

## KORIŠĆENJE MATEMATIČKE OPTIMIZACIJE ZA REGULISANJE POPLAVA – PRIMER STUDIJE SLIVA REKE DAMODAR U INDIJI

Dr. Neša ILIĆ, Konsultant  
Nacionalni Projekat za Hidrologiju, New Delhi, Indija  
e-mail: nilich@optimal-solutions-ltd.com

### REZIME

Razvoj višenamenskih akumulacija u slivu reke Damodar započeo je 1950-ih, a prvenstveno ga je motivisala želja za uvođenjem mogućnosti kontrole poplava u donjem delu sliva. U ranijim periodima, upotreba modela za regulisanje poplava oslanjala se na korišćenje utvrđene krive upravljanja za akumulacije, koje nisu uvek upotrebljive za upravljanje radom akumulacije tokom poplava, jer je svaka poplava jedinstvena. U ovom radu je predstavljen novi pristup koji se temelji na kratkoročnim prognozama poplava i zajedničkoj upotrebi svih pet akumulacija kako bi se umanjili negativni efekti poplave nizvodno od vodozahvatne građevine Durgapur. Rad akumulacija određuje se korišćenjem optimizacionog matematičkog programa WEB.BM koji uzima u obzir prognozu dotoka i sva relevantna ograničenja, uključujući i regulisanje isticaja iz akumulacija i proticaja kroz rečni sistem. Rezultati ove studije pokazuju da bi se se kod svih jedanaest katastrofalnih poplava koje su se dogodile između 1961. i 2018. proticaj mogao zadržati unutar kapaciteta punog rečnog korita nizvodno od Durgapur vodozahvatne građevine ako se akumulacijama upravlja na bazi optimizacionog modela i na bazi pretpostavljene pouzdane prognoze oticaja za trodnevni vremenski period. Ovo je prvi put da se u Indiji primjenjuje optimizacioni model koji upravlja radom akumulacija dok istovremeno uzima u obzir i hidrološku transformaciju proticaja. Ovaj pristup obećava bolje upravljanje akumulacijama za vreme poplava u rečnom slivu Damodar, kao i u drugim rečnim slivovima u kojima se mogu razviti pouzdane kratkoročne prognoze oticaja.

**Ključne reči:** matematička optimizacija, upravljanje akumulacijama, hidrološka transformacija proticaja

### UVOD

Upotreba matematičkih modela je standardna komponenta u procesu stvaranja planova upravljanja rečnim slivom. Pregled radova o postojećim modelima i njihovih mogućnostima uradili su Yeh (1985) i Labadie (2004), dok su novije analize prikazali Rani i Moreira (2011) kao i Dobson i njegovi saradnici (2019). Bez obzira na dugu istoriju razvoja ovih modela, njihova upotreba u upravljanju akumulacijama u realnom vremenu gotovo da ne postoji. Glavni razlozi za to su: (a) nedostatak pouzdane prognoze oticaja; (b) nemogućnost većine optimizacionih modela da u model uključe hidrološku transformaciju proticaja kao uslovnu funkciju, što je neophodno za pravilno modeliranje poplava. Ovaj se rad bavi problemom pod (b), tj. centralna tema ovde nije mogućnost predviđanja oticaja, već mogućnost upravljanja rečnim slivom, gde upravljanje radom akumulacija zauzima centralno mesto kao glavni mehanizam regulisanja proticaja, koji inače u prirodnim uslovima često ima pogubne efekte za vreme velikih poplava. Budući da je upravljanje radom akumulacija bitan deo regulisanja proticaja u rečnom slivu, termini “modeli upravljanja akumulacijama” i “modeli regulisanja rečnog sliva” se u ovom slučaju odnose na istu klasu matematičkih alata.

Prvi modeli rada akumulacije kao na primer model HEC-5 (US Corps of Engineers, 1998) pojavili su se u literaturi pre više od 50 godina, a većina njih u početku se temeljila na konceptu korišćenja simulacionih alata koji su omogućili uključivanje raznih “what-if” pravila za regulisanje rada akumulacija. Iako se i dalje koriste neki simulacioni modeli poput Mike Hydro Basin (DHI, 2022) i Ribasim (Deltares, 2022), njihova upotreba postaje sve teža s porastom složenosti problema upravljanja rečnim slivom. Ovi modeli često ne uspevaju da primene koncept upravljanja zoniranjem

istovremeno za više akumulacija i za više korisnika vode, tako da uključe i pravila regulisanja zapremine akumulacije i isticaja, kao i smanjenje potražnje vode i raspodelu deficita tokom sušnih godina. Napori za rešavanje ovih poteškoća sa korišćenjem simulacionih modela doveli su do razvoja modela na osnovu algoritama mrežnog protoka (NFA), koji se bazira na teoriji linearnog programiranja (LP). Prvi model na bazi NFA algoritma (SIMYIELD) razvio je Texas Water Development Board sredinom 1970-ih (Evenson i Moseley, 1970), nakon čega su usledili brojni modeli koji su vremenom postali popularni, kao na primer MODSIM (Labadie, 1986), AQUATOOL (Andreau et al., 1996), E-Water (Ewater Academy, 2022) ili REALM (Victoria State Government, 2022). Svi ovi modeli imaju mogućnost primene koncepta zoniranja, kako potreba tako i raspoloživih resursa, u kombinaciji sa primenom krive upravljanja akumulacijom, tako da upravljanje potražnjom može postati deo celog plana regulisanja rečnog sliva. Obično je svrha ovih modela raspodela vodnih resursa na bazi pravila koje definišu korisnici modela. Iako bi ovaj pristup mogao biti koristan za upravljanje radom akumulacije tokom sušnih perioda, njegova korisnost za regulisanje rada akumulacija tokom poplava je deleko manja, posebno u slučaju kada je neophodno upravljati sa nekoliko uzvodnih akumulacija istovremeno, dok hidrografi doticaja u svaku akumulaciju imaju različite vremenske i prostorne raspodele.

