

RAZVOJ METODA ZA UPRAVLJANJE VODAMA I UREĐENJE TERITORIJE U ZONI SISTEMA OSETLJIVIH NA POPLAVE – NA PRIMERU RUDNIKA I TERMOELEKTRANE GACKO

Tina DAŠIĆ¹⁾, Branislav ĐORĐEVIĆ, Petar MILANOVIĆ,
Miloš STANIĆ¹⁾, Nenad JAĆIMOVIĆ¹⁾, Nedeljko SUDAR²⁾

¹⁾ Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

²⁾ Zavod za vodoprivredu, Bijeljina

*Potrebno je blagovremeno raditi na regulacijama i namenskom uređenju teritorije, kako bi se štete od poplava umanjile ili otklonile.
(Jedan od baznih principa zaštite od štetnog delovanja voda)*

REZIME

Veliki sistemi kako što su rudnici sa otvorenim kopovima i termoelektrane posebno su osetljivi na plavljenje. Ispad iz pogona takvih sistema zbog plavljenja kopova i/ili ugrožavanja drugih vitalnih instalacija sistema - izaziva teške posledice na najširem prostoru, na nivou države, jer se štete i zastoji u radu lančano prenose na sve proizvodne sisteme i naselja. Zbog toga je neophodno da se zaštita takvih sistema od velikih voda veoma ozbiljno razmatra, primenom matematičkih modela, na dva nivoa: (a) tokom namenskog uređenja teritorije u okruženju sistema da mogu bez drastičnih posledica da izdrže ekstremne hidrološke situacije, (b) tokom operativnog upravljanja takvim sistemima u periodima velikih voda.

U članku se na primeru rudnika i TE Gacko razmatraju mogućnosti realizacije oba zadatka primenom savremenih metoda matematičkog modeliranja. Razvijen je spregnuti matematički model koji, primenjen na RiTE Gacko, omogućava: (a) da se ispitaju hidrološko-hidraulički scenariji dešavanja u široj zoni tog sistema tokom pojave velikih voda, kako bi se sagledalo kako treba planski urediti šire okruženje (nasipi, retnozije) da ne bi došlo do ugrožavanja vitalnih objekata, (b) da se tokom odvijanja nepovoljne hidrološke situacije omogući da se upravljačkim softverom, uz korišćenje informacija koje se u realnom vremenu sakupljaju sa sliva, donose najpovoljnije upravljačke odluke za korišćenje postojećih akumulacija i retnozija, kako bi se zaštili najvitalniji objekti tog važnog i vrlo osetljivog energetskog sistema.

Ključne reči: Zaštita od poplava, upravljanje akumulacijama, RiTE Gacko, reka Mušnica

