problema upravljanja Sistemom HET-a.

- Vreme koncentracije talasa je dosta kratko i iznosi 1 do najviše 2 dana. Upravo iz tih razloga pri kreiranju sintetičkih talasa formirani su talasi sa vremenima koncentracije od 1, 1,5 i 2 dana.
- Bazni oticaj pri kome dolazi do formiranja povodnja je u dosta širokim granicama, okvirno u opsegu [50÷150] m<sup>3</sup>/s.
- Mogući su gradijenti podizanja talasa od preko 300 m<sup>3</sup>/s na dan. To stvara vrlo oštre operativne zahteve u pogledu praćenja ulaza u akumulaciju i svih upravljačkih operacija sa elektranama i sa evakuacionim organima na obe brane.

- Vreme retardacije talasa je nešto produženo, zbog delovanja podzemne hidrografije karsnih formacija u kojima dolazi do izvesnog akumulisanja vode, tako da u normalnim okolnostima opadajuća grana talasa traje 6÷8 dana.
- Najčešći gradijenti opadanja talasa na retardacionoj grani su [100÷150] m<sup>3</sup>/s na dan.
- Moguća su uzastopna nagomilavanja dva i više poplavnih talasa, tako da se uzlazna grana novog talasa nadovezuje na još nezavršenu opadajuću granu prethodnog (scenario: 'talas na talas', koji zadatak odbrane od poplava čini znatno težim).

U toku je opremanje sliva neophodnim mernim stanicama za automatsku dostavu podataka o padavinama, proticajima i stanju pijezometara, kako bi se prešlo na pouzdanije metode upravljanja korišćenjem estimatora kao prognoznog, a ne simulacionog dela sistema. U ovoj fazi, do potpunog opremanja sliva mernim uređajima i izrade prognostičkog matematičkog modela, koriste se sintetički hidrogrami nastali na bazi proučavanja talasa velikih voda u prošlosti. Definisane su tri moguće grupe talasa: (a) manji talasi, do oko 300 m<sup>3</sup>/s koji se mogu uspešno retenirati čak i pri nailasku na gotovo ispunjenu Bilečku akumulaciju (kote čak i do 399 mnm), (b) srednji talasi, [300÷400] m<sup>3</sup>/s, talasi 'srednjih veličina'; (c) veliki talasi, veći od 400 m<sup>3</sup>/s, koji zahtevaju posebno operativne mere upravljanja, kada se ceo sistem HET-a nalazi u režimu *vanrednih mera odbrane od poplava*, što podrazumeva obaveznost svih hidroelektrana da kontinuirano rade sa instalisanim protocima svih raspoloživih agregata, jer je odbrana od poplava prioritetan upravljački zahtev.

Pošto se međudotok ( $Q_{\text{mdot}}$ ) koji većim delom podzemnim putem dospeva u Trebinjsku akumulaciju ne može neposredno meriti, napravljena je analitička korelaciona zavisnost tipa<sup>4</sup>

$$Q_{\text{mdot}} = a \cdot Q_{\text{dot}}^2 + b \cdot Q_{\text{dot}} + c \quad (4)$$

sa visokim slaganjem, koja omogućava da se ta bilansna komponenta  $Q_{\text{mdot}}$  automatski uvede u model kao ulazni hidrogram sa međusliva (slika 4). Međutim, pošto su tokom eksploatacije uočene i mogućnosti pojave ekstremno nepovoljnih dotoka zbog delovanja podzemne karstne hidrografije sliva Sušice sa pritokama

Zaslupnicom i Kunskom rekom, koje dreniraju padine Orijena, umesto korelacionog određivanja te komponente moguće je međudotok definisati sintetičkim hidrogramom sa maksimalnom veličinom dotoka u opsegu [200, 250 i 300] m<sup>3</sup>/s, što omogućava izbor upravljanja po kriterijumu ( $Q_{\text{Treb.max}} \rightarrow \text{min}$ ) i u takvoj retkoj hipotetičkoj hidrološkoj situaciji. To je upravljački složeniji zadatak, jer se još veći deo tereta ublažavanja poplavnog talasa mora preneti na Bilečku akumulaciju, kako bi se stvorio prostor za prijem i ublažavanje tako velikog talasa sa međusliva.

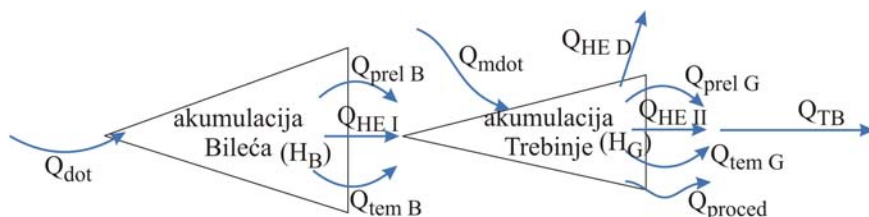
### 3. MATEMATIČKI MODEL ZA UBLAŽAVANJE POPLAVNOG TALASA

**Opšti opis modela.** Upravljački model 'Ublažavanje poplavnog talasa' je formiran kao vrlo operativan *simulacioni model*. To znači da MM omogućava da se ispitivanjem različitih varijanti upravljanja dođe do jednog najpovoljnijeg rešenja koje daje najpovoljniju upravljačku soluciju. To znači da se model uspešno koristi i kao model za suboptimizaciju. Model se zasniva na rešavanju bilansnih jednačina - najpre za uzvodnu akumulaciju Bileća, a zatim za nizvodnu akumulaciju (kompenzacioni bazen) Trebinje, u skladu sa šemom koja je prikazana na slici 4.

Strategija upravljanja sistema HET u uslovima nailaska velikih voda u potpunosti se razlikuje od strategije upravljanja u uslovima normalnog rada. U uslovima normalnog rada HE Trebinje 1 radi kao vršno postrojenje, prema iskazanim zahtevima EES. U tim uslovima osnovna uloga kompenzacionog bazena Trebinje je da izvrši dnevno regulisanje i omogući nesmetan rad HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik, i uputi zahtevane protoke nizvodno od brane Gorica.

U uslovima nailaska povodnja strategija upravljanja sistemom se menja: režimi rada HE Trebinje 1, HE Dubrovnik i HE Trebinje 2 postaju dirigovani, obavezujući, u funkciji zaštite od poplava. U ovim uslovima HE Trebinje 1 radi konstantno po optimalnom ili maksimalnom režimu sa angažovanjem dva ili tri agregata, što zavisi od broja raspoloživih agregata i nivoa vode u akumulaciji. HE Dubrovnik i HE Trebinje 2 takođe rade sa maksimalnim instalisanim kapacitetima, pri čemu je posebno značajan rad HE

<sup>4</sup> Analize više tipova korelacionih zavisnosti pokazala je da se najbolje slaganje ostvaruje sa korelacijom tipa (jed.4), a po tačnosti sledi korelacije trećeg stepena.