Neki modeli, kao što je WEAP model (Yates et al., 2005.), takođe uključuju interni modul za transformacije kiše u oticaj. Međutim, ova situacija je više izuzetak nego pravilo. Većina modela za upravljanje rečnim slivom ne generiše procene oticaja na temelju podataka o padavinama, već se oslanjaju na prethodno pripremljenu vremensku seriju oticaja za više istorijskih godina ili za pojedinačne hidrološke događaje. Ovo čini procenu modela rada akumulacije lakšom, budući da se njihova tačnost može odvojiti od tačnosti predviđanja prognoze oticaja, koja nikad nije potpuno zagarantovana. U principu, procena lokalnog oticaja za svaki podsliv unutar rečnog sliva je nezavisna od rada akumulacije, budući da je ukupni dotok u akumulaciju kombinacija regulisanih isticaja iz uzvodnih akumulacija i lokalnog oticaja koji potiče iz dela sliva između dve uzastopne akumulacije. Modele transformacije kiše u oticaj treba nezavisno kalibrirati i potvrditi, i o njima se dalje ne raspravlja u ovom radu. Glavno pitanje kojim se ovaj rad bavi je mogućnost poboljšanja regulacije poplava u realnom vremenu pod pretpostavkom da je dostupna tačna kratkoročna (3-dnevna) prognoza oticaja, kao i demonstracija činjenice

da optimizacioni model može biti snažan alat za donošenje odluka u realnom vremenu ako je povezan s pouzdanim alatom za predviđanje oticaja.

Većina modela za regulisanje kretanja vode kroz rečne deonice i za transformaciju poplavnog talasa uključuju hidrološku transformaciju na bazi metode Muskingum zbog lakoće njegove implementacije. Ovaj metod uključuje kalibraciju tri koeficijenta transformacije:

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} \quad (1)$$

gde je trenutni isticaj iz rečne deonice  $O_t$  povezan s trenutnim doticajem u deonicu  $I_t$ , i sa doticajem i isticajem za prethodni vremenski korak  $I_{t-1}$  i  $O_{t-1}$ . Glavni problem u vezi primene Muskingum metode je da se koeficijenti  $C_i$  kalibrišu za određeni hidrološki događaj, dok se za dugoročno modeliranje koje uključuje prelaz iz srednjih proticaja u visoke proticaje ti koeficijenti menjaju, jer su funkcija vremena putovanja duž rečne deonice, koje zavisi od veličine protoka. Metoda Muskingum-Cunge uvodi geometriju kanala (poprečni presek), Manningov koeficijent  $n$  i nagib kanala kao dodatne informacije koje su potrebne za omogućavanje varijacije koeficijenata kao funkcije vremena putovanja duž deonice, ali većina ovih podataka obično ili nije dostupna ili je podložna grubim procenama. U literaturi postoje i publikacije koje tvrde da metoda Muskingum-Cunge nije u stanju da garantuje održanje zapremine ukupnog isticaja iz deonice, tako da ta zapremina nije jednaka zapremini ukupnog doticaja u deonicu na zadovoljavajući način (Perumal i Sahoo, 2008). Jedna od najelegantnijih varijanti metode Muskingum implementirana je u modelu Stream Synthesis And Reservoir Regulation (SSARR) čiji je autor US Corps of Engineers (2022), na bazi pristupa koji je izvorno predložio Williams (1969). Kao i kod ostalih metoda hidrološke transformacije protoka, osnovna jednačina povezana je s promenom zapremine rečne deonice tokom vremenskog koraka, što je funkcija prosečnog doticaja i isticaja u deonici:

$$\frac{I_{t-1} + I_t}{2} - \frac{O_{t-1} + O_t}{2} = \frac{\Delta S}{t} \quad (2)$$

Ako se od obe strane jednačine (2) oduzme  $O_{t-1}$ , cela jednačina se pomnoži sa  $t/(O_t - O_{t-1})$  a onda se uvede zamena  $\Delta S/(O_t - O_{t-1}) = TS$ , dobijamo:

$$O_t = \frac{\left[ \frac{I_{t-1} + I_t}{2} - O_{t-1} \right] \cdot t}{TS + \frac{t}{2}} + O_{t-1} \quad (3)$$

gde promenljiva  $TS$  predstavlja prosečno vreme putovanja kroz rečnu deonicu za dati proticaj, koja se

dobija ili kao rezultat linearne interpolacije vrednosti iz tabele koja sadrži vrednosti  $TS$  i  $O$  ili koristeći funkcionalnu formu ove zavisnosti koja ima sledeći oblik:

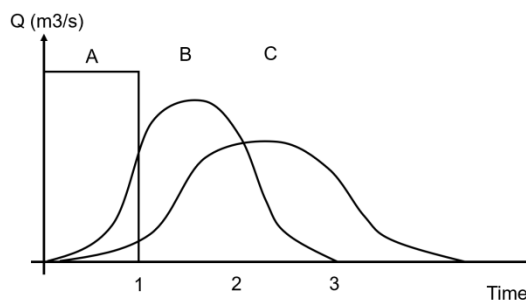
$$TS = \frac{Kts}{\left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2}\right)^n} \quad (4)$$

U svojoj originalnoj publikaciji ove metode, Williams (1969) je definisao vreme putovanja duž deonice na osnovu izračunatog isticaja iz deonice na kraju vremenskog koraka  $t$ , što bolje predstavlja uslove u slivu. Izraz (4) se takođe može napisati u sledećoj eksplicitnoj formi:

$$O_t = \frac{t}{2TS+t} I_{t-1} + \frac{t}{2TS+t} I_t + \frac{TS-t/2}{TS+t/2} O_{t-1} \quad (5)$$

Gornji izraz (5) predstavlja nelinearni model, i obično zahteva nekoliko numeričkih iteracija u kojima se  $O_t$  unosi, a vreme putovanja  $TS$  preračunava koristeći uneseni oticaj  $O_t$ . Ovaj process se ponavlja dok se ne postigne željena tačnost. Gore navedeni oblik jednačine (5) identičan je po obliku dobro poznatoj Muskingum metodi datoj u jednačini (1), dok se koeficijenti izračunavaju pomoću nešto drugačijeg postupka.

