

MOGUĆNOSTI AKTIVNE ODBRANE OD POPLAVA UPRAVLJANJEM UZ PRIMENU MATEMATIČKIH MODELA - NA PRIMERU AKUMULACIJE BOČAC NA VRBASU -

Tina DAŠIĆ¹⁾, Branislav ĐORĐEVIĆ²⁾, Nedeljko SUDAR³⁾, Vujadin BLAGOJEVIĆ³⁾

¹⁾ Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, ²⁾ Akademija inženjerskih nauka Srbije,

³⁾ Zavod za vodoprivredu, Bijeljina

REZIME

Sistemi zaštite od poplava spadaju u klasu najvažnijih, najvitalnijih sistema koje čovek gradi, jer su vezani za ciljeve opstanka, rasta i razvoja ljudskog društva. Zato su ti sistemi u stalnom razvoju, kako sa stanovišta dograđivanja i rekonstrukcije objekata, tako i sa gledišta neprekidnog usavršavanja mera operativnog upravljanja tokom perioda velikih voda. Sistemi zaštite od poplava daju najveće efekte kada se spregnuto, integralno koriste sve tri grupe mera: (a) pasivne mere zaštite linijskim sistemima zaštite (nasipi, prateći sistemi odvođenja unutrašnjih voda), (b) aktivne mere zaštite primenom akumulacija i retenzija, kojima se smanjuju vršni delovi talasa velikih voda, (c) neinvesticije mere planskog uređenja teritorije kojima se sprečava građenje neprikladnih objekata u plavnim zonama, kako bi se zaustavio porast potencijalnih šteta od poplava. Povećanje operativnosti i tačnosti hidrometeoroloških prognoza i razvoj informaciono-računarske tehnologije, stvorio je mogućnosti da se znatno operativnije i uspešnije koriste akumulacije za aktivnu zaštitu – smanjivanjem vršnih delova talasa velikih voda.

U radu se prikazuju mogućnosti primene upravljačkih matematičkih modela za ublažavanje poplavnih talasa. Model je razmatran na akumulaciji Bočac na Vrbasu sa nedeljnim regulisanjem protoka. Pokazalo se da se namenskim upravljanjem samo radom hidroelektrane mogu uz odgovarajuću prognozu vrlo uspešno ublažiti talasi češćih povratnih perioda (2, 5 i 10 godina). Ukoliko su prognoze nailaska velikih padavinskih ciklona operativne, sa prognozom od par dana unapred (savremene metode meteoroloških osmatranja i prognoziranja to već omogućavaju), primenom upravljačkog modela, koji omogućava fleksibilno upravljanje radom agregata HE, preliva sa ustavama i temeljnog ispusta, moguće je blagovremenim obaranjem

nivoa vode u akumulaciji uspešno ublažiti i talase ređih verovatnoća sa povratnim periodima 50 i 100 godina (na Bočcu stogodišnja velika voda se smanjuje za preko 200 m³/s). Akumulacija je mala da bi mogla da utiče na talase veoma retkih pojava (0,2% i ređe). Vrlo bitna su tri opšta zaključka: (1) pri projektovanju brana čije će se akumulacije koristiti i za zaštitu od poplava, veoma je važno da se predvide snažni evakuatori (temeljni i srednji ispusti) čiji kapaciteti omogućavaju elastičnu kontrolu nivoa, obaranjem nivoa pre nailaska poplavnog talasa, (2) tendencija povećavanja instalisanosti priborskih HE sa godišnjim regulisanjem (odnos Q_{inst}/Q_{sr} do oko 6) pogoduje aktivnoj zaštiti od poplava; (3) simulacioni i optimizacioni matematički modeli, uz dobre meteorološke prognoze velikih padavinskih ciklona, mogu se uspešno primenjivati za aktivnu odbranu od poplava čak i akumulacije manjih relativnih zapremina, u slučaju Bočca sa nedeljnim regulisanjem protoka. Akumulacije sa godišnjim regulisanjem u tom pogledu daju znatno povoljnije rezultate.

Ključne reči: zaštita od poplava, aktivna odbrana, akumulacije, reka Vrbasa, akumulacija i HE Bočac

UVOD

U skladu obavezama iz Direktive EU o proceni i upravljanju rizicima od poplava (*Directive 2007/60/EC of the European parliament and the council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks*) države i za vode nadležni državni entiteti rade detaljne studije – planove upravljanja rizikom od poplava. U Republici Srpskoj 2019. godine završen je uz podršku Vlade Republike Srpske i UNDP 'Plan upravljanja rizikom od poplava za sliv rijeke Vrbasa Republike Srpske' (obrađivači: *Zavod za vodoprivredu, Bijeljina & Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo Građevinskog fakulteta u Beogradu*). To je

prvi takav celovit planski dokument i tokom njegove izrade su ostvareni značajni istraživački prodori i izvučena su veoma dragocena metodološka i naučna iskustva, koja će pomoći da se kvalitetno urade takvi vrlo važni planovi i za ostale slivove. U ovom članku se prikazuju neka metodološka iskustva koja omogućavaju izvlačenje zaključaka opštijeg karaktera, koji se odnose na mogućnosti primene matematičkih modela za efikasnu, fleksibilnu aktivnu odbranu od poplava.

Ciljevi svih sistema koje ljudi grade mogu se svrstati u tri grupe ciljeva: opstanak, rast i razvoj. Te grupe ciljeva su međusobno povezane, ali ciljevi opstanaka imaju apsolutni prioritet u odnosu na ostale dve grupe ciljeva. Vodoprivredni sistemi su upravo najosetljiviji, najvitalniji, jer najvećim delom rešavaju probleme – opstanaka, ali od njih odlučujuće zavise i ciljevi rasta i razvoja. U okviru te grupe ciljeva jedan od apsolutnih prioriteta pri vrednovanju ljudskih potreba i vrednosti ima sigurnost ljudi od prirodnih stihija, pre svega od rušilačkog delovanja vode koja ugrožava ljudske živote i materijalna dobra. Zbog toga su sistemi zaštite od poplava najvitalniji, najosetljiviji sistemi koje čovek gradi. To je zakonitost koja postoji od najstarijih tzv. hidrotehničkih civilizacija, koje su svoj svekoliki razvoj zasnivale na građenju, dobrom održavanju i stalnom unapređenju sistema zaštite od poplava.

Sistemi zaštite od poplava tokom svog razvoja, koji se nikada ne okončava, postaju sve složeniji, prostorno sve veći, integralniji. Obuhvataju tri grupe mera: (a) linijske, pasivne mere zaštite, koje se zasnivaju na linijskim sistemima zaštite – nasipima i pratećim sistemima za odvodnju unutrašnjih voda sa branjene teritorije; (b) mere aktivne zaštite, koje su veoma važne, jer se akumulacijama i namenskim retenzijama, ali i upravljački fleksibilnim kanalskim sistemima (primer je HS DTD u Banatu sa sistemom ustava) kontrolišu smerovi tečenja i nivoi u prirodnoj i veštačkoj hidrografiji, kako bi se aktivno uticalo na ublažavanje poplavnih talasa; (c) planske i administrativne mere zaštite, koje su dugoročno gledano veoma važne i veoma delotvorne, jer se planskim i administrativnim merama sprečava izgradnja neprikladnih objekata u plavnim, ugroženim zonama, tako da se na taj način smanjuje rast potencijalnih šteta od rušilačkog delovanja voda.

Ne bi bilo smisljeno vagati koje su mere važnije. Nesporno je da se najefikasnija zaštita od poplava ostvaruje kroz njihovo integralno delovanje, kada se simultano primenjuju sve tri grupe mera. Taj postulat postaje nesporniji i važniji sa pogoršavanjem vodnih režima, što se već očituje bržom koncentracijom talasa

velikih voda i većim vrednostima vrhova talasa (što je delom posledica i klimatskih promena, ali i ljudskih aktivnosti na slivu, *Doocy i saradnici, 2013*). Sasvim je izvesno da plansko-administrativne mere zaštite imaju trajni karakter i moraju da budu deo državne strategije razvoja i disciplinovanog planskog korišćenja prostora, sprečavanjem građenja na poplave osetljivih objekata u zonama koje su ugrožene. Upravo se zbog tih razloga i izrađuju planski dokumenti – planovi upravljanja rizikom od poplava za slivove, jer moraju da budu sastavni deo svih ostalih odluka o korišćenju prostora u ugroženim zonama. Njihov osnovni cilj je da se ne dopusti dalji porast potencijalnih šteta od poplava, već ograničavanje rasta potencijalnih šteta njihovo smanjivanje nakon pojedinih faza namenskog uređenja prostora - da bude što manje ranjiv na poplavne događaje.

Hronološki gledano, najpre su se gradili linijski sistemi zaštite od poplava, izgradnjom nasipa i drenažnih sistema koji su ih nužno pratili, kao mera zaštite od unutrašnjih i provirnih voda na branjenom području. Međutim, sa razvojem naselja i porastom značajnosti i vrednosti dobara u branjenim područjima, i sa sve oštrijim ograničenjima u prostoru, u sisteme zaštite od velikih voda su počeli da se uključuju i objekti za aktivnu zaštitu (za ublažavanje poplavnih talasa). Neki od takvih objekata, u vidu velikih retenzija, građeni su u Mesopotamiji i u dolini Nila još u vreme faraona. Tako je pored Fajume, u donjem toku Nila, pre oko 5000 godina iskorišćena kriptodepresija za formiranje retenzije – jezera za kontrolisanje visine poplave. Jezero El Qarun i sada postoji.

Tokom XX veka, sa masovnijim građenjem brana i akumulacija, uvek se, kao jedan od vrlo važnih ciljeva, zahtevalo i njihovo aktivno delovanje na ublažavanje poplavnih talasa. Taj cilj je u nekim okolnostima bio i jedan od prioriteta, npr. pri planiranju akumulacija u okviru projekata New Deal u slivu reke Tenesi. U brojnim slučajevima već su se pri planiranju sistema određivali posebno rezervisani prostori u akumulacijama, čija je namena bila isključivo ublažavanje poplavnih talasa. Često su pri realizaciji višenamenskih akumulacija definisani i kriterijumi u smislu: kojih verovatnoća javljanja treba da budu talasi koji će se u celosti prihvatiti i retenzirati u akumulaciji. U okviru projekta akumulacija u slivu Velike Morave (70-tih godina XX veka) taj kriterijum je bio zahtev da se potpuno prihvati talas verovatnoće 2%, tzv. pedesetogodišnji talas velike vode. Taj kriterijum bi se mogao prihvatiti i sada, ali se pokazalo da su tadašnji kriterijumi za kapacitet temeljnih ispusta (Q_{isp}) bili dosta

konzervativni, vrlo 'škrti' ($Q_{isp}=3 \cdot Q_{sr}$), tako da su ti veoma važni organi za ublažavanje poplavnih talasa sada nedovoljni i predstavljaju 'usko grlo' za fleksibilnije i uspešnije korišćenje tog prostora, prema principima iz sledećeg pasusa.