Slika 4. Šematski prikaz modeliranog sistema "Trebinje"

Dubrovnik, zbog rasterećenja toka Trebišnjice prevođenjem u smeru Jadranskog mora<sup>5</sup>.

Šema razmatranog sistema 'Trebinje' koji se sastoji od dva podsistema: 'Akumulacija Bileća' i 'Akumulacija Trebinje' data je na slici 4. Tada su ulazni i izlazni parametri modela sledeći:

(a) Podsystem 'Akumulacija Bileća':

Ulazni parametri: • dotok vode u akumulaciju Bileća ( $Q_{dot}$ ), • broj raspoloživih agregata u HE Trebinje 1 ( $0 \div 3$ ), • režim rada HE Trebinje 1 (optimalan ili maksimalan), • početni nivo vode u akumulaciji Bileća ( $H_{B0}$ ), • početni nivo vode u akumulaciji Trebinje ( $H_{T0}$ ).  
Izlazni parametri, kao rezultat upravljanja: • nivo vode u akumulaciji Bileća, • protok vode kroz HE Trebinje 1 ( $Q_{HE I}$ ), • protok vode preko preliva ( $Q_{prel B}$ ), odnosno, režim rada preliva na brani Grančarevo (otvorenost segmentnih ustava), • režim rada temeljnog ispusta na brani Grančarevo (stepen otvorenosti koničnog zatvarača), odnosno, protok vode kroz temeljni ispust ( $Q_{tem B}$ ), • nivoi vode u akumulaciji Bileća ( $H_B$ ) - u vidu vremenske serije.

(b) Podsystem 'Akumulacija Trebinje':

Ulazni parametri: • međudotok ( $Q_{mdot}$ ), • protok vode kroz HE Trebinje I ( $Q_{HE I}$ ) - dobijen kao izlaz iz podsistema 'Akumulacija Bileća', • dotok vode preko preliva brane Grančarevo ( $Q_{prel B}$ ) - dobijen kao jedan od izlaza iz podsistema 'Akumulacija Bileća', • protok vode kroz temeljni ispust ( $Q_{tem B}$ ) - dobijen kao izlaz iz podsistema 'Akumulacija Bileća', • procurivanje iz akumulacije Gorica ( $Q_{proced}$ ), • instalisani protoci HE Dubrovnik ( $Q_{HE D}$ ) i HE Trebinje 2 ( $Q_{HE II}$ ).

Izlazne veličine, kojima se upravlja: • protok preko preliva brane Gorica ( $Q_{prel G}$ ), kao i režim rada ustava; • protok kroz temeljni ispust ( $Q_{tem G}$ ) i njegov režim rada; • nivo vode u akumulaciji Trebinje, • protok vode kroz grad Trebinje, ( $Q_{TB}$ ), kao vremenska serija.

Imajući u vidu konfiguraciju sistema proračuni su iterativni, u dva koraka, najpre se rade bilansne analiza uzvodne, a zatim nivodne akumulacije.

Režim rada evakuacionih organa brane Grančarevo određuje se korišćenjem osnovnih bilansnih jednačina i određenih pravila upravljanja.

#### Podsystem 'Akumulacija Bileća'

Bilansna jednačina akumulacije Bileća:

$$\frac{\Delta V_{B,i}}{\Delta t} = \bar{Q}_{dot,i} - \bar{Q}_{HE I,i}(H_{B,i}) - \bar{Q}_{prel B,i}(H_{B,i}) - \bar{Q}_{tem B,i}(H_{B,i}) \quad (5)$$

$$H_{B,i} = f(V_{B,i}) \quad (6)$$

gde su od novih oznaka:

- $\Delta V_{B,i}$  - promena zapremine u i-tom intervalu vremena:  $\Delta V_{B,i} = V_{B,i} - V_{B,i-1}$
- $\Delta t$  - vremenski interval, koji je konstantan i iznosi:  $\Delta t = 1$  čas
- $\bar{Q}_{*,i}$  - srednja vrednost protoka u toku razmatranog vremenskog intervala  $\Delta t$ . Tokom tog intervala pretpostavlja se konstantna otvorenost zatvarača (temeljnog ispusta i/ili preliva), odnosno rada HE. Promena protoka (u razmatranom intervalu) funkcija je samo promene nivoa vode u akumulaciji  $H_{B,i}$ :

$$\bar{Q}_{*,i}(H_{B,i}) = \frac{Q_{*,i}(H_{B,i}) + Q_{*,i-1}(H_{B,i-1})}{2} \quad (7)$$

- Izlazni protok nizvodno od brane Grančarevo:

$$Q_{B\_izl}(t) = Q_{HE I}(t, H_{B,i}) + Q_{prel B}(t, H_{B,i}) + Q_{tem B}(t, H_{B,i}) \quad (8)$$

<sup>5</sup> Taj derivacioni / rasteretni smer tečenja iz Trebinjske akumulacije tunelom prema moru je veoma važan sa gledišta zaštite od poplava. Zbog koincidencije velikih voda Trebišnjice i Neretve često nastupa upravljački kritična situacija, kada protok u Neretvi dostigne  $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ , kada se ne dozvoljava da RHE Čaplina radi u turbinskom režimu da se ne bi povećavali protoci na Neretvi nizvodno od Čapljne. Tada se plavi Popovo polje, što ga čini neupotrebljivim za realizaciju stalnih objekata i sistema. Zbog toga je realizacija druge faze HE Dubrovnik, sa još jednim, dodatnim kapacitetom derivacije od bar  $90 \text{ m}^3/\text{s}$ , izuzetno važna ne samo za Republiku Srpsku, već i za FBiH i Hrvatsku.



S obzirom da protoci kroz HE, preko preliva i kroz temeljni ispust zavise od nivoa vode u akumulaciji, neophodno je sprovesti iterativan proračun za određivanje protoka, odnosno zapremine i nivoa vode za svaki vremenski korak.

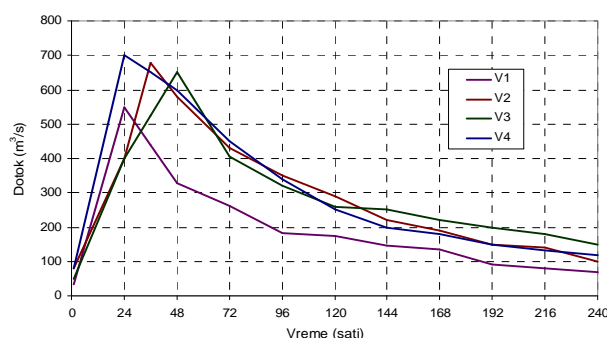
Proračun se obavlja kroz više simulacionih iteracija dok se ne dobije zadovoljavajuće rešenje.