Treba primetiti da je zbir koeficijenata  $C_i$  u jednačini (5) jednak 1, što je ujedno i uslov za koeficijente Muskingum metode, kojim se potvrđuje očuvanje zapremine oticaja i doticaja. Prednost metode SSARR je u tome što su koeficijenti transformacije funkcija protoka i mogu se interno izračunati relativno lako kad model prelazi iz sezone niskog protoka u sezonu visokog protoka i obratno. Takođe, potrebno je dobiti vreme putovanja kroz deonicu reke, što zahteva dužinu rečne deonice i prosečnu brzinu kretanja vode kroz poprečni presek, koja se inače određuje pri svakom merenju protoka. Za vrlo visoke proticaje, vreme putovanja se računa kao vremenska razlika pojave vršnog protoka na početku i na kraju rečne deonice. Učinci transformacije posebno su važni za veće sisteme sa više akumulacija, gde se fiksirani isticaj transformiše tokom putovanja kroz svaku nizvodnu rečnu deonicu, kao što je prikazano na slici 1, gdje se pretpostavljaju tri nizvodne deonice (a, b i c). Nizvodni hidrogrami se mogu izmeniti u uticajem dodatnih pritoka ili dodatnim regulacijama režimom rada postojećih akumulacija na donjem kraju svake rečne deonice. Svi ovi efekti treba da budu pravilno uključeni u proces modeliranja.

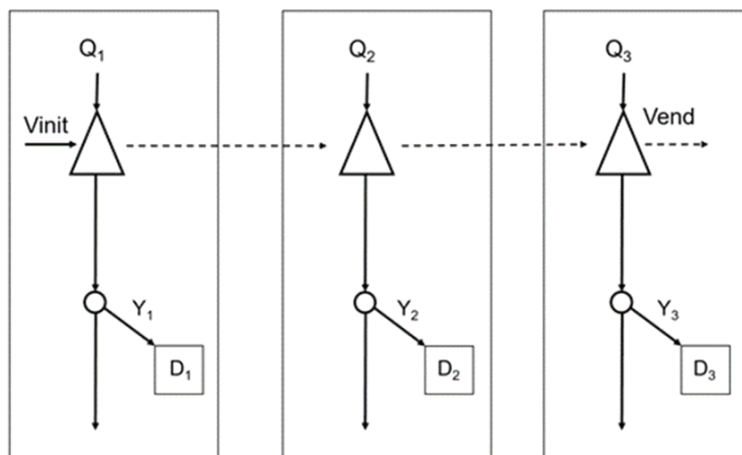


Slika 1. Hidrološka transformacija fiksnog isticaja iz akumulacije

### ISTOVREMENA OPTIMIZACIJA U VIŠE VREMENSKIH KORAKA (MTO)

Kao što je izvorno predložio Windsor (1973), a kasnije su potvrdili Needham et al. (2000), pravilno rešenje optimizacije za regulisanje poplava temelji se na pretpostavljenom znanju hidrograma dotoka tokom određenog vremenskog horizonta. Podrazumeva se da ne postoje savršene prognoze, iako su se u poslednje dve decenije prognostički alati znatno poboljšali, ali glavni pristup testiranju modela za optimizaciju upravljanja akumulacijama je korišćenje istorijskog ili sintetički generisanog hidrograma za koga se pretpostavlja da je poznat. To uklanja neizvesnosti vezane za doticaj, omogućavajući tako lakše poređenje različitih tehnika optimizacije. Neki modeli kao RiverWare (Zagona et al, 2001) i Oasis (Rundall et al., 1997) su sposobni da istovremeno reše optimizaciju za više vremenskih koraka, koristeći dinamički pristup prikazan na slici 2, ali nijedan od ovih modela nije u stanju da uključi hidrološku transformaciju proticaja duž rečne deonice u procesu optimizacije, kao što je to postignuto u WEB.BM modelu (Ilich, 2021). Isprekidane linije na slici 2 predstavljaju prenošenje zapremine u akumulaciji između uzastopnih vremenskih koraka, dok elementi unutar označenog pravougelnika predstavljaju ceo sistem za jedan vremenski korak.

Obično je stanje poplave definisano protocima koji prevazilaze puni kapacitet rečnog korita. Funkcija štete od poplava se može definisati za nekoliko referentnih nivoa poplave iznad punog kapaciteta rečnog korita, i ona predstavlja povećane troškove usled poplave kao funkciju povećanja proticaja. To će interno uzrokovati u modelu fiktivnu podelu rečne deonice na paralelne deonice kako bi se omogućila linearizacija funkcije