U slučaju rezervisanog prostora za prijem poplavnih talasa ne retko je pravljena jedna strateška upravljačka greška, zahtevom da se ta zapremina mora da stalno drži praznom, 'za slučaj iznenadne pojave poplavnog talasa'. Takvo kruto i dogmatsko upravljačko rešenje nije dobro, jer se na taj način značajno umanjuju proizvodne performanse tih dragocenih višenamenskih akumulacija. Sada se uviđa, posebno imajući u vidu mnogo pouzdanije i operativnije prognoze padavina, i mnogo bolje, pouzdanije i računski brže matematičke modele prognoze formiranja talasa velikih voda, da je znatno bolja strategija upravljanja vodama da se i taj prostor u kome će se obavljati retenziranje talasa koristi fleksibilno, i za druge korisnike. To podrazumeva mogućnost da se pri punjenju akumulacije dozvoli delimičan i upravljački kontrolisan ulazak i u taj prostor, a da se pri prognozi nailaska talasa velike vode brzo izvrši pretpražnjenje akumulacije za efikasnije prihvatanje i retenziranje talasa. Preduslov za to je da se na brani predvide i ugrade snažni evakuatori – temeljni i srednji ispusti, koji omogućavaju da se u skladu sa sve uspešnijim hidrometeorološkim prognozama formiranja i pojave poplavnih talasa, može da izvrši pretpražnjenje akumulacije, čim se dobije informacija da se približava padavinski ciklon koji će dovesti do formiranja talasa velikih voda. Upravo na tom ispravnom principu je koncipirana dispozicija i rad hidročvora HE Bočac.

SLIV VRBASA I OBJEKTI NA NJEMU

Reka Vrbasa, desna pritoka Save, sa slivom od 6.273 km², (63,5% sliva pripada Republici Srpskoj, 36,5% je u FBiH) – druga je po veličini sliva u celosti domicilna reka BiH, posle reke Bosne (10.457 km²). Izvire na Vranici na oko 1715 m nadmorske visine i uliva se u Savu kod Srbca na visini od 90 mnm. Ukupna dužina vodotoka od izvora do ušća je 248 km (131 km protiče kroz Republiku Srpsku), a prosečan pad glavnog toka je znatan i iznosi oko 6,92 m/km. Oko 90% sliva odlikuje planinski reljef, dok je oko 10% sliva u ravnici, u Lijevcem Polju i Skopaljskoj dolini. Vrbasa drenira karstne oblasti (najizraženije u slivovima Plive i Crne Rijeke), pa se granice orografskog i hidrografskog sliva često ne poklapaju. Uzvodno od Banja Luke Vrbasa prolazi kroz kanjon i brojne klisure, koji su zaštićeni zakonom o zaštiti prirodnih vrednosti.

Hidrografska mreža je relativno razvijena. Najveće pritoke (imajući u vidu veličine slivova) su Pliva (1325 km²), Vrbanja (804 km²), Janj (419 km²), Ugar (367 km²), Krupa (328 km²). Sve te pritoke su opasne sa gledišta mogućnosti superponiranja poplavnih talasa sa onim na glavnom toku, ali je među njima najopsanija Vrbanja, koja na neposredan način pri povodnjima čak i ne preterano retkih verovatnoća javljanja ugrožava Banja Luku. Zbog dosta velikih poduznih padova reka, kao i zbog uskih dolina i kanjona pogodnih za koncentraciju pada branama i tunnelskim derivacijama, reka Vrbasa je najviše hidroenergetski iskorišćena među pritokama Save. U njenom središnjem delu toka izgrađene su četiri hidroelektrane (HE), idući prema nizvodno: HE Jajce 1, HE Jajce 2, HE Bočac i HE Bočac 2 (slika 1). Tri HE su protočne, praktično bez mogućnosti regulisanja protoka, a samo HE Bočac - akumulaciona HE sa nedeljnim regulisanjem – ima mogućnosti izvesnog poboljšavanja vodnih režima namenskim upravljanjem nivoima u akumulaciji, radom hidroelektrane i upravljanjem evakuacionim organima. Podaci o karakterističnim veličinama akumulacija na postojećim objektima data je u tabeli 1.

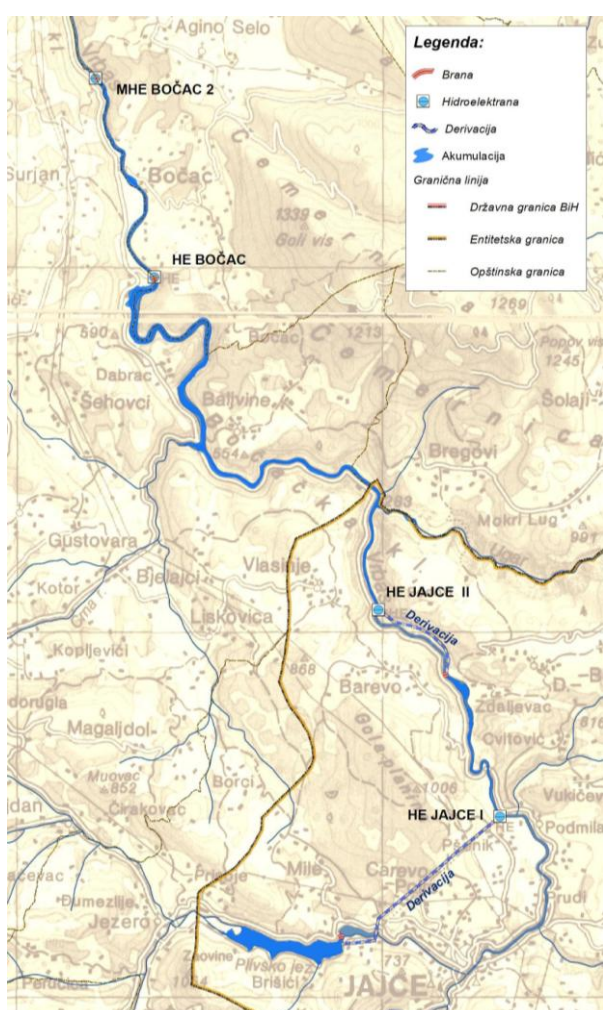
Tabela 1. Karakteristične vrednosti postojećih akumulacija

Akumul.	Q_{sr} (m ³ /s)	V_{kor} (10 ⁶ m ³)	β (-)	Q_{HE} (m ³ /s)	T_{HE} (h)
Jajce I	44	4,2	0,003	74	15,76
Jajce II	66	2,1	0,001	79,8	7,3
Bočac	78,4	42,9	0,017	240	49,65
Bočac 2	80,97	2,6	0,001	110	6,56

β - koeficijent izravnjanja ($\beta=V_{kor}/V_{uk}$), Q_{HE} - instalirani protok hidroelektrane; T_{HE} - vreme za koje se može isprazniti korisna zapremina akumulacije samo radom HE (bez dotoka vode u akumulaciju)

Od ukupno oko 10.028 GWh potencijala vodnih snaga na rekama u Republici Srpskoj, iskorišćeno je 2.986 GWh. Tehnički potencijal na slivu Vrbasa iznosi oko 1.633 GWh, dok je iskorišćeno samo oko 350 GWh (HE Bočac: 308 GWh, HE Bočac 2: 42 GWh), od čega se najveći deo (1383 GWh) nalazi u hidroelektranama snaga većih od 10 MW. Imajući u vidu povoljne orografske osobenosti sliva Vrbasa i morfologiju rečnih dolina sa kanjonima, strateškim planskim dokumentima (Strategija upravljanja vodama u Republici Srpskoj, *Zavod za vodoprivredu, 2015*) na slivu Vrbasa kao prioritarna potencijalna postojanja izdvajaju se dve HE u okviru kaskade na srednjem toku Vrbasa - HE "Krupa" i HE "Banja Luka - niska". Ta dva objekta, sa pribranskim elektranama, mogu se uspešno uklopiti u okruženje i kao sistem predstavljaju značajan razvojni projekat Republike Srpske. Potez nizvodno od

Banja Luke može se rešiti kaskadom energetskih objekata sa malim padovima, pri čemu je moguća racionalna izvedba tih postrojenja, primenom tipizacije opreme i građevinskih elemenata, kako bi se realizovali u seriji. Realizacija tih niskih stepenica bi omogućila da se uspostavi plovni put do industrijske zone Banja Luke. U Strategiju upravljanja vodama Republike Srpske na donjem toku reke Vrbas predviđena je kaskada od četiri pribranske HE (Trn, Laktaši, Kosjerevo i Razboj) gotovo istih karakteristika: instalisani protoka $210 \text{ m}^3/\text{s}$, bruto pada 12 m, instalisana snaga 85,7 MW, sa prosečnom godišnjom proizvodnjom na svakom od postrojenja od skoro 90 GWh.

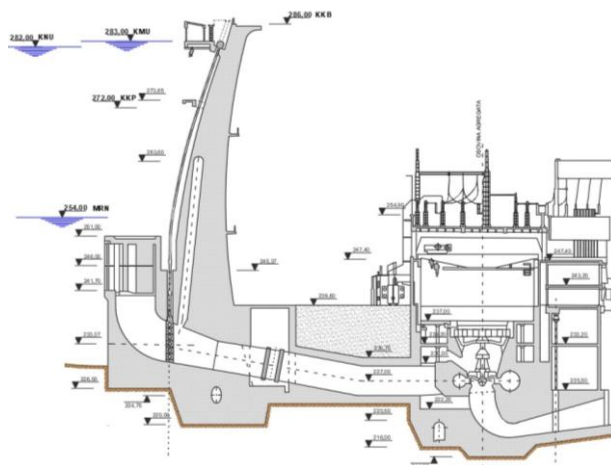


Slika 1. Srednji deo toka Vrbasa sa položajem četiri postojeće HE

Iz navedenih podataka se vidi da je akumulaciono pribransko postrojenje HE Bočac jedini objekat koji se može koristiti za aktivnu odbranu od poplava. Daju se najvažniji podaci o tom objektu.