- 1° U prvom iteraciji pretpostavlja se da su preliv i temeljni ispust zatvoreni, tako da se kompletna evakuacija vode obavlja radom HE Trebinje 1. Rešavaju se bilansne jednačine i određuje se nivo vode u akumulaciji. Ako nivo vode u akumulaciji ne pređe definisanu maksimalnu kotu za propuštanje talasa u datom periodu godine (videti dijagram na slikama 8 i 9), to znači da akumulacija i samo takvim energetski najpovoljnijim upravljanjem može da prihvati poplavni talas i nije neophodno ispuštati vodu preko preliva ili kroz temeljne ispuste, jer bi to bio nepotreban energetski gubitak vode.
- 2° Ako nivo vode premaši zadatu maksimalnu kotu za propuštanje talasa u datom periodu godine, neophodno je izvršiti dodatnu evakuaciju vode, kako bi se nivo vratio u zadat anvelopni opseg. Voda se evakuše prvo preko preliva, a samo ako nije moguće evakuisati vodu na taj način otvaraju se temeljni ispusti. Ustave na prelivima otvaraju se pri kotama vode u jezeru koje korisnik zadaje u okviru ulaznih podataka, a koje su kao finalni rezultat ovog modela definisane i odgovarajućim dispečerskim graficima (slika 7), čiji je zadatak da učine pouzdanijim upravljanje tokom godine, a posebno u periodu odbrane od poplava. Korak otvaranja ustava iznosi 10 cm.
- 3° Ako poplavni talas nije moguće evakuisati ni potpunim otvaranjem ustava na prelivima (maksimalno podizanje ustava iznosi 3 m) uz ispunjavanje uslova da nivo vode u akumulaciji ne premaši zadatu maksimalnu kotu za propuštanje talasa u datom periodu godine, otvaraju se i zatvarači temeljnih ispusta. Otvaraju se istovremeno, zbog disipacije energije iznad slapišta, korak otvaranja je 10%, vremenski korak otvaranja 1 čas.
- 4° Proračuni se nastavljaju iterativno, dok se ne dobije nivo vode u akumulaciji koji je u svim vremenskim preseccima manji od zadate maksimalne kote za propuštanje talasa u datom periodu godine.
- 5° Zatvaranje ustava obavlja se na sličan način, sa istim vremenskim korakom i pri istim kotama kao i otvaranje ustava. Prvo se zatvaraju ustave temeljnih

ispusta, a zatim ustave na prelivnim poljima. Ustave temeljnih ispusta se zatvaraju za po 10%, odnosno ustave na prelivima za po 10 cm. Zatvaranje ustava obavlja se svaki put kada nivo vode u akumulaciji opadne ispod kote koja je definisana kao kота pri kojoj se vrši otvaranje ustava (za temeljne ispuste i prelivna polja, u zavisnosti od preporučenih kота za pojedine periode u godini), dok se u potpunosti ne zatvore.

*Dotoci u Bilečku akumulaciju.* Dotok u Bilečku akumulaciju je najvećim delom podzemni, iz potopljenih Trebinjskih vrela, zbog čega se ulaz  $Q_{dot}$  određuje posredno, na bazi stalnih bilansnih analiza promene stanja akumulacije, za poznat izlaz i precizno određenu promenu zapremine u  $i$ -tom intervalu ( $\Delta V_{B,i}$ ). Projektom upravljanja je definisana obavezna dinamika stalnog praćenja ulaza u periodu opasnosti od pojave povodnja, kako bi se na vreme otkrila pojava povodnja, što je osnovni preduslov za određivanje uspešnog upravljanja.

Pošto Estimator u sadašnjem režimu rada funkcioniše kao simulacioni, a ne prognostički model, ulazni hidrografi su u ovoj fazi upravljanja simulirani sintetički talasi. Na bazi analiza svih do sada registrovanih talasa velikih voda generisani sintetički talasi su sistematizovani u dve grupe talasa: ▀ grupa S – srednjih talasa, u opsegu  $Q_{max}$  do 450 m<sup>3</sup>/s, sa vremenom koncentracije od 1 dan do 2 dana i vremenom retardacije od oko 8÷9 dana, ▀ grupa V – velikih talasa, u opsegu  $Q_{max}$  do 700 m<sup>3</sup>/s, sa vremenom koncentracije od 1 dan do 2 dana i vremenom retardacije od oko 9 dana (slika 5). Tokom upravljanja ti skupovi sintetičkih talasa će se proširivati, kako bi se obuhvatile sve moguće hidrološke situacije u periodu formiranja povodanja.



Slika 5. Neki od sintetičkih ulaznih talasa za akumulaciju Bileća, iz grupe velikih talasa

### Podsistem 'Trebinjska akumulacija'

Šematski prikaz podsistema 'Akumulacija Trebinje', sa svim parametrima tog sistema prikazan je na slici 4. Režim rada evakuacionih organa brane Gorica (oznaka 'G' u jednačinama) određuje se korišćenjem osnovnih bilansnih jednačina i određenih pravila upravljanja.

- bilansna jednačina:

$$\frac{\Delta V_{G,i}}{\Delta t} = \bar{Q}_{ndot,i} + \bar{Q}_{HE I,i} + \bar{Q}_{prel B,i} + \bar{Q}_{tem B,i} - Q_{HE D} - Q_{HE II} - \bar{Q}_{prel G,i}(H_{G,i}) - \bar{Q}_{tem G,i}(H_{G,i}) - \bar{Q}_{proced,i}(H_{G,i})$$

$$H_{G,i} = f(V_{G,i})$$

gde su, od novih oznaka:

- $\Delta V_{G,i}$  - promena zapremine jezera u i-tom intervalu vremena:  $\Delta V_{G,i} = V_{G,i} - V_{G,i-1}$
- $\Delta t$  - vremenski interval, koji je konstantan i iznosi:  $\Delta t = 1$  čas
- $\bar{Q}_{*,i}$  - srednja vrednost protoka u toku razmatranog vremenskog intervala. Za izlazne vrednosti protoka pretpostavlja se konstantna otvorenost zatvarača (temelnog ispusta i/ili preliva). Promena protoka (u razmatranom intervalu) funkcija je samo promene nivoa vode u akumulaciji  $H_{G,i}$ .

$$\bar{Q}_{*,i}(H_{G,i}) = \frac{Q_{*,i}(H_{G,i}) + Q_{*,i-1}(H_{G,i-1})}{2}$$

- Izlazni protok nizvodno od brane Gorica, onaj koji protiče kroz Trebinje ( $Q_{TB}$ ):

$$Q_{TB}(t) = Q_{HE II} + Q_{prel G}(t, H_{G,i}) + Q_{tem G}(t, H_{G,i}) + Q_{proced}(t, H_{G,i})$$

S obzirom da protoci preko preliva, kroz temeljni ispust kao i količina vode koja procuruje nizvodno od brane zavise od nivoa vode u akumulaciji neophodno je sprovesti iterativan proračun za određivanje protoka, odnosno zapremine i nivoa vode za svaki vremenski korak.