Slika 2. Viševremenska optimizacija za tri uzastopna vremenska koraka

štete od poplava, pri čemu svaka od paralelnih deonica ima jedinstvenu cenu štete po jedinici protoka, kako je izvorno predložio Windsor (1973). Ako se problem optimizacije postavi kao maksimiziranje koristi od vodospabdevanja, cene po jedinici protoka poplave bi imale negativan znak, što znači da će se problem transformisati iz problema maksimizacije korisnog protoka u problem minimizacije štetnog protoka. Na taj način model bi težio iznalaženju isticaja iz akumulacija tako da se prekomerni nizvodni protok minimizira (ili u potpunosti izbegne ako je moguće). Ciljna funkcija je primenljiva za sve vremenske korake koji se rešavaju istovremeno, a i za sve rečne deonice za koje je definisana funkcija štete od poplave, što objašnjava dvostruko sumiranje i u vremenu i u prostoru:

$$\text{Obj. Function} = \text{Max} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n Q_{i,t} P_i \quad (6)$$

gde je  $Q_{i,t}$  prosečan protok na segmentu rečne deonice i u vremenskom koraku  $t$ , dok je  $P_i$  funkcija vrednosti jedinice protoka na svakom segmentu rečne deonice. Uslovne funkcije optimizacionog problema uključuju jednačine kontinuiteta (održanja mase) za svaki čvor u mreži, maksimalni isticaj iz akumulacije kao funkcija nivoa vode u akumulaciji, hidrološke transformacije proticaja duž rečne deonice i brojna druga ograničenja koja mogu biti povezana sa postojećom konfiguracijom sistema, kao na primer kapacitet proticaja kroz hidroelektrane ili povratni tok sa površine za navodnjavanje koji je funkcija protoka dostupnog za navodnjavanje.

Zbog značajnog oslanjanja na upotrebu krivih upravljanja radom akumulacija, mnogi korisnici ih

smatraju korisnim mehanizmom za smanjenje šteta od poplava. Međutim, ovo gledište nije tačno. Krive upravljanja radom akumulacija su prvenstveno uvedene kako bi se smanjila šansa za prerano pražnjenje akumulacije tokom sušnih godina. Ove krive obično imaju fiksni oblik za svaku godinu, i one nisu u mogućnosti da ponude neophodnu fleksibilnost za regulisanje poplava u velikim višenamenskim sistemima, gdje svaka poplava ima različitu prostornu i vremensku raspodelu, zahtevajući tako jedinstven odgovor za svaku situaciju. Svrha korišćenja optimizacije je da se pronađe najbolji režim regulisanog isticaja u ograničenom vremenskom horizontu tako da je šteta od poplave minimalna. Vremenski horizont u ovoj studiji je samo tri dana, što inače odgovara vremenu putovanja vode kroz čitav sliv koji je analiziran u okviru ove studije.

## IMPLEMENTACIJA

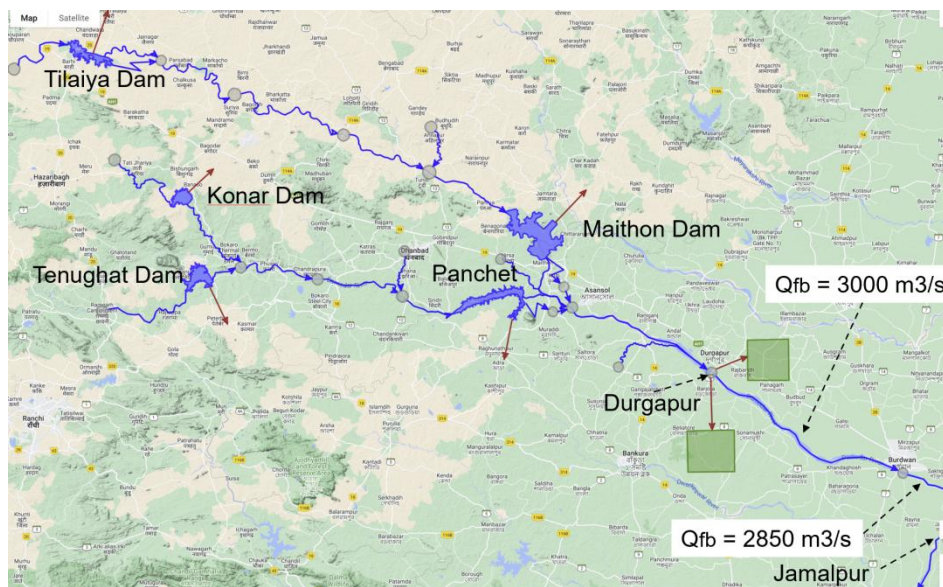
Proces uključivanja hidrološke transformacije proticaja u optimizacioni algoritam na bazi linearnog programiranja zahteva iterativne pozive optimizacionog programa dok se ne postigne željeni stepen tačnosti ili dok se ne dostigne prethodno postavljen maksimalni broj iteracija. Svaki poziv optimizacionog programa zahteva da se skup koeficijenata transformacija proticaja  $C_i$  ponovo izračunava na osnovu proticaja u rečnim deonicama iz prethodne iteracije. Obično je maksimalni broj od 5 do 6 iteracija dovoljan da se postigne razlika pretpostavljenog i izračunatog vremena putovanja  $T_s$  manja od 1%. Korisnik ima mogućnost postavljanja ograničenja u pogledu tačnosti, kao i maksimalnog broja iteracija. Ako se željena tačnost ne postigne unutar

maksimalnog broja iteracija, model usvaja rezultate iz poslednje iteracije i ispisuje poruku koja sadrži upozorenje.

### STUDIJA NA SLIVU REKE DAMODAR

Lociran u zapadnom Bengalu, sliv reke Damodar jedan je od najstarijih rečnih basena u Indiji u smislu istorijata razvoja korišćenja vodnih resursa koji počinje 1950-ih godina. Trenutno u slivu reke Damodar postoji pet višenamenskih akumulacija, izgrađenih za snabdevanje vodom industrije, gradova i za navodnjavanje, sa tri hidroelektrane, ali je osnovna namena svih akumulacija zaštita od poplava. Panchet i Maithon su najveće brane, sa instalisanom snagom hidroenergetskih postrojenja od

80 MW i 60 MW na svakoj od brana. Sa četiri od pet akumulacija trenutno upravlja državna korporacija Damodar Valley, a sa jednom (Tenughat) se upravlja od strane administracije države Jharkhand. U ovom radu, pretpostavka je da se sa svih pet akumulacija može upravljati kao sa jednim sistemom tako da se dobije najbolje moguće rešenje regulacije istorijskih poplava na temelju trodnevnog horizonta prognoze i originalnih specifikacija u vezi dimenzija akumulacija. Ovo je bitno jer se neke od akumulacija trenutno ne koriste u maksimalno mogućim i prvobitno planiranim operativnim granicama zbog još nerešenih sporova vezanih za kompenzaciju raseljenog stanovništva, mada se očekuje da će se ovi sporovi rešiti.