UVOD

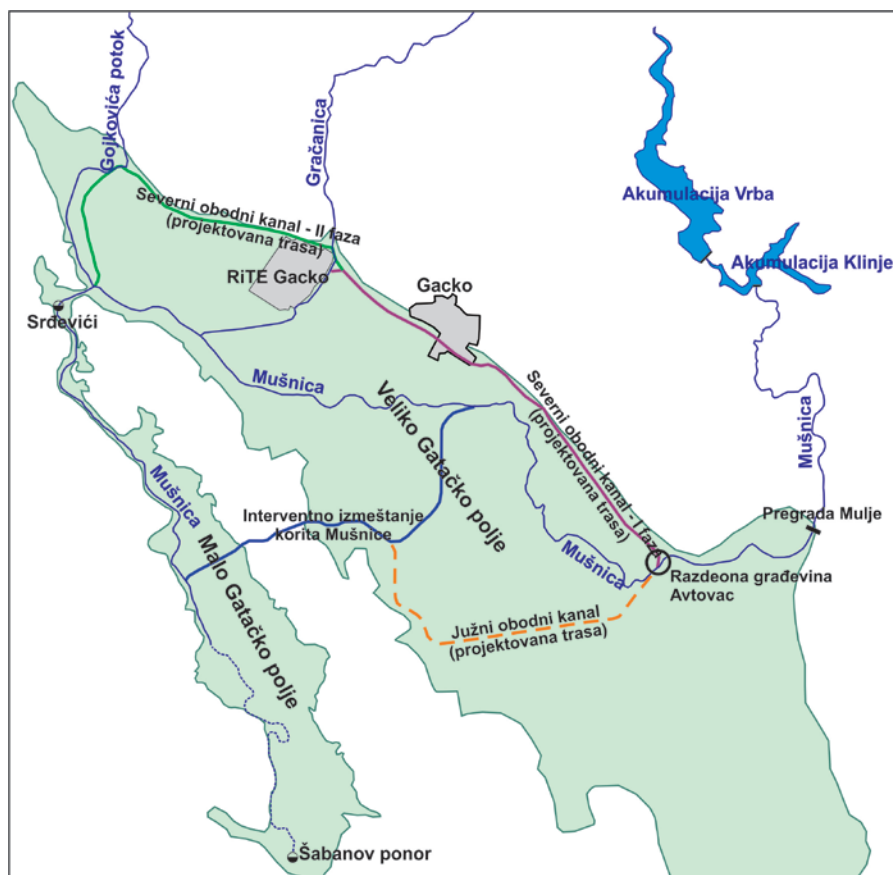
Ekstremni hidrološki događaji koji su se javili 2013. godine u slivu reke Mušnice (podsliv reke Trebišnjice u Istočnoj Hercegovini), koji su ugrozili funkcije RiTE Gacko, kao i u maju 2014. godine koji su ugrozili površinske kopove Kolubare i Kostolca i odgovarajuće termoelektrane, ukazali su na izuzetan značaj preduzimanja blagovremenih radova i mera kojima se takvi energetski sistemi štite i hidrograđevinskim i upravljačkim merama. Hidrograđevinske mere podrazumevaju realizaciju zaštitnih sistema, kao vid blagovremenog uređenja teritorije, sa linijskim zaštitnim sistemima (pasivne mere zaštite), kao i aktivnim merama, koje čine akumulacije i retnozije kojima se talasi velikih voda ublažavaju. Upravljačke mere podrazumevaju izradu odgovarajućih upravljačkih matematičkih modela (MM), kao savetodavnih sistema, koji obezbeđuju operatorima da tokom odbrane od poplava korišćenjem informacija o padavinama, protocima i stanjima u sistemu - koje se sakupljaju tokom razvoja hidrološke situacije - mogu da donose najbolje upravljačke odluke. Te odluke su veoma bitne za korišćenje postojećih zaštitnih sistema (upravljanje akumulacijama i retnozijama), kao i za pravovremene intervencije na mestima za koja je MM blagovremeno upozorio da se mogu očekivati prekoračenja dozvoljenih nivoa i ugrožavanje branjenih područja.

Imajući u vidu tu činjenicu nadležni u RiTE Gacko su odlučili da se uradi studiju čija je svrha:

- da se blagovremeno proveriti stanje zaštitnih sistema u zoni RiTE i stepen njihove zaštite,
- da se analizira pouzdanost funkcionisanja realizovanih ili planiranih veštačkih kanala kojima se vodotoci postupno izmeštaju na nove lokacije zbog širenja kopova,
- da se uradi matematički model koji bi omogućio da se u uslovima operativne odbrane od poplava, uz korišćenje meteoroloških prognoza (najava pojave padavinskih ciklona) i hidroloških informacija sa sliva (padavine, proticaji) donose najbolje odluke o upravljanju akumulacijama Vrba i Klinje,
- da se blagovremeno sagleda režim punjenja retenzije u Malom Gatačkom polju, koja je ključni objekat zaštitnog sistema, kako bi se po potrebi pouzdano pripremio za ekstremne hidrološke događaje. Rad na ovoj studiji, bitnoj za bezbedan razvoj RiTE Gacko doneo je istraživačke i razvojne prodore koji imaju širu metodološku primenljivost, što je tema ovog članka.