*Upravljačka pravila za branu Gorica.* Za razliku od brane Grančarevo, na brani Gorica je redosled otvaranja zatvarača evakuacionih organa u periodu evakuacije velikih voda obrnut:

- protok do  $90+45=135$  m<sup>3</sup>/s se propušta kroz agregate HE Dubrovnik i HE Trebinje 2;
- za protoke ispuštanja veće od 135 m<sup>3</sup>/s najpre se simetrično otvaraju segmentni zatvarači temeljnih ispusta na brani Gorica (dva ispusta 6×4 m, sa

segmentnim zatvaračima, kapaciteta do 800 m<sup>3</sup>/s pri punom otvaranju i koti u jezeru 295 mm, slika 6), što je u najvećem broju ispitivanih talasa bilo dovoljno za efikasnu evakuaciju velikih voda;

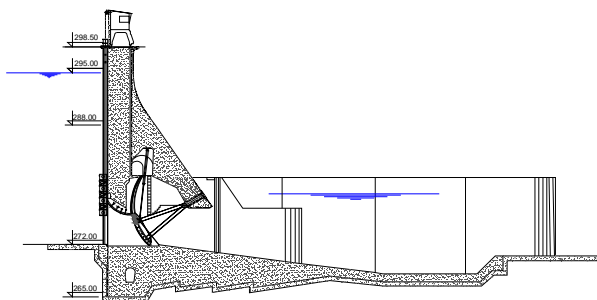
- u ekstremno retkim slučajevima, samo ako nije moguće evakuisati svu količinu vode kroz temeljne ispuste, ili je jedan od njih neraspoloživ za rad - otvaraju se segmentni zatvarači na prelivnim poljima.

U skladu sa energetsom i hidrauličkom logikom, MM zahteva da tokom čitavog perioda trajanja poplavnog talasa hidroelektrane HE Trebinje 2 i HE Dubrovnik rade u dirigovanom režimu, sa punim instalisanim protokom i njihov protok je konstantan u proračunu:  $Q_{HE II} = 45$  m<sup>3</sup>/s i  $Q_{HE D} = 90$  m<sup>3</sup>/s.

Pošto Bilećka akumulacija snosi glavni teret ublažavanja povodnja, dok Trebinjska akumulacija ima ulogu kompenzacionog basena, simulacione analiza su pokazale da je poželjna kota u Trebinjskoj akumulaciji u periodu zaštite od poplava 294 mm, a da se može u uslovima velikih verovatnoća pojave velikih talasa (posebno sa međusliva) spustiti na 292 mm.

Kao što je već istaknuto, kada se kroz temeljni ispust propušta oko 350 m<sup>3</sup>/s, to znači da je zajedno sa protokom kroz agregat HE Trebinje 2 protok nizvodno od brane Gorica oko 400 m<sup>3</sup>/s, što je za sadašnje uslove, na granici bezbednog propuštanja kroz grad Trebinje. U takvim okolnostima se nivo u akumulaciji održava konstantnim na koti koja je jednaka početnoj koti koja je zadata u okviru ulaznih podataka. U slučaju većeg protoka deo poplavnog talasa prihvata se slobodnom zapreminom akumulacije Trebinje, pri čemu se ne povećava otvorenost zatvarača na temeljnim ispustima. Ovakav način upravljanja rezultat je težnje da protok nizvodno od brane Gorica ne bude veći od oko 400 m<sup>3</sup>/s. Ako slobodna zapremina akumulacije Trebinje nije dovoljna da prihvati poplavni talas, pri nivou vode u akumulaciji Trebinje oko 294 mm ili do preporučenih kota za periode vanrednih događaja ili mera predostrožnosti, nastavlja se sa otvaranjem zatvarača temeljnih ispusta i preliva i održavanjem kote u jezeru konstantnom. Ukoliko simulacija pokazuje da će se nivoi u Trebinjskoj akumulaciji podići iznad kote 295 mm (pri maksimalno otvorenim zatvaračima na prelivima i temeljnim ispustima) korisnik programa odmah dobija informaciju da razmatrani poplavni talas nije moguće prihvatiti i retenirati u Trebinjskoj akumulaciji. Tada se ponovo pokreće program 'Ublažavanje poplavnog talasa', kako bi se u novoj iteraciji ispitalo da li se dodatnim prepražnjenjem Bilećke akumulacije može još više povećati njena

zaštitna funkcija. Međutim, to fizički nije moguće u nekim okolnostima, pri ekstremno velikim povodnjima, posebno ukoliko je ekstremno veliki dotok sa međusliva. Tada se talas ublažava do maksimalnih mogućnosti, ali se nadležnim organima Trebinja i Agencije za vode odmah javlja koji se protok  $Q_{max}$  može očekivati na deonici kroz grad.



Slika 6. Presek kroz temeljni ispust brane Gorica

### 3. PROGRAM 'UBLAŽAVANJE POPLAVNOG TALASA'

Da bi se ostvarila najveća moguća operativnost pri upravljanju u periodima povodanja, MM je finalizovan softverskim paketom 'UBLAŽAVANJE POPLAVNOG TALASA'. U njemu je uređena automatska računaska procedura, koja omogućava da se nakon uočavanja pojave poplavnog talasa u roku od nekoliko sekundi pristupi traženju suboptimalnog rešenja upravljanja, po kriterijumu  $Q_{max} \rightarrow \min$ . Takav najstrožiji uslov operativnosti je važan zbog toga da bi se dobilo u vremenu da se što pre izvrše upravljačke aktivnosti koje treba obaviti da bi se minimizirao talas na delu toka kroz Trebinje.

Smisao tog softverskog paketa je da se sve upravljačke odluke o radu Sistema HET-a apriorno proveravaju, pre sprovođenja upravljačkih operacija, i da gotovo trenutno, nekoliko sekundi nakon aktiviranja softvera, upravljački organ dobije upravljačko pravilo koje će, za pretpostavljene sintetičke talase, obezbediti najveće ublažavanje poplavnog talasa na potezu Trebišnjice nizvodno od brane Gorica. Tako visok nivo operativnosti MM je moguć zahvaljujući veoma brzom matematičkom rešavanju tog simulacionog problema i odgovarajućoj organizaciji baza podataka.

Ključni ciljevi softvera su da na najbrži način operateru definiše / predloži sledeće ključne upravljačke odluke:

- vreme i režim uključivanja agregata na sve tri elektrane: HE Trebinje 1, HE Dubrovnik i HE

Trebinje 2, kako bi se odmah prešlo na režim rada u uslovima odbrane od poplava;

- vreme i režim (dinamika) otvaranja i zatvaranja evakuacionih organa na branama Grančarevo i Gorica.