Slika 3. Šema modela sliva reke Damodar ( $Q_{fb}$  protok je pun rečni kapacitet)

Ulazni podaci se baziraju na dnevnim serijama prirodnih protoka koji su rekonstruisani na bazi proračuna pomoću snimljenih podataka (nivoa akumulacija i isticaja), kao i na snimljenim protocima na lokaciji vodozahvatne građevine Durgapur. Model je koristio dnevni vremenski korak sa tri dana prognoze oticaja. Treba napomenuti da, iako su istovremeno rešena tri dnevna koraka, samo se rešenje za prvi dan uzima kao konačno pre nego što model nastavi da rešava sledeći trodnevni vremenski horizont. Ovo rešenje omogućava kontinualno modeliranje svih jedanaest istorijskih poplava koje su se dogodile između 1961. i 2017. godine. Regulisanje rada akumulacija se stoga bazira na rezultatima optimizacije koji se temelje na predviđenoj prognozi oticaja do tri dana unapred. To

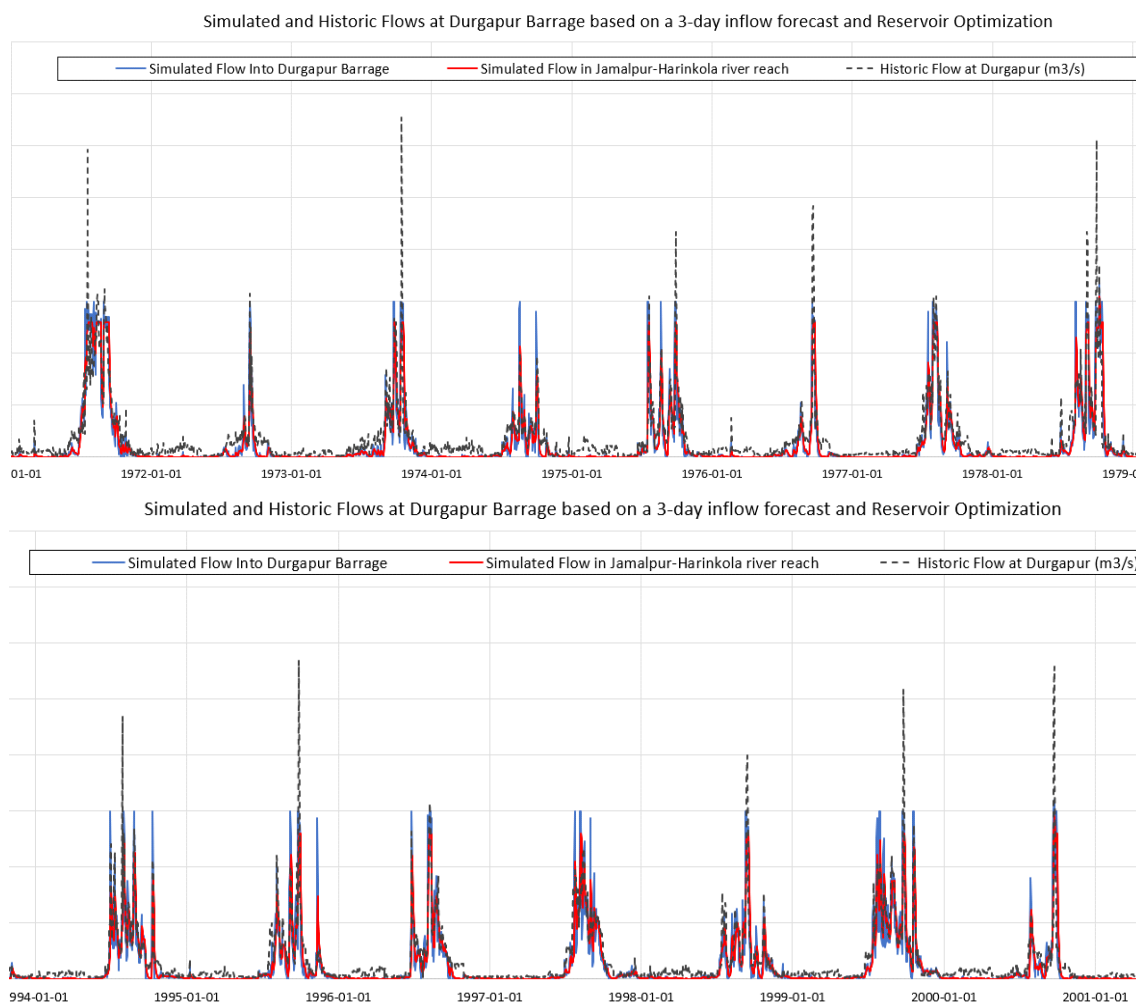
omogućava da model odluči kako da balansira isticaje i upotrebu celokupne zapremine svih pet akumulacija tako da se negativni uticaji poplava minimiziraju, uzimajući istovremeno u obzir hidrološku transformaciju proticaja na svim rečnim deonicama. Slika 3 prikazuje šemu modeliranja sistema. S obzirom na kratkoročnu prognozu oticaja od samo tri dana, program za optimizaciju može brzo pretražiti sve dostupne opcije, uključujući urgentne isticaje pre dolaska vršnog protoka, upotrebu zona u akumulaciji predviđenih za regulisanje poplava, u kombinaciji sa hidrološkom transformacijom proticaja kroz rečne deonice i lokalnog oticaja nizvodno od vodozahvatne građevine Durgapur, što sve može značajno umanjiti vršni proticaj nizvodnog hidrograma. Proticaj u rečnoj