RUDNICI I TE GACKO U SLIVU MUŠNICE I NAČIN NJIHOVE ZAŠTITE

Reka Mušnica sa svojim sastavnicama i pritokama drenira sliv površine od oko 260 km² (do VS Srđevići) i predstavlja jedini odvodnik za Veliko i Malo Gatačko polje, koji se nalaze na platoima od oko 950÷1000 mnm. U Malom Gatačkom polju (MGP) vode Mušnice poniru, zavisno od hidrološke situacije, u više grupa ponora – od ponora Srđevići kao prvog u nizu, do grupe ponora u zoni Šabanovog ponora (slika 1), odakle podzemnom karstnom hidrografijom dospevaju u sliv Trebišnjice. Pošto su kapaciteti ponora u MGP ograničeni na oko 120 m³/s, pri većim vodama polje se plavi i deluje kao retenzija, koja se nakon poplavne epizode postepeno prazni kroz ponore. Sliv je pod uticajem modifikovane maritimne klime sa velikim padavinama u periodu [novembar - april] i vrlo sušnim letima. U skladu sa tim režim voda je veoma neravnomeran, sa ekstremnim padavinama i povodnjima u hladnom delu godine, i sa vrlo izraženim malovodnim periodima tokom leta i jeseni.



Slika 1. Šema sistema Mušnice u zoni RiTE Gacko

Ključni vodoprivredni problem tog hidrografski i hidrogeološki vrlo složenog sliva je sledeći. U Velikom Gatačkom polju se nalaze zalihe uglja koje se eksploatišu površinskim kopovima, tako da su i kopovi i svi vitalni sadržaji TE Gacko u zoni rizika od poplava u hladnom delu godine, dok je u malovodnom periodu glavni problem da se sa velikom pouzdanošću obezbede potrebne količine vode za RiTE Gacko. Da bi se problem snabdevanja vodom pouzdano rešio sagrađena je akumulacija Vrba na istoimenoj sastavnici Mušnice (korisna zapremina $12 \times 10^6 \text{ m}^3$), koja zajedno sa nizvodnom akumulacijom Klinje, sagrađenom još 1898. godine za potrebe navodnjavanja, predstavlja sistem iz koga se vodom snabdevaju RiTE Gacko, sistem za navodnjavanje i obezbeđuje ekološki protok Mušnice, što je bitno za skladan urbani razvoj Gacka. Hidrotehničku problematiku čini još složenijom činjenica da je neophodno da se zbog širenja kopova izmeštaju korita Mušnice i nekih njenih protoka, tako da će se u konačnoj konfiguraciji zona kopova zaobići obilaznim kanalima, Severnim i Južnim, sa razdeonom građevinom u zoni Avtovca. Ovom građevinom će se vode reke Mušnice do protoka od oko $20 \text{ m}^3/\text{s}$ usmeravati Severnim obodnim kanalom, što je bitno zbog urbano-komunalnog razvoja Gacka, dok će se velike vode usmeravati novoprojektovanim izmeštenim koritom kroz Veliko Gatačko polje neposredno ka Malom Gatačkom polju (MGP), čime se štiti zona kopova (slika 1). Pošto MGP deluje kao retenzija, od čije sposobnosti da prihvati velike vode zavisi bezbednost kopova i TE Gacko, ona se, takođe, štiti nasipima i njihovo pravilno dimenzionisanje primenom modela je jedan od veoma bitnih zadataka modeliranja.

Višenamenske akumulacije Vrba i Klinje su vrlo bitni elementi vodoprivrednog sistema. One obezbeđuju vodu za RiTE Gacko, sistem za navodnjavanje i ekološke protoke u Mušnici, ali se dobrim upravljanjem, koje podrazumeva i pravovremeno pretpražnjenje akumulacije Vrba, mogu iskoristiti i za aktivnu zaštitu od velikih voda. Upravljanje tim akumulacijama, kao i retenzijom u MGP su ključna tema ovog članka.