Sve predložene režime rada softver dokumentuje veoma jasnom vizuelnom grafičkom i numeričkom dokaznicom upravljačkih odluka u smislu: kako će izgledati ublažen poplavni talas nizvodno od brane Gorica, na potezu kroz Trebinje, ukoliko se upravljački dosledno sprovedu Modelom preporučene upravljačke odluke.

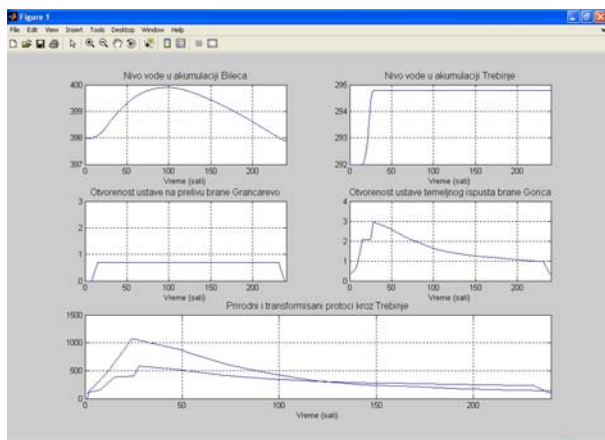
Mada se radi o ozbiljnom softverskom simulacionom problemu - program je napravljen da bude veoma jednostavan za upotrebu u svakodnevnom operativnom radu u dispečerskom centru HET-a, bez uobičajenih analitičkih i drugih mistifikacija koje obično prate složene softverske pakete.

Bazno polazište strategije odbrane od poplava je da se najveći efekti zaštite treba da ostvare adekvatnim radom agregata hidroelektrana, kojima se obezbeđuje i odgovarajuće pretpražnjenje Bilečke akumulacije - sinhronizovano sa upravljačkim operacijama na brani Gorica, kako bi se stvorili što bolji uslovi za prihvatanje talasa. Da bi mogli da prihvate tako važnu ulogu u procesu ublažavanja poplavnih talasa, svi agregati moraju da budu raspoloživi tokom čitavog perioda verovatnih povodnja.

Za operatera je pri izboru talasa olakšavajuća okolnost što postoji mogućnost brze upravljačke korekcije, već nakon naredna dva-tri sata, na bazi praćenja razvoja uzlazne grane hidrograma povodnja. Operator može da započne rad sa jednim talasom i da za njega dobije najpovoljnije upravljanje i odmah započne operaciju njegove realizacije. Prateći iz sata u sat kakav se hidrogram talasa na ulasku u Bilečku akumulaciju stvarno realizuje, operator može u skladu sa novim saznanjima da se nakon tog perioda koriguje, na taj način što će ponoviti računicu sa novim talasom, ukoliko zapazi da je realni ulazni talas bliži tom sintetičkom, pa da u skladu sa tim nastavi sa izvršavanjem korigovanih upravljačkih odluka. Bitna je operativnost: što pre započeti izvršavanje operacija koje su bitne za odbranu od poplava, a zatim se korigovati, u skladu sa sagledavanjem razvoja hidrološke situacije u realnom vremenu. I bitno je *stalno praćenje ulaznog hidrograma u Bilečku akumulaciju*, koji je ključan za naredne upravljačke odluke kako bi se realizovao najveći efekat ublažavanja povodnja.

Nekoliko sekundi nakon unošenja podataka softver daje finalne rezultate: predloženo (sub)optimalno upravljanje, po kriterijumu  $Q_{max} \rightarrow \min$ . Pored numeričkih rezultata grafički se jasno prikazuju sledeći finalni rezultati (slika 7):

- Dijagram promene nivoa vode u akumulaciji Bileća za čitav razmatrani period.
- Dijagram dinamike otvaranja i zatvaranja zatvarača na prelivnim poljima brane Grančarevo.
- Dijagram promene nivoa vode u akumulaciji Trebinje za čitav razmatrani period.
- Dijagram dinamike otvaranja i zatvaranja zatvarača na temeljnim ispuštima brane Gorica.
- Dijagram protoka nizvodno od brane Gorica (kroz grad Trebinje) u prirodnim uslovima (bez akumulacija kojima se ublažava poplavni talas) i protok - poplavni talas nakon transformacije u razmatranim akumulacijama sistema. Taj grafik (primer jednog proračuna je na donjem delu slike 7) je veoma bitan, jer omogućava da se apriorno utvrdi kako će izgledati talas koji će proći kroz Trebinje nakon ublažavanja u uzvodne dve akumulacije, ukoliko se upravlja sistemom po predloženoj proceduri.



Slika 7. Finalni grafički prikaz rezultata (sub)optimizacije upravljanja pri odbrani od poplava

U slučajevima kada je neophodno deo voda evakuisati kroz temeljne ispušte brane Grančarevo i/ili preko

prelivnih polja brane Gorica, prikazuju se još dva dijagrama:

- Dijagram dinamike otvaranja i zatvaranja zatvarača na temeljnim ispuštima brane Grančarevo.
- Dijagram dinamike otvaranja i zatvaranja zatvarača na prelivnim poljima brane Gorica.

#### Povezivanje operativnog i strateškog upravljanja.

Projekat 'Upravljanje akumulacijama i hidroelektranama sistema Trebišnjice' definisao je najpovoljnije (suboptimalno) upravljanje HET-om u četiri upravljačke situacije:

- u normalnim uslovima eksploatacije, kada je dominantan kriterijum upravljanja - maksimizacija energetske efektivnosti sistema;
- u periodima povodanja, kada dominantan kriterijum postaje maksimalno ublažavanje poplavnog talasa;
- u malovodnim i ekološki kriznim situacijama, kada se kao ključno kriterijumsko ograničenje postavlja ispuštanje ekološki prihvatljivog protoka, u skladu sa posebnim projektom koji definiše taj vid upravljanja (metodologija u: *Đorđević i Dašić, 2011*) i (*Knežević i Đorđević, 2012*),
- u uslovima vanrednih događaja i stanja, kada se upravljanje svim objektima sistema podvrgava samo jednom kriterijumu: što brže neutralisanje kriznog događaja / stanja i stabilizacija sistema.