deonici nizvodno od vodozahvatne građevine Durgapur podeljen je u četiri segmenta s obzirom na veličinu štete od poplava: ispod 3000 m<sup>3</sup>/s (bez troškova); između 3000 i 3200 m<sup>3</sup>/s (umereni trošak); između 3200 i 3500 m<sup>3</sup>/s (visoki trošak); i iznad 3500 m<sup>3</sup>/s (enorman trošak). Istorijski, puni kapacitet rečne deonice u prošlosti je bio oko 3700 m<sup>3</sup>/s, a smanjen je na 2850 m<sup>3</sup>/s kao rezultat naslaga nanosa u rečnoj deonici ispod vodozahvatne građevine koji su se nagomilali tokom godina. Takođe, prosečni dnevni maksimalni protoci su premašili 5000 m<sup>3</sup>/s deset puta u razdoblju od 1961. do 2017, dosegnuvši 7400 m<sup>3</sup>/s u 2007. godini i preko 7700 m<sup>3</sup>/s u 2009. godini.

Rezultati modela WEB.BM pokazuju da ako bi prognoza oticaja bila dostupna za trodnevni vremenski horizont, regulisani isticaji dobijeni na osnovu proračuna u modelu zadržali bi sve poplave nizvodno od

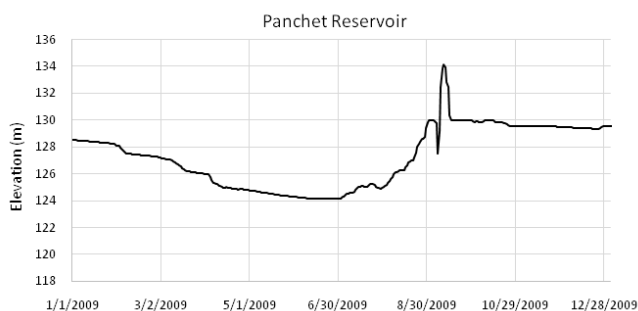
Durgapur vodozahvatne građevine ispod 3000 m<sup>3</sup>/s za svih 57 simuliranih godina sa malim izuzetkom u samo dve od 57 godina. Na slici 4 prikazani su rezultati selektovanih istorijskih hidrograma (isprekidana linija) na lokaciji vodozahvatne građevine Durgapur, uporedno sa rezultatima dobijenim iz WEB.BM programa za istu lokaciju (plava linija) kao i za kritičnu lokaciju (crvena linija) koja prolazi kroz gusto naseljeno mesto Jamalpur.

Gornji rezultati postignuti su istovremenim balansiranjem svih akumulacija za potrebe sniženja nizvodnog poplavnog talasa kako je prikazano na slikama 5 do 8 za jednu od odabranih godina (2009), gde je na akumulaciji Panchet vidljivo snižavanje nivoa zapremine pre nailaska vršnog proticaja, nakon čega je usledilo punjenje akumulacije iznad kote normalnog uspora koja je dopuštena jedino za potrebe regulisanja poplava.

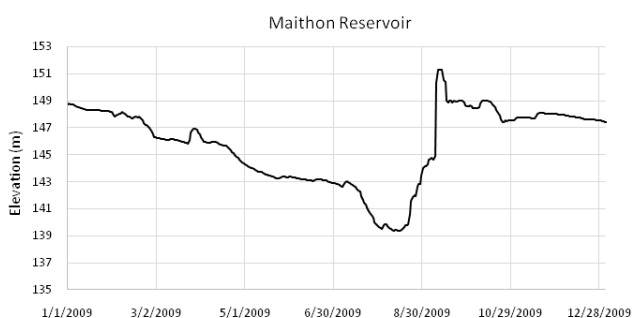


Slika 4. Istorijski i modelirani protoci na lokaciji Durgapur i Jamalpur

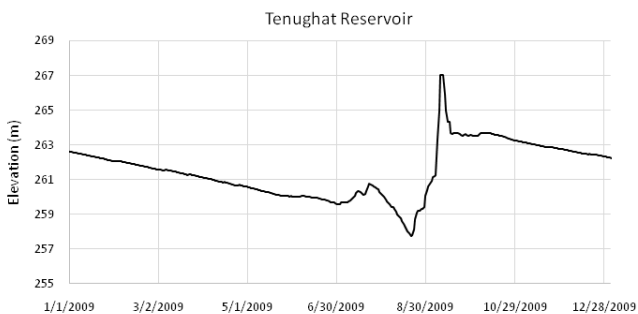




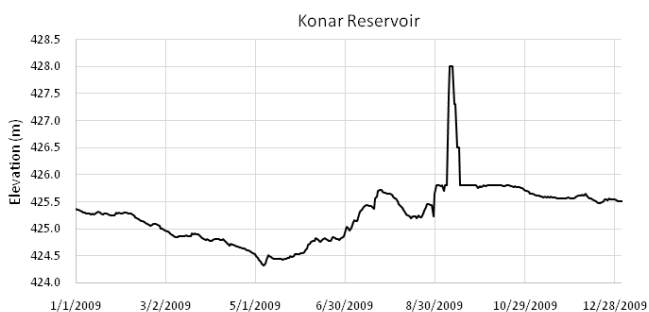
Slika 5. Simulirani nivoi u akumulaciji Panchet u 2009. god.



Slika 6. Simulirani nivoi u akumulaciji Maithon u 2009. god.