UPRAVLJAČKI MODELI I MOGUĆNOSTI NJIHOVOG KORIŠĆENJA

U novije vreme u Srbiji i Republici Srpskoj su načinjeni ozbiljni istraživački prodori u oblasti razvoja i primene matematičkog modeliranja hidroloških fenomena i u najsloženijim hidrografskim i hidrogeološkim uslovima karsta. Nastavak aktivnosti na realizaciji davno započetog projekta proširenja Višenamenskog sistema Trebišnjice na tzv. Gornje horizonte (sistemi 'Dabar' i

'Nevesinje') podrazumevao je i vrlo temeljitu proveru uticaja takvih objekata na hidrološke i ekološke procese u najširem okruženju, uključujući i susedni sliv Neretve. U okviru tih aktivnosti razvijane su dve klase modela: (1) Modeli tipa 'crne kutije', koji se na najvišem nivou formalizuju relacijom $\{xRy\}$, gde su (x) ulazi u sistem i (y) izlazi iz njega, kao vektorske veličine, jer ih može biti više (više ulaznih vodotoka i više merodavnih kišomera), dok je **R** operator preslikavanja ulaza u izlaz, čija se matematička formalizacija traži modeliranjem. (2) Modeli tipa 'providne kutije', ili, fizički zasnovani modeli, koji ne definišu samo relacije ulazno-izlaznog preslikavanja, već kao međurezultate prikazuju i razvoj procesa u pojedinim segmentima sistema (površinsko i podzemno tečenje u bitnim čvorovima hidrografske mreže, stanje u zoni naselja, itd.). Nakon razvoja i konkretne primene obe klase matematičkih modela, mogu se izvući neka vrlo korisna metodološka uopštavanja, koja imaju značaj za sva dalja istraživanja.

Klasa modela tipa 'crne kutije'. Ta klasa modela je vrlo pouzdana za rešavanje veoma čestih zadataka koji se postavljaju u hidrotehničkoj praksi: postoje pouzdane, osmatranjem dobijene, simultane serije ulaza u sistem (x) i izlaza iz sistema (y), pa se traži operator preslikavanja (**R**) koji taj proces transformacije (preslikavanja ulaza u izlaz) uspešno analitički opisuje. Svrha definisanja operatora preslikavanja je višestruka i u apriornom i u aposteriornom korišćenju: • prognostička uloga: on omogućava da se na osnovu osmatranja ulaznih procesa (x) (padavine, protoci) pouzdano prognoziraju izlazi (y) iz sistema (protoci), • rekonstrukcija hidroloških događaja, posebno onih ekstremnih, • apriorna analiza mogućih promena u širem hidrološkom i ekološkom prostoru sliva ukoliko se nekim radovima u slivu izmene pojedine komponente vektora ulaza (zbog akumulisanje i/ili derivacija vode, prevođenje vode, itd.).

U toj klasi su se najpouzdanijim pokazali modeli koji se zasnivaju na višedimenzionalnoj korelaciji i autokorelaciji, pri čemu se serije ulaza i izlaza tretiraju kao složeni markovski procesi. To podrazumava da hidrološke serije imaju fizički logičnu 'inerciju' procesa, po kojoj realizacija procesa (x_i) u vremenskom preseku (i) zavisi od realizacija tog procesa u (τ) prethodnih koraka: $x_i = f(x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_{i-\tau})$. Vektorski ulazni proces mogu da čine padavine, proticaji na raznim ulaznim profilima, nivoi podzemnih voda u referentnim piježometrima, a izlazi su, najčešće, proticaji na izlaznim profilima iz sliva, ali i u širem okruženju, u susednim slivovima, ukoliko se radi o veoma karstifikovanim područjima. Takvi su slivovi u