Radi se o složenom zadatku upravljanju u uslovima *konfliktne strategije sa nepotpunom informacijom*. Takav upravljački zadatak Teorije igara je teorijski složen<sup>6</sup>, a u ovom slučaju je problem još znatno složeniji. Naime, zavisno od hidroloških ulaza, stanja u sistemu i u okruženju, u upravljačkoj četvorci  $\langle \Gamma, M, J, L \rangle$  menjaju se prioritetni ciljevi, kriterijumi upravljanja, ograničenja, pa se u skladu sa tim menjaju i matematički modeli koje treba primenjivati u pojedinim fazama upravljanja. Međutim, složenost zadatka je još veća zbog toga što se radi o upravljačkom problemu sa dugim ciklusom upravljanja (regulisanje tokom godinu dana), u kome se upravljačke odluke i njihove realizacije u jednom periodu bitno odražavaju na upravljačke mogućnosti i u znatno udaljenijim intervalima vremena. Npr. povećana pražnjenja

<sup>6</sup> U ovom upravljačkom zadatku postoje četiri 'igrača', svaki sa svojom ciljevima i strategijom: • Priroda, koja prva 'vuče poteze', odnosno, generiše slučajne procese i događaje, • Energetika, koja ima svoje kriterijume upravljanja – maksimizacija proizvodnje. Druga dva 'igrača' dugoročno gledano mogu samo sa nekom verovatnoćom, ili sa funkcijom raspodele da predviđaju procese koje će generisati Priroda. To su: • Vodoprivreda - Odbrana od poplava, koja u kritičnim periodima ima svoje kriterijume upravljanja, koji nisu u saglasnosti sa kriterijumima Energetike, ali koji tada dobijaju apsolutni prioritet; • Zaštita voda, koja je u malovodnim periodima u oponentskom upravljačkom odnosu sa Energetikom, jer zahteva veću zapreminu vode koju treba čuvati u rezervi za krizna malovodna i havarijska stanja. Ispuštanje garantovanog ekološkog protoka i sanacija kriznih ekoloških stanja imaju prioritet.

akumulacije u mesecima povodanja na početku kalendarske godine odražavaju se na efektivnost energetike u kasnijem periodu, jer radi sa nižim kotama i sa manjim radnim zapreminama u akumulaciji, ali se taj uticaj prenosi i na zaštitu voda i ekosistema, jer se smanjuje zapremina vode koja će biti raspoloživa i u kriznim malovodnim periodima.

U takvim složenim uslovima konfliktnih upravljanja, sa povremenim promenama stepena značajnosti pojedinih elemenata u upravljačkoj četvorci, zadatak se može rešiti samo dekompozicijom problema na pojedine vidove upravljanja - energetika, odbrana od poplava, zaštita voda - nakon čega se heurističkom sintezom parcijalnih upravljanja dolazi do dugoročnih pravila upravljanja, u vidu dispečerskih grafika punjenje i pražnjenja akumulacije u čitavom upravljačkom ciklusu od godinu dana. Upravljanje po takvom grafiku predstavlja vid suboptimalnog upravljanja složenim hidrotehničkim sistemom.

U ovom upravljačkom zadatku toj heurističkoj sintezi se pristupilo na sledeći način:

- Energetskim optimizacionim analizama određena su optimalna upravljanja hidroelektranama po kriterijumu energetike - maksimizacija energetske proizvodnje sistema, za sve godine razmatranog hidrološkog niza (1956.-2005.). Određeni su optimalni režimi rada HE Trebinje 1 i 2 i HE Dubrovnik za sve godine razmatranog niza, a kao međurezultat su dobijene i optimalne trajektorije punjenja i pražnjenja Bilečke akumulacije, kao i optimalni režimi nivoa u Trebinjskoj akumulaciji koja služi kao kompenzaciona akumulacija sistema.
- Urađene su raspodele verovatnoća optimalnih stanja Bilečke akumulacije po mesecima. Verovatnoće optimalnih stanja te čone akumulacije su predstavljene u vidu grafika za kalendarsku godinu. To je upravljački veoma vredna informacija, jer definiše potrebnu zakonitost punjenja i pražnjenja akumulacije po kriterijumu optimalne (maksimalne) energetske proizvodnje. Ukoliko se kao granične anvelope usvoje linije koje spajaju verovatnoće pojave optimalnih stanja od 10% - kao gornja anvelopa dijagrama, i verovatnoće 90% - kao donja anvelopa, dobija se jasno definisan pojas optimalnih stanja akumulacije unutar koga treba održavati trajektoriju stanja tokom eksploatacije u realnom vremenu. Taj dijagram, prikazan na slici 8 omogućava da se dugoročno upravlja sistemom po kriterijumu maksimizacije proizvodnje. Uočavaju se neke karakteristične zakonitosti te dugoročne strategije upravljanja (slika 8):

○ Potrebno je što potpunije koristiti raspoloživ korisni prostor Bilečke akumulacije za godišnje regulisanje, operativno u opsegu kota 364÷400 mnm.

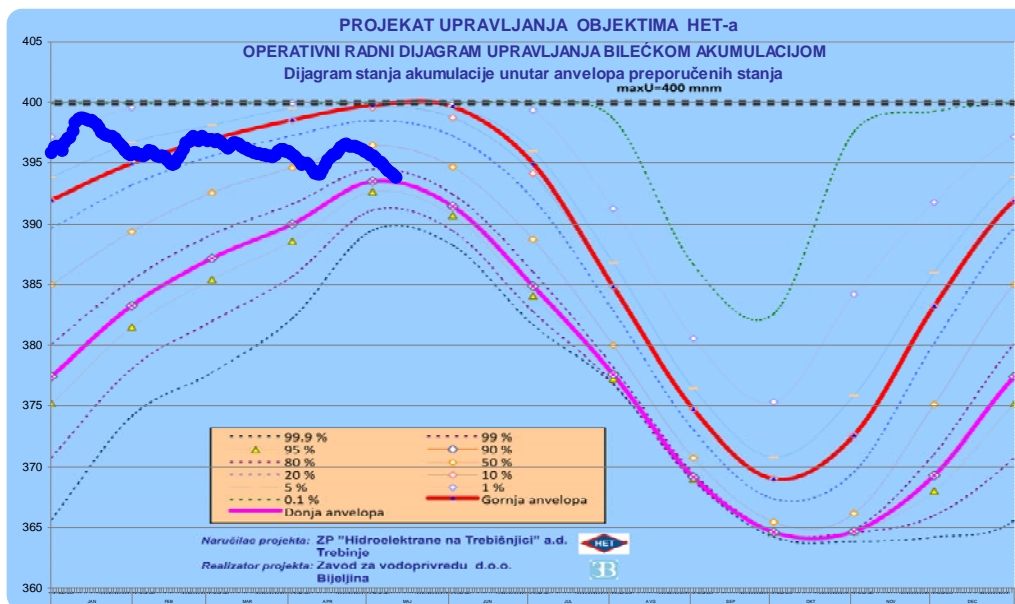
○ Na početku perioda povodanja (sredina oktobra, početak novembra) treba održavati niža stanja u akumulaciji, što je u saglasnosti sa kriterijumom Odbrane od poplava.