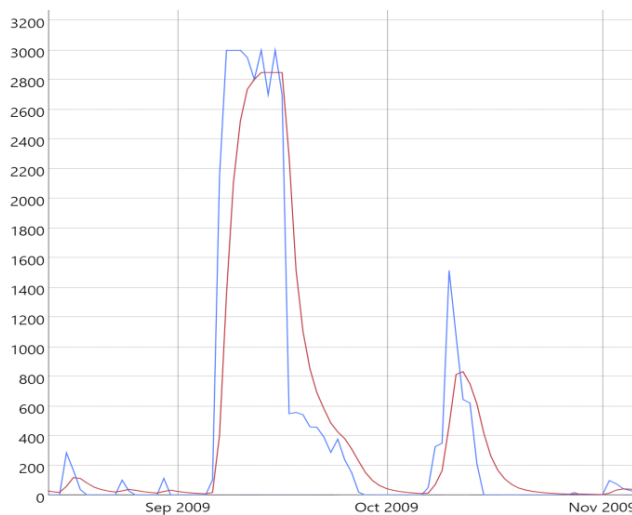
Slika 7. Simulirani nivoi u akumulaciji Tenughat u 2009. god.



Slika 8. Simulirani nivoi u akumulaciji Konar u 2009. god.

Svi isticaji iz akumulacije se automatski računaju za svaki vremenski horizont od tri dana koristeći optimizacioni program. Cilj ovih proračuna je da se nađe način kako da se minimizira negativan efekat poplava na nizvodnim lokacijama koje su gusto naseljene. Nivo vode u svakoj akumulaciji na kraju prvog dana je uzet kao početni nivo za proračun prvog dana za sledeći vremenski horizont od tri dana. Vremenski horizont od tri dana je izabran jer se istovremeno sa ovom studijom odvijala i studija za razvoj i testiranje modela za prognozu oticaja na bazi vremenske prognoze, koja je još uvek u toku.

Hidrogrami za istu simuliranu poplavu iz 2009-te godine se vide na slici 9, gde je evidentno da su isticaji iz dve brane (Panchet i Maithon) sabrani sa lokalnim oticajem ispod ove dve brane tako da rezultanta ove sume ne prelazi limit od 3000 m<sup>3</sup>/s na lokaciji vodozahvatne građevine Durgapur (plava linija), dok crvena linija predstavlja nizvodni protok kroz naseljeno mesto na lokaciji Jamalpur gde model uspeva da održi proticaj ispod punog kapaciteta rečnog korita od 2850 m<sup>3</sup>/s. Efekti hidrološke transformacije poplavnog talasa su takođe vidljivi na ovom dijagramu kad se uporede plava i crvena linija, gde se vidi pomak nizvodnog hidrograma usled vremena putovanja i smanjenje vršnih proticaja, dok ukupna zapremina doticaja i isticaja (površina ispod plave i crvene linije) kroz rečnu deonicu ostaje ista.



Slika 9. Modeliran proticaj kroz Duragpur i Jamalpur u m<sup>3</sup>/s

## ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Ovaj rad pokazuje da se model WEB.BM može koristiti kao operativni alat u realnom vremenu koji može dati izvanredne rezultate ako postoje tačne kratkoročne prognoze oticanja. Rezultati pokazuju da bi buduće napore trebalo koncentrisati na poboljšanje modela predviđanja oticaja koji bi se oslonili na vremenske prognoze, satelitska osmatranja i eventualno korišćenje veštačke inteligencije za poboljšanu transformaciju padavina u oticaje. Zajednički učinak poboljšanih prognoza i matematičke optimizacije nudi mogućnost značajnih poboljšanja koja bi spasla živote i smanjila štetu gubitka imovine tokom budućih regulisanja poplava. Bitno je imati u vidu da se WEB.BM model na sličan način može upotrebiti sa drugim ciljnim funkcijama, kao na primer za maksimizaciju proticaja kroz turbine, čime bi se maksimizirao doprinos hidroelektrana u ukupnom energetsom sistemu, jer sve velike vode koje moraju da se preliju preko brane zbog nedostatka kapaciteta hidroelektrana predstavljaju gubitak za energetske sistem. Shodno tome, optimizacioni modeli se mogu postaviti za razne ciljeve, i njihova najveća korist se može dobiti kao rezultat studija za optimalno upravljanje višenamenskog korišćenja vode u celom slivu i njihovih primena u realnom vremenu u kombinaciji sa modelima prognoze oticaja.

## SPONZOR STUDIJE

Ovaj projekat je zajedno finansirala vlada Indije (Ministarstvo za Vodoprivredu) i Svetska Banka u okviru Nacionalnog Hidrološkog Projekta sa sedištem u New Delhiju.

## DOSTUPNOST PODATAKA I MODELA

WEB.BM model je web aplikacija koja koristi Coin-OR biblioteku linearnih optimizacionih programa. WEB.BM modelu se može pristupiti bez naplate na web sajtu [www.riverbasinmanagement.com](http://www.riverbasinmanagement.com) gde se zahteva samo adresa e-pošte i lozinka za registraciju i pristup, što rezultuje stvaranjem radnog prostora unutar aplikacije za svakog registrovanog korisnika. Dostupnost podacima korišćenim u ovom projektu je ograničena kao deo šireg ograničenja primjenjivog na podatke iz sliva reke Gang. Više informacija i relevantnih publikacija je dostupno na web site-u [www.optimal-solutions-ltd.com](http://www.optimal-solutions-ltd.com).