Brana i akumulacija Bočac. Brana Bočac je smeštena u kanjonskom delu reke Vrbas između gradova Jajce i Banja Luka (km 109+400). Građena je od 1979. do 1981. godine kao višenamenski objekat, ali sa primarnom hidroenergetskom namenom. Brana je betonska lučna dvostruko zakrivljena, građevinske visine 66 m. Kota krune brane je 286 mnm, dužina u kruni 221,38 m. Srednji višegodišnji protok Vrbasa na mestu brane iznosi $78,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Branom je formirano akumulaciono jezero dužine oko 17,5 km, površine pri KNU $25,79 \text{ km}^2$, srednje dubine 22,6 m. Kota normalnog uspora u akumulaciji iznosi KNU = 282 mnm, a kota maksimalnog uspora 283 mnm. Ukupna zapremina akumulacije iznosi $52,1 \times 10^6 \text{ m}^3$, od čega je korisna zapremina $42,9 \times 10^6 \text{ m}^3$. Prvo punjenje obavljeno 1981. godine. Definisane su dve vrednosti minimalnog radnog nivoa: minimalni dnevni radni nivo sa vrednošću od 279,6 mnm i ekstremno minimalni radni nivo 254 mnm. Akumulacija omogućava nedeljno regulisanje protoka.

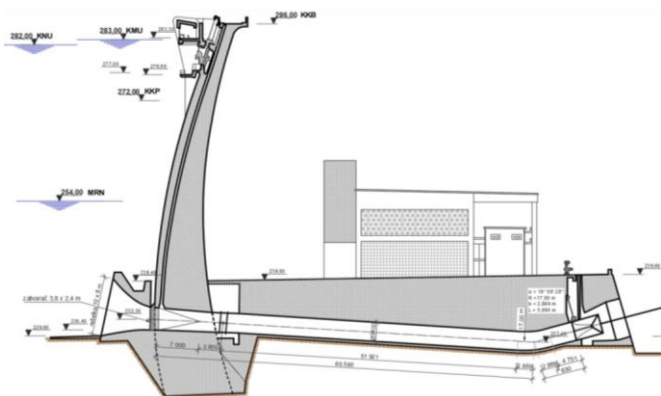
Hidroelektrana Bočac. Hidroelektrana je rešena kao pribransko postrojenje, sa mašinskom zgradom (MZ) neposredno nizvodno od brane (slika 2). Instalirane su dve Fransisove turbine sa vertikalnim vratilom, $Q_{\text{inst}} = 2 \times 120 = 240 \text{ m}^3/\text{s}$, instalirane snage $2 \times 55 = 110 \text{ MW}$. Kota DV pri radu dve turbine ($Q_{\text{inst}} = 240 \text{ m}^3/\text{s}$) je 228 mnm, pri radu jedne turbine 227,22 mnm. Maksimalna kota DV pri evakuaciji $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ je 235,6 mnm. Energetska vrednost akumulacije za maksimalnu kotu (283 mnm) $E = 5,32 \text{ GWh}$. Normalni bruto pad $H_{\text{nor}} = 53,86 \text{ m}$, maksimalni pad $H_{\text{max}} = 54,86 \text{ m}$, minimalni radni pad $H_{\text{min}} = 51,46 \text{ m}$. Prosečna godišnja proizvodnja iznosi $E_{\text{sr}} = 307,5 \text{ GWh/god}$.



Slika 2. Presek kroz agregat HE Bočac

Evakuacioni organi. Hidročvor brane Bočac ima tri evakuaciona organa: preliv kontrolisan ustavama na desnom boku brane, temeljni ispust i slobodni preliv na levom boku brane. Takva dispozicija je uslovljena činjenicom da je tokom eksploatacije postrojenja ustanovljeno, na osnovu dodatnih hidroloških analiza, da je preliv sa ustavom nedovoljno dimenzionisan ($Q_{\text{prel.ust}} = 1345 \text{ m}^3/\text{s}$), pa je odlučeno da se hidraulička pouzdanost brane poveća izgradnjom dodatnog slobodnog preliva kapaciteta $Q_{\text{sl,prel}} = 567 \text{ m}^3/\text{s}$. Najvažnije radne performanse ovih evakuacionih organa su sledeće.

Preliv sa ustavama. Tip: bočni sa segmentnim ustavama, dva prelivna polja $2 \times 10 \text{ m}$, visina ustave 10 m , kota praga preliva $KPP = 272 \text{ mnm}$, kapacitet preliva pri koti 283 mnm $Q_{\text{prel}} = 1345 \text{ m}^3/\text{s}$, odvod tunelom prečnika $8,6 \text{ m}$, kota izlaznog praga prelivnog tunela $228,2 \text{ mnm}$.



Temeljni ispust. Temeljni ispust (slika 3) je u desnom boku brane. Na ulazu u cevovod temeljnog ispusta je sigurnosni tablasti zatvarač, dimenzija $2,4 \times 3,8 \text{ m}$, koji pokreće servo motor koji su nalazi u zoni krune brane. Kota osovine ulaza temeljnog ispusta nalazi se na $232,3 \text{ mnm}$, prečnik cevovoda je $3,40 \text{ m}$, a njegova dužina 72 m . Na kraju ispusta nalazi se konični (disperzioni) zatvarač prečnika $2,8 \text{ m}$. Prema hidrauličkom proračunu, za maksimalnu otvorenost zatvarača i nivo vode u akumulaciji na 283 mnm , temeljni ispust može da propusti protok od $127 \text{ m}^3/\text{s}$. Tokom analiza mogućnosti upravljanja pokazalo se da je veoma povoljna okolnost što je odabran temeljni ispust velikog kapaciteta, jer on, zajedno sa kapacitetom HE, omogućava fleksibilnije upravljanje nivoima u akumulaciji i bolje efekte ublažavanja talasa u periodima aktivne odbrane od poplava.



Slika 3. Temeljni ispust na brani Bočac

Slobodni bočni preliv na levom boku brane je realizovan da bi se povećala hidraulička pouzdanost brane pri ekstremno velikim poplavnim talasima. Sastoji se od jednog prelivnog polja širine 55 m , oblika prilagođenog terenu. Kota krune preliva je 283 mnm , a kapacitet preliva pri nivou vode u akumulaciji na 286 mnm je $567 \text{ m}^3/\text{s}$. Voda se dalje evakuše tunelom prečnika 9 m , a kota izlaznog praga tunala je $228,2 \text{ mnm}$.

HE Bočac 2. HE Bočac je planirana da radi kao regulaciona elektrana, u vršnom režimu, sa mogućim naglim ulascima u pogon i brzim promenama opterećenja. Zbog toga je nizvodno od HE Bočac sagrađen kompenzacioni bazen, sa sledećim ciljevima: ▪ smanjenje oscilacija protoka i nivoa nizvodno od HE Bočac, čime joj se omogućava slobodan režim rada, prema potrebama EES; ▪ otklanjanje mogućnosti

nastajanja pozitivnih čeonih talasa na nizvodnom potezu Vrbasa pri naglim primenama opterećenja agregata HE Bočac; ▪ stvaranje mogućnosti da se ispušta ekološki protok koji je propisan u iznosu $Q_{\text{ep}} = 17 \text{ m}^3/\text{s}$. Pregradni objekat kompenzacionog bazena nalazi se na udaljenosti od oko 7.450 m nizvodno od brane Bočac (stacionaža $\text{km } 36+250$). Srednji godišnji protok u profilu kompenzacionog bazena iznosi $80,97 \text{ m}^3/\text{s}$. Pregradni objekat visok je oko 25 m . Prelivni deo smešten je u središnjem delu brane sastoji se od dva prelivna polja, sa kotom krune preliva na 219 mnm , koja su opremljena segmentnim zatvaračima dimenzija $11,15 \times 9 \text{ m}$. Kota krune brane je na 231 mnm , a kota normalnog uspora 228 mnm . Maksimalan radni nivo je $227,8 \text{ mnm}$, a minimalni radni nivo $224,3 \text{ mnm}$. Zapremina kompenzacionog bazena iznosi $2,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. U periodu pre izgradnje MHE Bočac 2 protok nizvodno

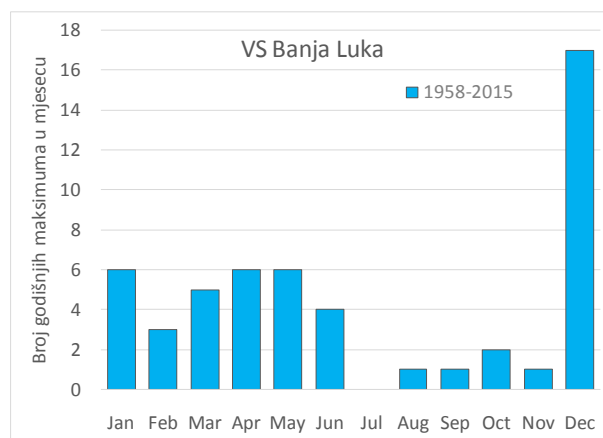
od pregradnog objekta regulisan je radom ustava i to: sa simetričnim podizanjem ustava regulisao se protok do $360 \text{ m}^3/\text{s}$, dok je pri nesimetričnom podizanju ustava bilo moguće regulisati protok do $240 \text{ m}^3/\text{s}$. Za veće protoke ustava su se potpuno podizale. Nulta otvorenost ustava u tom periodu iznosila je 13 cm, čime se propuštao protok od $7,14 \text{ m}^3/\text{s}$ pri nivou u kompenzacionom bazenu od 220 mm, do $26,38 \text{ m}^3/\text{s}$ kada je nivo na koti normalnog uspora (228 mm). Kapacitet preliava pri koti normalnog uspora iznosi $1.080 \text{ m}^3/\text{s}$, a maksimalni kapacitet, pri koti 230 mm, iznosi $1.450 \text{ m}^3/\text{s}$.

Taj objekat je iskorišćen za realizaciju MHE Bočac 2, koja je puštena u rad 2018. godine. MHE Bočac 2 je priborsko postrojenje smešteno uz levi bok brane, između saobraćajnice i prelivnih polja. Sastoji se od ulivnog kanala, zahvata, dovodnih kanala sa prelaznom deonicom, mašinske zgrada i odvodne vade. U mašinskoj zgradi nalaze se dva kapsulna agregata (agregati sa horizontalnim Kaplanovim turbinama) sa dvostrukom regulacijom, kako bi u širokom opsegu protoka radile sa visokim koeficijentima korisnog dejstva. Pri izboru agregata vodilo se računa o ekološkom protoku koji se ispušta nizvodno od pregradnog objekta ($20 \text{ m}^3/\text{s}$, jer je to minimalni protok kroz turbinu sa prihvatljivo visokim koeficijentom korisnog dejstva), pa je minimalni protok turbine određen iz tog uslova. Instalirani protok MHE Bočac 2 je $2 \times 55 \text{ m}^3/\text{s}$, snaga 8,76 MW, a prosečna godišnja proizvodnja energije 41,6 GWh.