○ Upravljanjem u realnom vremenu treba održavati trajektoriju stanja unutar 'optimalnog koridora' kojeg čine verovatnoće optimalnih stanja 10% i 90%, a u slučaju prekoračenja (izlaska stanja iz tog koridora) upravljanjem u narednim koracima treba se što pre vratiti opet unutar tih anvelopa. Prikazan deo trajektorije stanja (debela plava linija na slici 8) pokazuje da je tendencija pražnjenja na početku godine bila opravdana, da bi se iz zone visokih nivoa stanje vratilo u optimalni koridor. Međutim, uočava se da se nakon toga sa pražnjenjem preteralo, te je dosegnuta donja anvelopna linija, zbog čega je potrebno da se u narednom periodu manje forsiranim pražnjenjem stanje ponovo približi liniji koja označava verovatnoću optimalnih stanja 50%.

○ Akumulaciju treba puniti sve do kraja maja meseca, do nailaska sušnog perioda, a zatim zapreminu akumulacije treba koristiti prema preporučenoj dinamici.

○ Optimalno upravljanje po kriterijumu zaštite voda i saniranja havarijskih situacija preporučuje da se na kraju ciklusa pražnjenja kota u Bilečkoj akumulaciji ne spušta ispod 364 mnm (donja tačka da donjoj anvelopi), kada se u rezervi nalazi još oko  $230 \times 10^6 \text{ m}^3$ , koji predstavljaju dragocenu energetska i vodoprivrednu rezervu, za slučaj nepredviđeno nepovoljnih hidroloških i energetska situacija (npr. neuobičajen produžetak malovođa i u poznom jesenjem periodu).

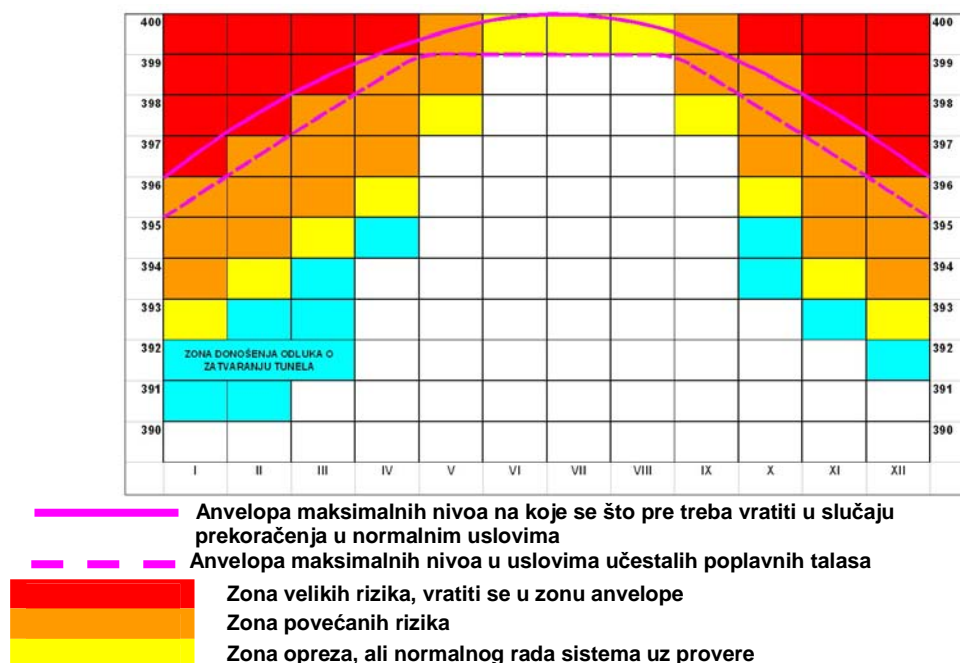
• Na osnovu brojnih simulacionih analiza upravljanja Bilečkom akumulacijom u periodu pojave povodanja, sagledane su mogućnosti i zakonitosti ublažavanja talasa. Na osnovu tih analiza izvršeno je uopštavanje u vidu operativnog dijagrama (slika 9). Dijagram je namenski, za upravljanje u periodu kada dominantan postaje kriterijum zaštite od poplava. Definisane su dve anvelopne linije. Gornja definiše zonu ispod koje treba održavati stanje (nivo) akumulacije u normalnim uslovima, kada nema pojave uzastopno povezanih talasa. Rezervna zapremina koja se ostvaruje tom anvelopnom linijom obezbeđuje uspešnu transformaciju svih talasa, i onih iz kategorije 'V' (veliki talasi), čime se grad Trebinje uspešno štiti od povodanja. Međutim, pošto se javljaju ekstremno nepovoljne hidrološke situacije, kada dolazi do učestalije pojave povodanja i



Slika 8. Operativni dijagram za godišnje upravljanje Bilečkom akumulacijom

nadovezivanja jednog talasa na drugi – definisana je i druga anvelopna linija, ispod koje se treba spuštati čim se završi sa propuštanjem jednog talasa. Vidi se (slika 9) da se u tom drugom slučaju održava nešto veća dodatna rezervna zapremina i da se izvesna rezerva zadržava čak

i na kraju uobičajenog perioda prestanka javljanja talasa velikih voda. Takav pristup, sa dve anvelopne linije, na najbolji način miri kriterijume energetike i odbrane od poplava.



Slika 9. Preporučene kote u Bilečkoj akumulaciji samo sa stanovišta zaštite od poplava, sa preporučenim maksimalnim nivoima koje ne bi trebalo prekoračivati

• Formiranjem navedena dva radna dijagrama dobijena je konsenzusna strategija dugoročnog operativnog upravljanja Bilečkom akumulacijom. U normalnim okolnostima eksploatacije optimalno upravljanje je ono kojim se trajektorija stanja akumulacije održava u granicama koridora na dijagramu na slici 8. Stalno se prate gradijenti promene trajektorije stanja. Ukoliko se realizovanom trajektorijom nivoa presecaju 'probabilistički nivoi' prema gore, to znači da se akumulacija prebrzo puni, i da se može ići na forsiranje korišćenje agregata. Obrnuto, ako realizovana radna trajektorija ima gradijente ubrzanog približavanja donjoj anvelopi, znači da se radi o forsiranijem radu od poželjnog, koji nije primeren smanjenoj vodnosti u tom periodu, te rad elektrana treba prilagoditi tako da se trajektorija realizovanih nivoa ponovo približi probabilističkom nivou 50%.

## ZAKLJUČCI

Osavremenjavanje upravljanja primenom modela za upravljanje u realnom vremenu omogućava da se znatno povećaju učinci višenamenskih akumulacija. To osavremenjavanje, koje se može nazvati kibernetizacijom sistema, odnosi se na: • povećanje operativnosti merno-informacionog sistema da se može koristiti za upravljanje u realnom vremenu, • izradu operativnog matematičkog modela Estimatora ulaza u sistem, i • poboljšanje algoritma za odlučivanje u bloku Donošenja upravljačkih odluka (DUO na slici 2).