## LITERATURA

- [1] Andreu, J., Capilla, J., and Sanchís, E., 1996. Aquatool, a generalized decision support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177 (3), 269–291. doi:10.1016/0022-1694(95)02963-X
- [2] Tahiri A., D. Che, D. Ladeveze, P. Chiron, and B. Archimède. 2022. Network flow and flood routing model for water resources optimization. *Scientific Reports*, 12:3937. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06075-0>
- [3] Department of Sustainability and Environment (2006), Resource allocation model (REALM), Victoria, Australia. (Available at <http://www.dse.vic.gov.au/DSE/wcmn202.nsf/>)
- [4] Draper, A. J., A. Munevar, S. K. Arora, E. Reyes, N. L. Parker, F. I. Chung, and L. E. Peterson (2004), CalSim: Generalized model for reservoir system analyses, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 130(6), 480–489.
- [5] Dobson, B., Wagener, T., and Pianosi, F., 2019. An argument-driven classification and comparison of reservoir operation optimization methods. *Advances in Water Resources*, 128 (October 2018). 74–86. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.advwatres.2019.04.012
- [6] Evenson, D. E., and J. C. Moseley (1970), Simulation/optimization techniques for multi-basin water resource planning, *Water Resources Bulletin*, 6(5), 725–736.
- [7] EWater Academy. EWater Model. <https://ewater.org.au/ewater-academy/>. Last accessed in Oct. 2022.
- [8] Government of Victoria, Australia, 2020. REALM - resource allocation model. Available from: <https://www.water.vic.gov.au/water-reporting/surface-water-modelling/resource-allocation-model-realm>, (accessed 14 March 2021).
- [9] Ilich, N and N.K. Manglik. 2022. The Battle of River Basin Models: The Narmada River Basin Challenge. *Hydrological Sciences Journal*, published on line in August 2022, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2022.2105651>



- [10] Ilich, N. 2021. WEB.BM – a Web Based River Basin Management Model with Multiple Time Step Optimization and the SSARR Channel Routing Options. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 6 (2) p. 175-190.
- [11] Ilich, N. and A. Basistha. 2021. Importance of multiple time step optimization in river basin planning and management: a case study of Damodar River basin in India. *Hydrological Sciences Journal*. Vol.66 (5), p. 809-825.
- [12] Kuczera, G., and G. Diment (1988), General water supply system simulation model: WASP, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 114(4), 365– 382.
- [13] Labadie, J. W. (2004), Optimal operation of multireservoir systems: A state-of-the-art review, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 130(2), 93–111.
- [14] Labadie, J. W., D. A. Bode, and A. M. Pineda (1986), Network model for decision-support in municipal raw water supply, *Water Resour. Bull.*, 22(6), 927–940.
- [15] Needham, J. T., D.W. Watkins Jr., and J. Lund (2000), Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines rivers, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 126(3), 118– 127.
- [16] Perumal M. and B. Sahoo. 2008. Volume Conservation Controversy of the Variable Parameter Muskingum–Cunge Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (4), 475-485.
- [17] Randall, D., L. Cleland, C. S. Kuehne, G. W. Link, and D. P. Sheer (1997), Water supply planning simulation model using mixed-integer linear programming “engine,” *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 123(2), 116–124.
- [18] RTC-Tools, 2022. DeltaRes. <https://oss.deltares.nl/web/rtc-tools/features>, last accessed Oct. 2022.
- [19] US Corps of Engineers. 1998. HEC-5 Simulation of Flood Control and Conservation Systems. User’s Manual, Version 8.0. [https://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-5\\_UsersManual\\_\(CPD-5\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-5_UsersManual_(CPD-5).pdf)
- [20] US Army Corps of Engineers, 2021. Program description and user manual for SSARR - streamflow synthesis and reservoir regulation. Available from: <http://137.229.188.87/susitnadocfinder/Record/dbtw1955>
- [21] Victoria State Government, 2021. Resources Allocation Model (REALM). Available from: <https://www.water.vic.gov.au/waterreporting/surface-water-modelling/resource-allocation-modelrealm>, last accessed on Oct. 10, 2022.
- [22] Williams, J., 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 12 (1), 100–103. doi:10.13031/2013.38772
- [23] Windsor, J. S. (1973), Optimization model for operation of flood control systems, *Water Resour. Res.*, 9(5), 1219– 1226.
- [24] Yates, D., et al., 2005. WEAP21 – a demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1. *Water International*, 30 (4), 501– 512. doi:10.1080/02508060508691894
- [25] Yeh, W. W.-G. (1985), Reservoir management and operations models: A state-of-the art review, *Water Resour. Res.*, 21(12), 1797–1818.
- [26] Zagona, E. A., T. J. Fulp, R. Shane, T. Magee, and H. M. Goranflo (2001), RiverWare: A generalized tool for complex reservoir system modeling, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 37(4), 913– 929.

USING MATHEMATICAL OPTIMIZATION TO MANAGE FLOODS - A CASE STUDY  
OF DAMODAR RIVER BASIN IN INDIA

by

Dr. Neša ILIĆ, Senior Consultant  
National Hydrology Project  
New Delhi, India

## Summary

Development of multi-purpose storage reservoirs in Damodar River Basin started in the 1950s, and it was primarily driven by a desire to introduce flood control capabilities in the lower part of the basin. Historically, the use of previous flood related models relied on established rule curves for reservoirs, which are not very useful for moderating reservoir operation during floods since each flood is unique. A new approach is presented in this paper that is based on short term flood forecasts and conjunctive use of all five reservoirs so as to minimize the negative effects of flooding downstream of Durgapur Barrage. Reservoir operation is determined by using the WEB.BM mathematical optimization program which takes into account forecast inflows and all relevant constraints, including the hydrological channel routing through the system. The

results of this study show that all eleven catastrophic floods that happened between 1961 and 2018 could have been kept within the full bank capacity downstream of Durgapur Barrage if the reservoirs were operated based on the model solutions and based on the assumed reliable runoff forecast for a three-day time horizon. This is the first time an optimization-based model that takes into account reservoir and hydrological channel routing has been applied in India. It holds out a promise of better computerized real time management of floods in Damodar Basin, as well as in other basins where reliable short term runoff forecasts can be developed.

Key words: mathematical optimization, reservoir operation, hydrologic channel routing