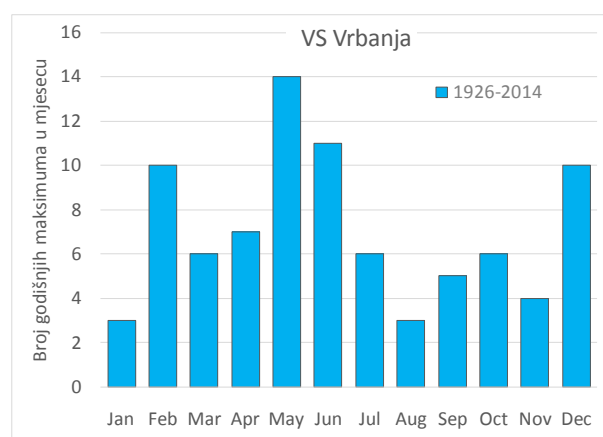
TALASI VELIKIH VODA ZA ANALIZU AKTIVNE ODBRANE OD POPLAVA

U radu (Topalović, 2018) urađena je detaljna analiza formiranja talasa u slivu Vrbasa, na bazi analize padavina velikih intenziteta raznih verovatnoća javljanja. U okviru Plana upravljanja rizikom od poplava za sliv rijeke Vrbas (Zavod za vodoprivredu, 2019), ta analiza je novelirana i dopunjena.

Imajući u vidu dominantno planinsku orografiju sliva i neravnomerne padavine, često sa velikim intenzitetom, vodni režimi Vrbasa su neravnomerni, bujični. Prosečne godišnje padavine variraju od 800 mm pri ušću Vrbasa u Savu, do oko 1500 mm na južnom planinskom delu sliva. Prosečan višegodišnji protok Vrbasa je oko $Q_{sr}=132 \text{ m}^3/\text{s}$, a prosečni specifični oticaj oko $20,7 \text{ L/s}\cdot\text{km}^2$. Prosečni koeficijent oticaja je oko 0,59. Minimalni protoci se spuštaju i na samo oko 10% od Q_{sr} , dok se protoci velikih voda verovatnoće 1% penju i na preko 10 puta u odnosu na Q_{sr} .



Slika 4. Učestalost pojave godišnjih Q_{max} na Vrbanji



Slika 5. Učestalost pojave godišnjih Q_{max} na Vrbanji

Analiza učestalosti pojave maksimalnih godišnjih protoka po mesecima, urađena je za dve VS na Vrbanji (Banja Luka i Han Skela) (slika 4 za VS Banja Luka), kao i za Vrbanju (slika 5), izrazito bujični tok koji dodatno ugrožava Banja Luku. Ta analiza pokazuje različite režime velikih voda. Zapaža se da se na Vrbanji maksimalni protoci najčešće javljaju u hladnom delu godine (najučestalije u decembru), dok se na Vrbanji najveći protoci javljaju u prolećnim mesecima (najčešće u maju i junu), ali je učestalost pojava Q_{max} visoka i u decembru i februaru. Najnepovoljniji hidrološki događaj za grad Banja Luku je koincidiranje talasa na Vrbanji i Vrbanji. Tada se umešnim upravljanjem akumulacijom Bočac može smanjiti Q_{max} na Vrbanji, ali se ništa ne može da uradi na Vrbanji, jer nije izgrađena ni jedna od tri akumulacije koje su na njoj predviđene. Zbog toga opasnost po grad Banja Luku dolazi iz praca Vrbanje, kao izrazito bujičnog vodotoka (slika 8), čiji su režimi velikih voda znatno pogoršani zbog nekontolisanosti

devastacije šuma. To treba imati u vidu u svim daljim strateškim planiranjima pouzdane zaštite Banja Luke.

Hidrogrami poplavnih talasa različitih povratnih perioda (20, 50, 100 i 500 godina) određivani su primenom hidrološkog modela zasnovanog na simulaciji računskih kišnih epizoda. Kao ulazni su korišćeni podaci o proticajima na 14 vodomernih stanica u slivu, kao i podaci o padavinama na samo 3 meteorološke stanice na čitavom slivu (Banja Luka, Bugojno i Jajce). Za izradu hidrološkog modela korišćen je programski paket MIKE NAM. Simulacioni model je kalibrisan i proveravan sa odabranim periodima dužine 8 i 6 godina, respektivno. Simulacijama modela kišnih epizoda sa računskim kišama dobijeni su hidrogrami oticaja velikih voda traženih povratnih perioda. U cilju provere rezultata, izvršeno je poređenje sa kvantilima dobijenim statističkom analizom osmotrenih proticaja, kao i proticaja iz kontinualne simulacije modela. Urađana je i analiza verovatnoće pojave maksimalnih proticaja korišćenjem metode godišnjih ekstrema, a najpogodnijom se pokazala raspodela Pearson III.

U naporu da se simulacioni MM učini što pouzdanijim razmatrana su dva scenarija, prema obuhvatu vremena trajanja kiša na meteorološkim stanicama (MS):

- Scenario 1 - merodavno trajanje kiše je 24 h na svim MS.
- Scenario 2 - merodavno trajanje kiše na MS Bugojno i Jajce je 12 h, dok je na MS Banja Luka 24h.

Visine računskih kiša različitih povratnih perioda na navedene tri MS i za opisana dva scenarija razmatrani su u radu (Topalović, 2018). Za izradu mapa opasnosti i rizika od poplava na slivu reke Vrbas u BiH (Blagojević, 2018) usvojeni su merodavni scenariji za pojedine delove sliva: • Scenario 2 - za deo sliva reke Vrbas uzvodno od Banja Luke (tj. od ušća reke Vrbanje u Vrbas), uključujući i sliv reke Plive, • Scenario 1 - za deo sliva reke Vrbas nizvodno od Banja Luke, uključujući i sliv reke Vrbanje. Pored navedenih talasa velikih voda koji su urađeni sa vremenskom diskretizacijom od 24 sata, u hidrološkom modelu urađena je i dodatna hidrološka analiza sa vremenskim korakom od 6 sati, za talase povratnog perioda 2, 5, 10, 20, 50, 100 i 500 godina.

MATEMATIČKI MODEL UPRAVLJANJA AKUMULACIJOM

Tečenje u otvorenim kanalima (prirodni i veštački vodotoci, akumulacije), u opštom slučaju, opisuje se diferencijalnim Saint Venant-ovim jednačinama nestacionarnog tečenja:

- Jednačina kontinuiteta:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

- Dinamička jednačina:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \frac{\partial z}{\partial x} + g \cdot A \cdot I_e = 0$$

Za analizu propagacija talasa u akumulaciji uvode se pretpostavke koje se bitnije ne odražavaju na tačnost rezultata, a omogućavaju veoma operativne, brze proračune:

- zanemaruju se inercijalni član i član koji obuhvata uticaj promene brzine, a koji su u slučaju akumulacija znatno manji od ostalih članova,
- pretpostavlja se da je nivo vode u akumulaciji horizontalan, što znači da se zapremina vode u akumulaciji i proticaj mogu direktno izraziti preko nivoa vode,
- zanemaruje se vreme prostiranja poremećaja kroz akumulaciju, odnosno pretpostavlja se da se ulazni dotok raspoređi po celoj zapremini akumulacije u jednom proračunskom koraku.

U skladu sa tim, jednačina održanja mase za akumulaciju može se napisati u sledećem obliku:

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_{\text{dot}}(t) - Q_{\text{izl}}(t)$$

gde je $Q_{\text{dot}}(t)$ – dotok u akumulaciju (protok ulaznog talasa) u trenutku t , $Q_{\text{izl}}(t)$ – protok izlaznog talasa u trenutku t , koji je funkcija nivoa vode u akumulaciji u odgovarajućem trenutku, pa se može definisati kao: $Q_{\text{izl}}(t) = Q_{\text{izl}}(H(t))$

Diskretizacijom diferencijalne jednačine za izabrani vremenski korak Δt dobija se sledeća jednačina:

$$\frac{\Delta V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t} = \frac{Q_{\text{dot}}(t + \Delta t) - Q_{\text{dot}}(t)}{2} - \frac{Q_{\text{izl}}(t + \Delta t) - Q_{\text{izl}}(t)}{2}$$

Ova opšta relacija korišćena je i za određivanje transformacije poplavnog talasa u akumulaciji Bočac, odnosno za određivanje promene zapremine, a zatim i isticanja iz akumulacije. Imajući u vidu složenu konfiguraciju hidročvora Bočac, sa četiri moguća izlaza u i -tom intervalu vremena (agregati HE - $\bar{Q}_{\text{HE},i}$, preliv sa ustavama - $\bar{Q}_{\text{PU},i}$, temelji ispust - $\bar{Q}_{\text{TI},i}$, slobodni preliv - $\bar{Q}_{\text{SP},i}$) podrobnije se razrađuju relacije modela:

- Bilansna jednačina za akumulaciju Bočac:

$$\frac{\Delta V_{B,i}}{\Delta t} = \bar{Q}_{\text{dot}}(t) - \bar{Q}_{\text{HE},i}(H_{B,i}) - \bar{Q}_{\text{PU},i}(H_{B,i}) - \bar{Q}_{\text{TI},i}(H_{B,i}) - \bar{Q}_{\text{SP},i}(H_{B,i})$$

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

gde su:

- $\Delta V_{B,i}$ - promena zapremine u i-tom intervalu vremena u akumulaciji: $\Delta V_{B,i} = V_{B,i} - V_{B,i-1}$
- Δt - vremenski interval proračuna, koji je za većinu proračuna iznosio: $\Delta t = 1$ čas, ali je za pojedine talase proračun urađen i sa manjim vremenskim korakom
- $H_{B,i}$ – nivo vode u akumulaciji Bočac u i-tom trenutku
- \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), odnosno rada HE. Promena protoka (u razmatranom intervalu) funkcija je samo promene nivoa vode u akumulaciji Bočac $H_{B,i}$.

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

Indeksi: HE – hidroelektrana, PU – preliv sa ustavama, TI – temeljni ispust, SP – slobodni preliv

- Izlazni protok nizvodno od brane Bočac:

$$Q_{Bz,i} = Q_{HE,i}(H_{B,i}) + Q_{PU,i}(H_{B,i}) + Q_{TI,i}(H_{B,i}) + Q_{SP,i}(H_{B,i})$$

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

Da bi se sagledale mogućnosti ublažavanja talasa velikih voda urađeno je više simulacija, za različite vrednosti ulaznih podataka. Ulazni podaci koji su varirani:

- Početni nivo vode u akumulaciji ($H_{B,0}$).
- Nivo pri kom se počinje sa otvaranjem ustava na bočnim prelivima ($H_{B,U}$).
- Nivo do koga je dozvoljeno spustiti nivo vode u akumulaciji ($H_{B,min}$).
- Nivo na kome je potrebno zadržati vodu nakon prolaska poplavnog talasa ($H_{B,K}$).
- Vremenski korak podizanja ustave najkraći je 1 h, a moguće ga je povećati, ukoliko je to poželjno je sa gladišta upravljanja.