Dok se merno-informacioni sistem ne osposobi da može da prikuplja informacije o svim komponentama vektora ulaza ( $x$ ) u realnom vremenu (padavine, protoci, promene stanja pijezometara, itd.) koji su potrebni da bi se Estimator koristio kao prognostički model, značajno poboljšanje upravljanja se može ostvariti efikasnim korišćenjem Estimatora kao simulacionog modela. Realizacijom vrlo brzog simulacionog modela za estimaciju ulaza za generisanje ulaznih serija koje se mogu očekivati, uključujući i one koje predstavljaju 'pesimističke procene', može se rešiti zadatak suboptimizacije upravljanja, što dovodi do značajnog poboljšanja efektivnosti sistema i pouzdanosti upravljačkih odluka. Takav postupak se zasniva na brojnim simulacijama raznih upravljanja i proverama izlaza iz sistema, kako bi upravljački organ još pre donošenje odluke imao jasan uvid u to kakav će se izlaz realizovati ukoliko se za određeni simuliran ulaz primeni odgovarajuće upravljenje.

Za sistem akumulacija i hidroelektrana na Trebišnjici (HET) urađen je projekat upravljanja, čiji je jedan od najvažnijih delova projekat upravljanja u uslovima pojave povodanja. Nakon detaljne analize geneze talasa velikih voda, napravljen je vrlo operativan simulacioni model. Softver omogućava da se na osnovu podataka o trenutnom stanju akumulacija i usvajajući predložene vrednosti o režimima rada, vrlo brzo, u roku od nekoliko sekundi nakon saznanja da se formira povodanj, dobije predlog najpovoljnije upravljačke opcije, po kriterijumu minimizacije maksimuma ublaženog talasa na deonici kroz Trebinje. To je, u suštini, suboptimalno rešenje za tu simuliranu hidrološku situaciju. Vrlo pregledno, grafički na monitoru i numerički, definiše se kako treba da rade agregati i kojom dinamikom treba da se otvaraju evakuacioni organi na obe brane. I što je vrlo važno, softver pokaže kako će izgledati ublažan talas na deonici kroz grad Trebinje, ukoliko se odmah počne sa primenom predloženog upravljanja. Softver je adaptivan, tako da se upravljačke odluke mogu stalno poboljšavati u skladu sa dobijanjem novih informacija o obliku i veličini ulaznih talasa. Na taj način se ostvaruje najveće ublažavanje poplavanog talasa i najuspešnija aktivna zaštita grada Trebinja u takvim hidrološkim okolnostima. Razvojem Estimatora za prognozu talasa povodanja efekat zaštite će se postepeno poboljšavati – pod uslovom da se zaustavi gradnja u vodnom dobru.

Da bi se omogućilo efikasno operativno upravljanje tokom godine, jer se radi o upravljačkim odlukama koje imaju veliku vremensku inerciju (upravljačke odluke na početku godine odražavaju se na efektivnost sistema tokom narednih meseci), urađene su optimizacione analize koje su pretočene u vrlo pregledne dispečerske dijagrame, čijim se korišćenjem realizuje uspešan upravljački kompromis između tri ključna korisnika HET-a: energetike, odbrane od poplava i zaštite voda.

Pokazalo se da je neophodno da se slični upravljački modeli realizuju i na drugim velikim akumulacijama, posebno onim na objektima brana iznad naselja i rečnih dolina kojima se sada upravlja bez matematičkih modela. Rad bez modela stvara vrlo opasnu mogućnost da se nespretnim upravljenjem ustavama generišu talasi koji bi bili i veći i opasniji od prirodnih talasa.

## LITERATURA

- [1] Đorđević, B. (1990): Vodoprivredni sistemi, Naučna knjiga, Beograd

- [2] Djordjević, B. (1993): *Cybernetics in Water Resources Management*, WRP, USA, 1993.
- [3] Đorđević, B i T.Dašić (2011): Određivanje potrebnih protoka nizvodno od brana i rečnih vodozahvata, *Vodoprivreda*, 252-254, str. 151-164
- [4] Đorđević, B. i T.Dašić (2011): *Water storage reservoirs and their role in the development, utilization and protection of catchment*, Spatium
- [5] Jovanović, M. i drugi (2009): Kartiranje rizika od poplava, *Vodoprivreda*, 237-239, str.31-46
- [6] Kaladžisalihović, H. i A.Bibović (2011): Numerički model poplavnog vala na rijeci Neretvi, *Vodoprivreda*, 252-254, str.189-196
- [7] Knežević, B. i B.Đorđević (2012): Metoda 'MABIS' kao podrška odlučivanju pri izboru ekološki prihvatljivih protoka, *Vodoprivreda*, 255-257
- [8] Pavlović, D. i V.Vukmirović (2010): Statistička analiza maksimalnih kratkotrajnih kiša metodom godišnjih ekstrema, *Vodoprivreda*, 246-248, str.137-148
- [9] Prohaska, S. i A.Ilić (2010a): Nova metoda za definisanje višestruke koincidencije poplavnih talasa na složenim rečim sistemima, *Vodoprivreda*, 246-248, str. 125-136
- [10] Prohaska, S. i A.Ilić (2010b): Nova metoda za proračun uslovnih verovatnoća pojave katastrofalnih poplava i suša u istoj kalendarskoj godini, *Vodoprivreda*, 246-248, str.149- 156
- [11] Vukmirović, V. (2010): Analiza kiše metodom parcijalnih serija, *Vodoprivreda*, 243-245, str.7-16

## INCREASE OF THE EFFECTIVENESS OF THE RESERVOIRS DURING THE FLOOD CONTROL - ON THE EXAMPLE OF TREBIŠNJICA HYDROSYSTEM -

by

Branislav ĐORĐEVIĆ<sup>1</sup>, Tina DAŠIĆ<sup>1</sup>, Nedeljko SUDAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Civil Engineering, Belgrade

<sup>2</sup> Institute for Water Resources Management, Bijeljina

### Summary

As a consequence of the more extreme hydrological phenomena (increasing of high water and reduction of low water regimes and extension of their duration) water storage reservoirs get demanding requirements to be used for active defense against flooding and to improve the low water regimes. The possibilities for better flood control in multipurpose systems with water storage reservoirs through the development of Estimation block and better control algorithm in Control decision-making block are analyzed in the paper. As a part of modernization of management process for Trebišnjica Hydrosystem a 'Management of water

storage reservoirs and hydropower plants of Trebišnjica Hydrosystem' was prepared. An important part of that design is mathematical simulation model in the period of high water flows which gives the best solution, according to the criterion of maximal transformation/reduction of flood wave. The model defines the most appropriate conditions in the reservoirs during the year, enabling the optimization of long-term management of the water supply and energy criteria.

Key words: reservoirs, flood wave, flood control with water storage reservoirs, mathematical modeling

Redigovano 24.07.2012.