Proračun je sproveden pod sledećim pretpostavkama:

- Podizanje ustava počinje u trenutku kada nivo u akumulaciji raste i kada je nivo veći ili jednak nivou $H_{B,U}$.
- Hod ustave (visina za koju se ustava podiže u jednom ciklusu podizanja) je 0,5 m.

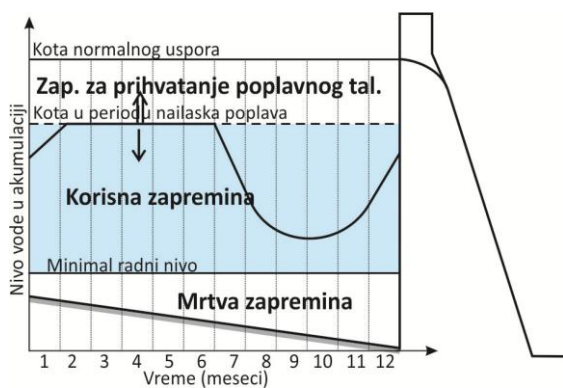
- Podizanje se obavlja po sledećem rasporedu: prvo se podiže samo ustava bliža brani (ustava sa klapnom) do visine od 2 m, zatim počinje otvaranje i druge ustave. Dalje se ustave otvaraju naizmenično.
- Temeljni ispust se otvara samo u slučaju kada su obe ustave potpuno podignute.
- Slobodni preliv počinje da radi pri nivoima u akumulaciji iznad 283 mnm (kota krune preliva). Postojanje slobodnog preliva omogućava fleksibilnije i pouzdanije upravljanje u periodu odbrane od poplava.
- Traži se takvo upravljanje da nivo vode u akumulaciji ne pređe kotu 282 mnm, ako je takvo upravljanje moguće.

UPRAVLJANJE AKUMULACIJAMA U PERIODIMA ODBRANE OD POPLAVA

Strategija upravljanja višenamenskim akumulacijama u uslovima nailaska velikih voda u potpunosti se razlikuje od strategije upravljanja u uslovima normalnog rada. Pored ove analize to pokazuju i istraživanja obavljena za potrebe zaštite RiTE Gacko u slivu reke Mušnice (Dašić, 2016), upravljanjem akumulacijama Vrba i Klinje. U uslovima normalnog rada HE Bočac radi kao vršno postrojenje, ulazeći u pogon po nekoliko sati u toku dana, prema zahtevima EES. Tada je uloga kompenzacionog bazena da izravna neravnomeran protok kroz korito reke Vrbas na nizvodnom delu toka, posebno kroz Banja Luku. Zbog toga nizvodno od kompenzacionog bazena i MHE Bočac 2, treba da se ispušta približno konstantna količina vode tokom dana, bilo kroz agregate MHE Bočac 2 ili preko preliva. Akumulacije i hidroelektrane na uzvodnom delu sliva (HE Jajce I i Jajce II) rade prema definisanim režimima: Jajce II kao protočno postrojenje, a rad HE Jajce I podređeno je održavanju konstantnog nivoa u Velikom Plivskom jezeru.

Pri najavi nailaska velikih padavina i pojave talasa velikih voda strategija upravljanja se menja i podređuje prioritetu – odbrani od poplava. Tada se upravljačke odluke o režimu punjenja i pražnjenja akumulacije Bočac mogu tretirati i kao dualni optimizacioni zadatak iz Teorije igara (Dorđević, 1990) sa dva 'igrača' - korisnika akumulacije, koji imaju međusobno dijametralno suprotstavljene kriterijumske zahteve. Prvi korisnik tog sistema je HE Bočac, koja teži da pad sa kojim radi bude što veći, kako bi iskorišćenje energije bilo veće. Da bi se taj cilj ostvario teži se da se akumulacija Bočac što brže puni pri povodnjima, a da se zatim kote u jezeru održavaju na što višim nivoima (sa

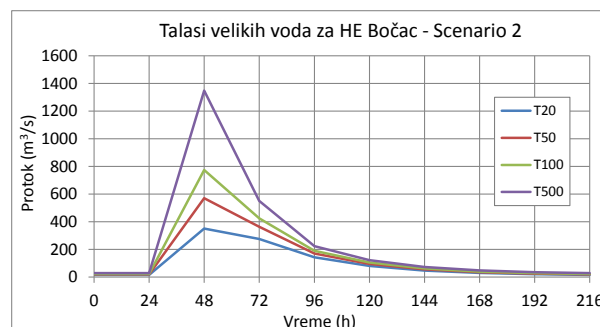
što većim zapreminama akumulisane vode), što znači da se kote u jezeru održavaju, kada je god to moguće, na koti bliskoj radnom nivou: $H = 281$ mm. [Analize rada HE Bočac pokazuje da se nivoi najučestalije nalaze u opsegu kota 279,6 mm do 281,5 mm]. Drugi korisnik višenamenske akumulacije je aktivna zaštita od poplava. Njen kriterijum je sasvim suprotan: da bi se ostvarilo što veće retenziranje (ublažavanje) poplavnih talasa postavlja se kriterijumski zahtev da se akumulacija prazni u periodima kada postoji opasnost od pojave talasa velikih voda. Taj dualni problem sukoba interesa dva korisnika šematski je prikazan na slici 6. Uočavaju se dve suprotne strategije: • hidroenergetika je zainteresovana da se dijagram punjenje i pražnjenja akumulacije pomera ka višim kotama, tj. većim akumulisanim zapreminama vode (smer interesa označen sa \Rightarrow), • smer interesa aktivne odbrane od poplava je sasvim suprotan – poželjno je veće pražnjenje akumulacije (obaranje kota) i pomeranje dijagrama punjenja tokom vremena u smeru koji obezbeđuje da se u što većem broju meseci održavaju niske kote (smer interesa označen sa \rightarrow). U kriznim periodima odbrane od poplava prioritetan postaje kriterijum odbrane, tako da se tokom prolaska talasa rad HE mora da podredi interesima zaštite nizvodnih područja.



Slika 6. Sukobljeni interesi za režime punjenja i pražnjenja akumulacije sa dva korisnika: hidroenergetika (smer interesa: \Rightarrow) i aktivna zaštita od poplava (smer interesa: \rightarrow)

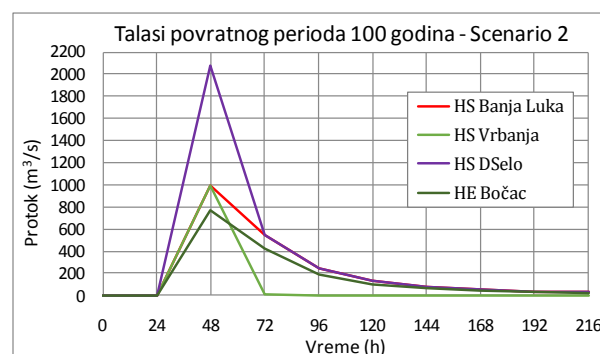
Analiza mogućnosti ublažavanja poplavnog talasa u akumulaciji Bočac analizirana je za oba navedena scenarija padavina. Za profil brane HE Bočac prema scenariju 2 dobijaju se nepovoljniji talasi - većih zapremina, većeg maksimalnog protoka, uz kraće vreme koncentracije. U početnim fazama prognoze padavina raspolaže se samo sa okvirnim sumama dnevnih padavina, pa se analiza (za oba scenarija) može raditi uz

pretpostavku linearne promene protoka. Talasi različitih povratnih perioda, u skladu sa padavinama određenih verovatnoća javljanja, prikazani su na slici 7, gde su sa T20, T50, T100 i T500 prikazani talasi čiji je povratni period naveden broj godina uz T (T500 talas koji se javlja jednom u 500 godina (verovatnoća prevazilaženja 0,2%). U slučaju preciznijih prognoza padavina, simulacioni model može da simulira hidrograme talasa velikih voda sa diskretizacijom na po 6 sati.



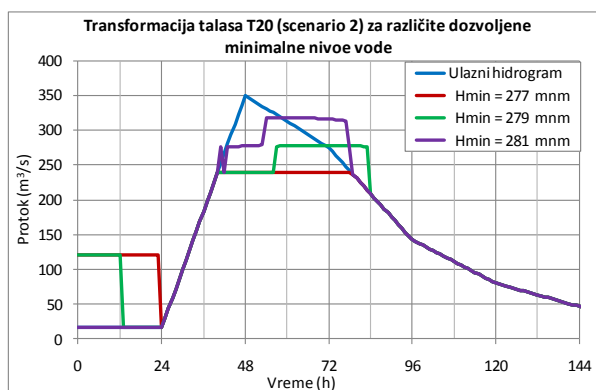
Slika 7. Talasi velikih voda različitih povratnih perioda, prema scenariju 2, profil HE Bočac

Da bi se sagledao čitav opseg mogućnosti akumulacije Bočac, nazavisno od strategije punjenja i pražnjenja koja će biti usvojena, razmatran je širok opseg kota u akumulaciji sa kojih počinje proces prihvatanja talasa velike vode. Smisao te analize je bio da se sagledaju mogućnosti akumulacije na planu aktivne zaštite od poplava. U tom ispitivanom opsegu razmatrane su kote do kojih je dozvoljeno pražnjenje akumulacije u intervalu od 260 mm do 281 mm (kada je akumulacija na radnoj koti). Početne kote zadavane su samo uslovno u cilju analize, jer uslov koji propisuje maksimalnu promenu nivoa vode u jezeru od 2 m/dan (koje je definisano Vodnom dozvolom) ograničava mogućnost prepražnjenja sa određene kote.



Slika 8. Talasi velikih voda povratnog perioda 100 godina (scenario 2), za nekoliko karakterističnih profila u slivu reke Vrbas

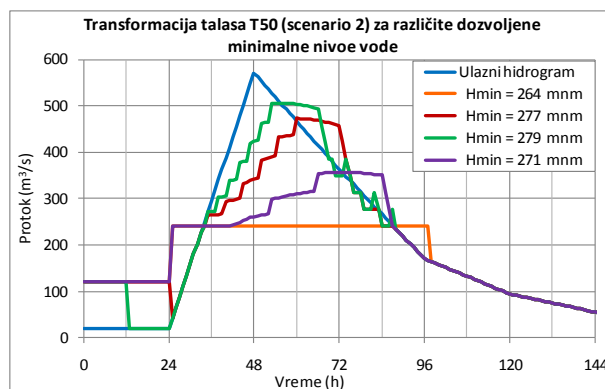
Navode se neki vrlo bitni zaključci te analize. Talas velike vode povratnog perioda 20 godina može se u potpunosti retenzirati, ako se nivo vode u akumulaciji spusti do kote 277 mnm (slika 9). To je nivo do koga se može spustiti nivo vode u normalnom radu. Sniženje nivoa do kote 277 mnm (ako je nivo na radnom nivou 281 mnm) moguće je postići ako jedan agregat radi svojim punim instalisanim kapacitetom 24 h. Značajno ublaženje poplavnog talasa moguće je i u slučaju sniženja nivoa vode do kote 279 mnm. Do ove kote bi bilo moguće spustiti nivo vode u akumulaciji uz ograničenja definisana vodnom dozvolom (maksimalno sniženje nivoa vode od 2 m u toku 24 h), tj. ako je nivo u akumulaciji u početnom trenutku bio na koti od oko 281 mnm. Maksimalan protok bi se u tom slučaju mogao smanjiti sa maksimalnih 350 m³/s na 278 m³/s, znači za oko 70 m³/s. Čak i u slučaju nailaska talasa na 'punu' akumulaciju (ako se nivo vode ne spušta ispod kote 281 mnm), moguće je prihvatiti talas tako da nivo ne pređe kotu od 282 mnm. Pik talasa se u tom slučaju smanjuje samo za 30 m³/s.



Slika 9. Transformacija talasa povratnog perioda 20 godina (scenario 2) za različite vrednosti dozvoljenog sniženja nivoa vode u akumulaciji, akumulacija Boćac

Talas velike vode T50 (pedesetogodišnja voda) se može vrlo značajno ublažiti ukoliko se nakon prognoze nailaska padavina akumulacija pripremi za prijem poplavnog talasa koji će se formirati u slivu (slika 10). Ako se nailazak talasa najavi samo jedan-dva dana ranije, a nivo vode u akumulaciji je na radnom nivou (281 mnm) bilo bi moguće smanjiti maksimalan protok za oko 100 m³/s (sa 571 na 473 m³/s) uz spuštanje nivoa vode na kotu 277 mnm (što je nivo vode do koga se može spustiti nivo vode u normalnom radu, bez saglasnosti dispečera). Vodnom dozvolom omogućeno je spuštanje nivoa vode u akumulaciji do kote od 271 mnm uz saglasnost dispečera. Ako bi se poplavni talas pravovremeno najavio i kota se spustila do te vrednosti

bilo bi moguće značajno retenziranje poplavnog talasa. Maksimalni protoci mogli bi se smanjiti za preko 200 m³/s, uz kašnjenje pojave pika talasa za približno jedan dan. Pomeranje pika talasa je veoma delotvorno sa gledišta zaštite Banja Luke i nizvodnog dela toka Vrbasa, jer se još više udaljavaju jedan od drugog pikovi Vrbanje i Vrbasa, jer vrh talasa Vrbanje vremenski prethodi u odnosu na vrh talasa Vrbasa. Jedan od pozitivnih efekata aktivne odbrane od poplava je upravo i to - da se transformacijom talasa smanje nepovoljni efekti superponiranja visokih protoka talasa. Potpuno retenziranje talasa velike vode 2% bilo bi moguće kada bi se nivo u akumulaciji spustio do kote 264 mnm. U tom slučaju bi se talas mogao propustiti nizvodno samo radom hidroelektrane.



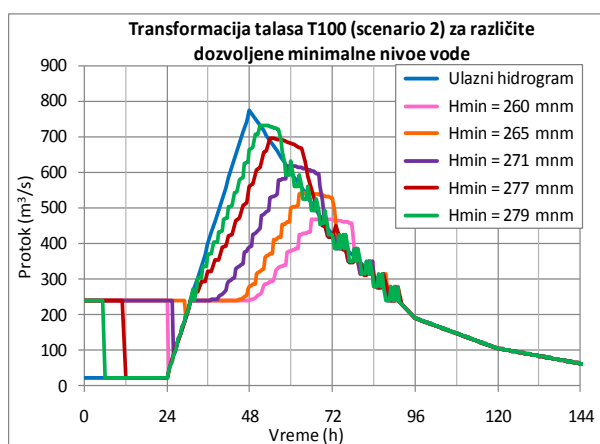
Slika 10. Transformacija talasa povratnog perioda 50 godina (scenario 2) za različite vrednosti dozvoljenog sniženja nivoa vode u akumulaciji, akumulacija Boćac

Mogućnost ublažavanja talasa stogodišnje vode su ograničenije (slika 11). Gradijenti povećanja protoka su veliki i iznose skoro 200 m³/s za 6 h. Mogućnost retenziranja tog talasa ispitivana je za dva slučaja:

1. kada se upravlja tako da nivo vode u akumulaciji ne prelazi kotu od oko 282 mnm,
 2. kada se dozvoljava prelivanje preko slobodnog preliva (koji je na koti 283 mnm), odnosno, kada je dozvoljeno povećavanje nivoa u akumulaciji do kote 284 mnm.
- Za oba slučaja ispitivana je mogućnost retenziranja za različite stepene pretpražnjenja akumulacije.

U prvom slučaju (maksimalna dozvoljena kota u akumulaciji oko 282 mnm), ako se u periodu pretpražnjenja dozvoli sniženje nivoa vode do 277 mnm pik talasa se veoma malo smanjuje, samo za oko 80 m³/s (oko 10%), ali se dostizanje maksimalnih protoka odlaže za oko 6 h. Većim pretpražnjenjem, do kote 271 mnm, postiže se smanjenje pika za oko

150 m³/s (oko 20%), uz njegovo odlaganje za oko 12 h. Veće pretpražnjenje, naravno, omogućava bolje retenziranje talasa velikih voda, uz veće odlaganje pojave njegovog pika na nizvodnom delu (slika 11). Proračuni su sprovedeni i za slučaj opreznijeg podizanja ustava na prelivnim poljima i povećavanja nivoa vode preko 283 mm, odnosno aktiviranja slobodnog preliva. Iako su maksimalni protoci retenziranih talasa u tim slučajevima nešto manji, gradijenti povećanja protoka u periodima aktiviranja slobodnog preliva su nepovoljni, znatno veći od gradijenata ulaznog talasa, što može biti veoma nepovoljno za nizvodno područje.

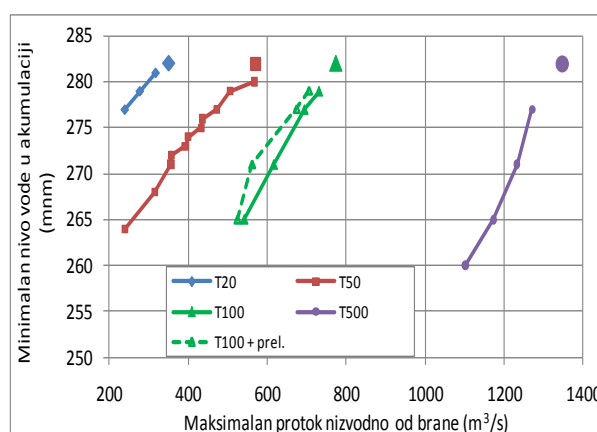
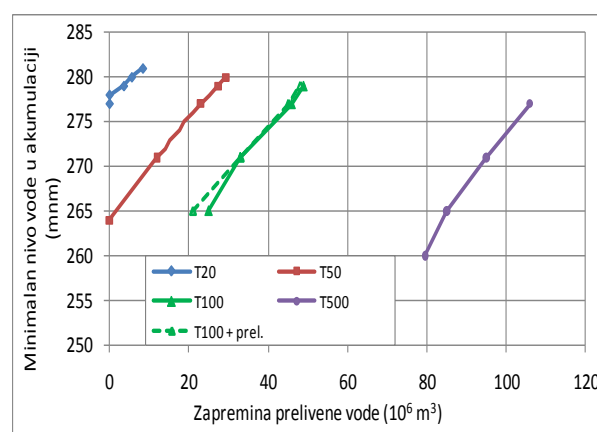


Slika 11. Transformacija talasa povratnog perioda 100 godina (scenario 2) za različite vrednosti dozvoljenog sniženja nivoa vode u akumulaciji, akumulacija Bočac

Za poplavni talas verovatnoće prevazilaženja 0,2% (T500) gradijenti promene protoka su izrazito veliki, preko 55 m³/s za 1 h. U takvim uslovima neophodno je značajno sniženje nivoa vode u akumulaciji. Jedna varijanta upravljanja u takvoj kriznoj situaciji je da se nivo spusti ispod kote 272 mm, da se otvori temeljni ispušni i podignu ustave na prelivnim poljima, čime se omogućava slobodno preliivanje preko preliva sa ustavama. U tom slučaju maksimalni protoci se smanjuju za oko 130 m³/s (oko 10%), a pik talasa se pomera za 4 h, uz gradijente promene protoka koji su slični ulaznom talasu. Nivo vode u akumulaciji, u tom slučaju, ne prelazi kotu 280 mm, tako da su sve instalacije na brani potpuno bezbedne. Pored ovog, mogući su i drugi načini upravljanja u zavisnosti od maksimalnih dozvoljenih kota u akumulaciji.

Objedinjeni prikaz efekata akumulacije dat je na slici 12 na kojoj su prikazani maksimalni protoci nizvodno od brane i zapremine prelivene vode u funkciji minimalne kote vode u akumulaciji sa kojom se obavlja prihvatanje

talasa. Vidi se da je moguće realizovati dosta dobro retenziranje manjih talasa povratnog perioda do 20 godina. Uz adekvatnu najavu padavina (bar jedan dan ranije) moguće je izvršiti pretpražnjenje tako da nema prelivene vode, a maksimalan protok odgovara instalisanom protoku HE (240 m³/s). Prihvatanje većih poplavnih talasa u velikoj meri je ograničeno uslovom da se nivo vode u akumulaciji u jednom danu može spustiti najviše za 2 m. Zbog toga je neophodno praćenje meteoroloških prilika, posebno padavina velikog intenziteta. Njihova najava od oko 2-3 dana ranije (ostvarljivo i u sadašnjim uslovima), uz brzo reagovanje, ostavlja mogućnost da se nivo vode u akumulaciji spusti za 6 - 8 m (na kotu 275-273 mm) koja omogućava dosta dobro retenziranje talasa T50 i T100.



Slika 12. Zapremine vode i maksimalni protoci nizvodno od brane, za različite minimalne nivoe u akumulaciji ('+ prel.' označava da se radi o vrednostima dobijenim uz aktiviranje preliva, a maksimalni protoci ulaznih talasa prikazani su većim markerima)

Za talas T500 mogućnost retenziranja su veoma skromne, čak i pri velikom sniženju nivoa vode u akumulaciji. Međutim, mogućnost da se adekvatnim upravljanjem može ublažiti talas T100 (stogodišnja velika voda) za više od 200 m³/s, zavisno od blagovremenosti meteorološke prognoze i ažurnosti operatera da prateći instrukcije matematičkog modela obavi preporučeno obaranje nivoa u akumulaciji - veoma je važan rezultat, jer je upravo velika voda te verovatnoće merodavna za sve planske mere zaštite od poplava. Velike vode veoma retkih verovatnoća, uključujući i onaj verovatnoće prevazilaženja 0,2% (T500), ne mogu se uspešno retenzirati, a to se i ne može da traži od akumulacija sa nedeljnim regulisanjem, kakva je akumulacija Bočac.

Na osnovu detaljnih analiza mogućnosti akumulacije Bočac da obavi ublažavanje poplavnih talasa, mogu se dati sledeći komentari. Pošto je u normalnim uslovima rada primarni korisnik hidroenergetika, ispravna je koncepcija da se zbog boljih proizvodnih performansi hidroelektrane kote u jezeru Bočac kontrolisano održavaju i u zoni koja služi i za odbranu od poplava. U skladu sa prognozom o nailasku padavinskih ciklona koji će dovesti do pojave poplavnog talasa, odmah nakon takve prognozne informacije prelazi se na režim rada kada ciljevi odbrane od poplava postaju prioritetni, obavezujući. Taj režim podrazumeva da se radom oba agregata i evakuacionih organa obaraju kote u jezeru do poželjne granice, kako bi se jezero pripremlilo da može efikasno ispuniti i ciljeve aktivne odbrane od poplava. Savremene metode meteoroloških osmatranja uz primenu i geostacionarnih satelita i kratkoročnih prognoza omogućavaju da se nailasci velikih padavinskih ciklona dosta pouzdano prognoziraju par dana unapred. To omogućava da se odmah nakon pristizanja te informacije u komandnom centru na HE Bočac pređe na režim rada 'Aktivna odbrana od poplava'. To je upravljački vrlo osetljiva operacija, jer se mora naći prava mera za plansko obaranje kota u jezeru, da se ne bi nepotrebno umanjivale proizvodne mogućnosti hidroelektrane Bočac.

Obaranje kota se mora suboptimizirati, tako da bude samo do nivoa koji su neophodni zbog ostvarivanja ciljeva ublažavanja poplavnog talasa i aktivne odbrane od poplava. Koristi se reč 'suboptimizacija' jer se proračuni obavljaju nizom matematičkih upravljačkih simulacija, nakon kojih se, već nakon nekoliko sekundi, dobije koja je upravljačka opcija najpovoljnija - u smislu da se obavi ublažavanje poplavnog talasa korišćenjem samo neophodnog obaranja kote u jezeru, bez nepotrebnih energetskih gubitaka. To je u skladu sa

već navedenim dualnim zadatkom upravljanja, u uslovima međusobno suprotstavljenih kriterijuma upravljanja: hidroenergetike, koja traži održavanje nivoa u akumulaciji na što višim kotama, kako bi energetska proizvodnja bila što veća, i aktivne odbrane od poplava - koja teži da se nivoi obaraju, zbog dva cilja: (a) da smanjenje vrha talasa (ΔQ_{\max}) bude što veće (kriterijum $\Delta Q_{\max} \rightarrow \max$), i (b) da pomeranje / kašnjenje transformisanog pika u odnosu na prirodni talas bude što veće. I taj drugi kriterijum je vrlo važan i ključan za plavno područje Banja Luke (pri dobrim upravljanjima kašnjenje transformisanog talasa može da iznosi čak i 20-tak sati), jer na taj način pik talasa na Vrbasu nailazi na silaznu granu talasa iz pravca Vrbanje, koji je, zbog kraćeg vremena koncentracije, već u opadanju.

Imajući u vidu te vrlo važne činjenice, analizi režima korišćenja akumulacije Bočac za aktivnu odbranu od poplava u ovoj fazi razvoja upravljačkog matematičkog modela pristupilo se - uzdržano i selektivno. Termin 'uzdržano' podrazumeva da se za početak, dok se merno-informacioni osmatrački sistem ne osavremeni povećavanjem broja osmatračkih MS i njihovim osposobljavanjem da izmerene podatke o padavinama dostavljaju neposredno u komandni centar 'on line', i dok se i upravljački matematički model razvojno ne primeri tom novom informatičkom okruženju (pluviografiji, limnigrafiji, piježometar) i dopunjenim bazama podataka - odabrana dinamika punjenja i pražnjenja akumulacije Bočac za potrebe aktivne zaštite od poplava treba da oprezno i sa merom samo koriguje dosadašnju praksu hidroenergetskog korišćenja te akumulacije. To podrazumeva da se nivoi zadržavaju na dosta visokim kotama, što proističe iz zahteva primarnog korisnika voda - hidroenergetike, da se obaranje nivoa obavlja u skladu sa prognozom, po mogućnosti prevashodno forsiranim korišćenjem agregata HE, sa što manje energetskih gubitaka zbog preliivanja vode na prelivu sa ustavama i kroz temeljni ispušt.

Termin 'selektivno' podrazumeva da se akumulacijom Bočac samo radom agregata HE mogu prihvatiti i u velikoj meri retenzirati poplavni talasi češćih povratnih perioda (do oko T20). Zbog toga, kada su meteorološke prognoze takve da će padavine iz dolazećih ciklona u uzvodnom delu sliva (MS Bugojno i Jajce) biti manje od oko 100 mm tokom jednog dana, treba biti uzdržan u pogledu pretpražnjenja akumulacije, jer je velika verovatnoća da će se ta padavinska epizoda i bez značajnijih pretpražnjenja u velikoj meri ublažiti u akumulaciji samo forsiranim radom agregata. U tom slučaju se radikalnije pretpražnjenje ne preporučuje iz

jednostavnog razloga vodnog bilansa: deo tog talasa koji se formira na slivu Vrbasa treba da bude prihvaćen u akumulaciji, kao regulisani protok za potrebe prioritnog korisnika – hidroenergetike. Međutim, u slučaju kada su prognozirane količine očekivanih padavina veoma nepovoljne, sa velikim intenzitetom kiše kraćeg trajanja (padavine od preko 100 mm za 12 h), stepen značajnosti odbrane od poplava se podiže i postaje prioritetan u odnosu na kriterijum akumulisanja vode, tako da postaje relevantan za upravljačko odlučivanje. To je u skladu sa činjenicom da je u ekstremnim hidrološkim stanjima stepen važnosti odbrane od poplava važniji od moguće energetske proizvodnje.

U tim ekstremno nepovoljnim hidrološkim situacijama, čije su verovatnoće reda veličine 2% i 1%, može se ići na značajnije prepražnjenje akumulacije. Da bi se to prepražnjenje obavilo na najbolji način, i po količini i po dinamici pražnjenja, i da bi se otklonila mogućnost generisanja nepovoljnijih talasa od prirodnog, neophodna je apriorna provera svih upravljačkih odluka na matematičkom modelu. Time bi se obezbedio rad sistema u suboptimalnom režimu, a postojaće i kompjuterski zabeležena potvrda da se postrojenjem, poštujući definisanu proceduru, upravljalo na najbolji mogući način. Taj argument nije za potcenjivanje, jer sve poplavne događaje tokom kojih su nastale štete, uvek prate i pitanja tipa – da li se grešilo u procesu upravljačkog odlučivanja, ko je grešio i ko treba da za to odgovara.

Analize pokazuju da su vodni režimi reke Vrbanje, koji se sada ne kontrolišu akumulacijama, najopasniji po čitavo nizvodno dolinsko područje tog sliva, ali i za dolinu Vrbasa nizvodno od ušća te pritoke. Na slivu Vrbanje generišu se talasi koji su, proporcionalno slivnoj površini, neuporedivo veći od svih drugih podslivova (slika 8). Sa ovog sliva, površine 924 km², do Banja Luke (odnosno ušća u Vrbas) dolazi talas koji je približan talasu koji se formira na ostatku sliva i dolazi do Banja Luke. Veoma je ugrožena dolina Vrbanje, a naselje Čelinac je u stalnoj opasnosti od poplava i kao takvo je dosta ograničeno u svom razvoju. Zbog toga bi izgradnja jedne ili sve tri planirane akumulacije značajno uticala na zaštitu od velikih voda čitavog nizvodnog područja, posebno Banja Luke. Prema prethodnim planskim dokumentima, na Vrbnji su planirane 3 akumulacije, dve u gornjem i srednjem delu toka (Šiprage i Grabovica) i jedna (Čelinac) u donjem delu toka. Njihovu realizaciju bi trebalo tretirati kao jedan od važnih razvojnih projekata Republike Srpske.

ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Istaživanja mogućnosti primene matematičkih modela za upravljanja akumulacijama u periodima aktivne odbrane od poplava na slivu Vrbasa omogućava izvlačenje zaključaka opštijeg karaktera, važnih za strateška planiranja objekata i sistema, kao i nekih konkretnijih zaključaka.

1. Vrlo operativni, brzi simulacioni matematički modeli (MM) za generisanje sintetičkih talasa velikih voda, spregnuti sa matematičkim modelima upravljanja akumulacijama, mogu se veoma uspešno koristiti za (sub)optimalno upravljanje akumulacijama u periodima kada se koriste za aktivnu odbranu od poplava. Uz sve bolje i pouzdanije meteorološke prognoze nailaska velikih padavinskih ciklona, mogu se uspešno primenjivati za aktivnu odbranu od poplava čak i akumulacije manjih relativnih zapremina. To se postiže blagovremenim i fleksibilnim obaranjem nivoa u akumulacijama, kako bi se iste pripremile za prijem i transformaciju talasa velikih voda.

2. Pri projektovanju brana i njihovih evakuacionih organa treba apriori, još pri izboru dispozicije, analizirati pogodnost dispozicije, kapaciteta i mobilnosti svih evakuacionih organa, kako bi se odabrali oni organi čije su radne performanse pogodne za funkciju aktivne odbrane od poplava. Ako se radi o akumulacijama sa slobodnim prelivom i ako se one ne koriste za hidroenergetsku proizvodnju, temeljni ispusti treba da budu velikog kapaciteta, jer su to jedini ispusti kojima se može vršiti prepražnjenje akumulacije. U slučaju postojanja hidroelektrane i preliva sa ustavama, prepražnjenje je moguće obaviti i tim evakuatorima. U tom slučaju ustave na branama treba da budu veoma operativne, mobilne, kako bi se njihovim spregutim radom na obaranju nivoa u akumulacijama ostvarili najveći efekti ublažavanja poplavnih talasa.

3. Tendencija povećavanja instalisanog protoka na pribranskim akumulacionim hidroelektranama, koji se penje na odnose Q_{inst}/Q_{sr} do oko 6, veoma je dobra sa gledišta aktivne odbrane od poplava, jer se u slučaju nailaska talasa češćih povratnih perioda, dobar deo pripreme akumulacije za prihvatanje poplavnih talasa može obaviti samo forsiranim radom agregata, pa tek ukoliko oni nisu dovoljni, radom evakuatora.

4. Akumulacija Bočac, čija zapremina omogućava samo nedeljno regulisanje, može se uspešno koristiti za aktivnu odbranu od poplava, posebno za zaštitu Banja Luke. Preduslov je da se odmah nakon najave nailaska velikih padavinskih ciklona (u novije vreme te najave su

par dana unapred) pređe na obavezujući režim rada 'odbrana od poplava', kada se rad HE podređuje tom zadatku, u smislu da se agregati mogu forsiranima radom koristiti u cilju obaranja nivoa u akumulaciji. Manji talasi, oni sa povratnim periodom javljanja do T20, mogu se uspešno ublažiti samo radom agregata. Talasi T50 i T100 se mogu uspešno ublažiti simultanim, planski usklađenim radom agregata (forsirano rade oba agregata po zadatoj dinamici), ustava na prelivu i temeljnog ispusta. Talas T500 se ne može značajnije ublažiti, jer se radi o kataklizmičnom događaju, sa izuzetno velikim gradijentom povećanja protoka (preko 55 m³/s na sat). Za taj slučaj upravljački MM daje pravilo dinamike otvaranja evakuacionih organa i punog angažovanja agregata, kako bi se evakuacije tog talasa obavila bez posledica po objekat.

5. Pored smanjenja pikova poplavnih talasa za neku veličinu ΔQ_{max} , što je veoma koristan rezultat aktivne uloge akumulacije Bočac u odbrani od poplava, transformacijom talasa dolazi i do pomeranja (kašnjenja) vrha ublaženog talasa za po nekoliko sati, pa čak i za jedan dan, u odnosu na talas koji bi bio u uslovima bez transformacije. To je veoma dragocen rezultat, zbog toga što talasi sa drugih podslivova Vrbasa, a posebno sa podsliva Vrbanje, imaju bržu koncentraciju, pa se zahvaljujući toj činjenici smanjuje opasnost da se superponiraju veliki protoci na Vrbasu i Vrbanji. Korist od tog pomeranja vrha talasa je velika, jer vrh transformisanog talasa nailazi na opadajuću granu talasa koji je bio 'brži', pa je efekat utoliko veći ukoliko je kašnjenje vrha duže.

6. Analize delovanja akumulacije Bočac u periodima aktivne odbrane od poplava pokazuju da je vrlo dobro što je realizovan i dodatni slobodni preliv, jer se i uz njegovo angažovanje uspešnije i fleksibilnije može da obavi transformacija talasa retkih verovatnoća javljanja.

7. Sve analize pokazuju da velika opasnost po čitav nizvodni tok Vrbasa, uključujući i Banja Luku, dolazi iz pravca Vrbanje. Zbog orografskih odlika sliva, koji je još i devastiran sečom šuma, vreme koncentracije poplavnih talasa na Vrbanji je kraće u odnosu na Vrbas. Naselja duž Vrbanje su vrlo učestalo ugrožena plavljenjem, tako da se postavlja pitanje uslova za njihov razvoj. Zaštita tih naselja, ali i Banja Luke i nizvodnog toka Vrbasa može se ostvariti samo realizacijom planiranih akumulacija Čelinac, Grabovica i Šipage, po dinamici koja bi se posebno razmatrala.

8. Nesporno je da je sada najprofitabilnije i najpouzdanije ulagati i informacione tehnologije i razvoj upravljačkih softvera, kojima se mogu veoma

značajno da poboljšavaju efekti rada svih sistema. To je od posebnog značaja za vodnu infrastrukturu – bezbednosno, ekonomski, socijalno i ekološki najosetljivije sisteme. U skladu sa tim razvojno je veoma važno da se realizuje predloženi program proširenja merno-informacionog sistema na slivu Vrbasa, i da se nastavi dalja razrada upravljačkih softvera za zaštitu od poplava u skladu sa razvijenijom merno-informacionom bazom. Dopunom sistema za osmatranje (kišomeri, limnigrafi, pijeometri) i obezbeđivanjem 'on line' dostave izmerenih podataka u komandni centar, stvorili bi se uslovi da se urade pouzdaniji prognostički modeli koji će znatno povećati upravljačku efektivnost sistema zaštite od poplava.

LITERATURA

- [1] Blagojević B., V. Mihailović, J. Plavšić (2014): Statistička analiza velikih voda na profilima hidroloških stanica: potreba za promenom pristupa, Vodoprivreda, Beograd, Vol. 46, No. 267-272
- [2] Blagojević V., N. Sudar, Ž. Topalović, A. Bibović, B. Đorđević (2018): Mape opasnosti i mape rizika od poplava na slivu rijeke Vrbasa u BiH kao podloga za izradu planova upravljanja poplavnim rizikom, Vodoprivreda, Vol. 50, No. 291-293, Beograd
- [3] Dašić T., B. Đorđević, P. Milanović, M. Stanić, N. Jaćimović, N. Sudar (2016): Razvoj metoda za upravljanje vodama i uređenje teritorije u zoni sistema osetljivih na poplave – na primeru rudnika i termoelektrane Gacko, Vodoprivreda, Vol. 48, No. 282-284, Beograd
- [4] Dašić T. and B. Đorđević (2017): Management of multipurpose water storage reservoir in flood water regimes, Fourth Congress on Dams, Macedonian Committee on Large Dams, Struga
- [5] Doocy S., A. Daniels, S. Murray, T.D. Kirsch (2013): The Human Impact of Floods: a Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review, PLOS Currents Disasters
- [6] Đorđević, B. (1990): Vodoprivredni sistemi, Građevinski fakultet, Beograd,
- [7] Djordjević, B. (1993): Cybernetics in Water Resources Management, WTP, USA
- [8] Đorđević B., T. Dašić, N. Sudar (2012): Povećanje efikasnosti upravljanja akumulacijama u periodu odbrane od poplava - na primeru hidroenergetskog sistema na Trebišnjici, Vodoprivreda, Vol. 44, No. 255-257, Beograd

- [9] Đorđević B., N. Sudar, U. Hrkalović, B. Knežević (2013): Strategija integralnog upravljanja vodama Republike Srpske, *Vodoprivreda*, Vol. 45, No. 261-263, Beograd
- [10] Đorđević B. i T. Dašić (2019): Ekologija vodoprivrednih sistema. Građevinski fakultet, Beograd
- [11] Jaćimović N., T. Dašić, M. Stanić, B. Đorđević, P. Milanović, N. Sudar, S. Savić (2015): Razvoj distribuiranog modela za hidrološke simulacije oticaja na slivovima u karstu, *Vodoprivreda*, Vol. 47, No. 273-275, Beograd
- [12] Jovanović M., D. Prodanović, J. Plavšić, N. Rosić, P. Srna, M. Radovanović (2014): Problemi pri izradi karata ugroženosti od poplava, *Vodoprivreda*, Vol. 46, No. 267-272, Beograd
- [13] Stojković M., J. Plavšić, S. Prohaska (2014): Dugoročne promene godišnjih i sezonskih proticaja: primer reke Save, *Vodoprivreda*, Vol. 46, No. 267-272, Beograd
- [14] Topalović Ž, V. Blagojević i N. Sudar (2018): Određivanje hidrograma velikih voda za potrebe izrade mapa rizika od poplava – na primjeru rijeke Vrbas, *Vodoprivreda*, Vol. 50, No. 291-293, Beograd
- [15] Zavod za vodoprivredu, Bijeljina (2015). Strategija integralnog upravljanja vodama Republike Srpske 2015-2024. godina.
- [16] Zavod za vodoprivredu Bijeljina (2017): Mape opasnosti i rizika za sliv rijeke Vrbas Republike Srpske, hidrološki i hidraulički matematički model.
- [17] Zavod za vodoprivredu, Bijeljina i Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo, Građevinski fakultet, Beograd (2019): Plan upravljanja rizikom od poplava za sliv rijeke Vrbas Republike Srpske. 12 svezaka, Bijeljina.

POSSIBILITIES FOR ACTIVE FLOOD CONTROL MANAGEMENT
WITH THE APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS
- THE CASE STUDY OF RESERVOIR BOČAC ON VRBAS RIVER -

by

Tina DAŠIĆ¹⁾, Branislav ĐORĐEVIĆ²⁾, Nedeljko SUDAR³⁾, Vujadin BLAGOJEVIĆ³⁾

¹⁾ University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering, ²⁾ Academy of Engineering Sciences of Serbia,

³⁾ Institute for Water Management, Bijeljina

Summary

Flood protection systems are one of the most important, most vital systems that man builds because they are related to the goals of survival, growth and development of human society. That is why these systems are in constant development, from the aspect of upgrading and reconstruction of facilities, as well as from the aspect of continuous improvement of management measures during the period of high flows. Flood protection systems have the greatest effects when coupled using all three groups of measures: (a) passive protection measures with line protection systems (levees with inland drainage systems), (b) active protection measures by the use of reservoirs and retention to reduce peak flows (c) non-investment measures of landscaping that prevent the construction of inappropriate structures in floodplains that can increase potential flood damage. Accurate hydro-meteorological forecasts and the development of computer technology enabled using reservoirs for active protection more efficiently and successfully (by reducing the peak flows of the flood waves).

The paper presents the possibilities of mathematical models for flood wave mitigation. The model was applied at the Bočac reservoir (reservoir with weekly flow regulation) on Vrbas river. It has been shown that the waves of frequent return periods (2, 5 and 10 years) can be very successfully mitigated using only the discharge through the hydroelectric power plant. If high precipitations are predicted several days in advance (modern methods of meteorological observation and

forecasting allow it), and with flexible management of HPP units, spillways controlled with gates and bottom outlets, water levels in the reservoir can be properly decreased and the waves of rarer probabilities (with return periods of 50 and 100 years) can be successfully mitigated. At Bočac reservoir 100-year high water can be decreased for over 200 m³/s. The Bočac reservoir is too small to significantly decrease flood waves of very rare occurrences (0.2% and less). Three general conclusions can be drawn out: (1) When designing dams whose reservoirs will be used for flood protection, it is very important to have strong evacuators (bottom outlets, spillways with gates) with discharge capacities large enough for efficient decrease of water level before the flood occurs, (2) the trend of increasing the installed capacity of HPPs with annual regulation (ratio Q_{inst} / Q_{sr} around 6) is also favourable in periods of active flood protection; (3) Simulation and optimization mathematical models, with accurate meteorological forecasts of high precipitation, can be successfully applied for active flood protection, even with the reservoirs with relatively smaller storage volumes (in the case of Bočac reservoir - the weekly flow regulation). Reservoirs with bigger relative water storage volumes (reservoirs with annual flow regulation) are more favorable in that aspect.

Key words: Flood protection, active flood protection, reservoirs, river Vrbas, Reservoir and HPP Bočac

Redigovano 17.10.2019.