istočnoj Hercegovini, sa vezama u podzemnoj hidrografiji, često i sa pojavom bifurkacije – tečenja u dva pravca, zavisno od hidrološke situacije. To je bilo polazište za dalji razvoj, unapređivanje i primenu modela tipa ARMA (*Autoregressive Moving Average*). Modeli tog tipa omogućavaju da se razmatranjem raznih kombinacija procesa koji ulaze u model, kao i dužina međusobno zavisnih članova (τ) koji se obuhvataju složenim markovskim lancem, optimiziraju modeli, po kriterijumu najboljeg slaganja modelom dobijenih veličina izlaza i izmerenih veličina koje su se zaista desile u izmerenoj simultanoj seriji.

Modeli ove klase su veoma uspešno primenjeni za analizu hidroloških procesa koji će se dešavati na prostoru istočne Hercegovine nakon realizacije sistema na Gornjim horizontima. Trebalo je ispitati da li će realizacija planiranog sistema izazvati neke hidrološke i ekološke posledice na vrelima Bune, Bunice i Bregave, koje se nalaze u slivu Neretve, imajući u vidu karstifikaciju i hidrogeološku povezanost slivova Trebišnjice i Neretve. Taj problem je veoma uspešno metodološki rešen, primenjen i prikazan u radu [13]. Slivovi su dekomponovani na podsisteme - entitete po hidrogeološkim osobenostima i povezanostima podzemne hidrografije, a zatim su urađeni matematički modeli koji su optimizirani u skladu sa već iznetim principom da se traži najbolje slaganje modela za razne kombinacije dužina segmenata složenog markovskog lanca ulaznih padavina i proticaja. Optimizacije su pokazale da MM daje najbolje rezultate kada se u složenom markovskom lancu obuhvati povezanost protoka, odnosno padavina u ne više od 2-3 uzastopna dana ($\tau \leq 3$), a da se sa produžavanjem tih povezanih vremenskih segmenata pogoršava kvalitet modeliranja.

Tariranja modela sa osmotrenim serijama padavina na dekomponovanim podsistemima, kao i protoka na na svim bilansno bitnim vodotocima, pokazala su da se može ostvariti visoka tačnost modela, ocenjivana koeficijetima korelacije modeliranih i realizovanih protoka. Koeficijenti korelacije realnih i modelima dobijenih dnevnih protoka su: za Bunu (Malo Polje): 0,992, za Bunicu (Malo Polje): 0,962, za Bregavu (Do): 0,991. Ovako visoka slaganja pokazuju da je MM bio veoma uspešno optimiziran, i da su zaključci koji su dobijeni o budućim vodnim režimima na tim rekama pouzdani. A ti vrlo bitni zaključci, koji su analitički dokazani u radu [13], pokazuju da će se nakon završetka projekta 'Gornji horizonti' vodni režimi na pomenute tri reke poboljšati: • smanjiće se velike vode na Buni i Bunici, što je dobro sa gledišta zaštite od poplava doline Neretve (na kojoj povodnji vremenski koincidiraju sa

povodnjima na slivu Trebišnjice), • neće se menjati režimi malih voda na Buni, Bunici i Bregavi; • na reci Bregavi se namenskim upravljanjem akumulacijama, kao i namenskim regulacionima radovima na smanjenju gubljenje vode, male vode u zoni Stoca mogu se povećati u odnosu na sadašnje prirodno stanje. To poboljšanje bi se veoma dobro odrazilo na uslove za urbani razvoj Stoca i ekološke prilike u njemu u malovodnim periodima. Takve aktivnosti na regulaciono-ekološkom uređenju korita reka se sve češće koriste u svetu kao metode rehabilitacije reka. Takve mere su jedini efikasan način ekološkog uređenja vodotoka u uslovima sve očitijeg pogoršenja ekstremnih hidroloških fenomena, koje su rezultat kimatskih i ekoloških promena [15].

Fizički zasnovani modeli, ili, modeli 'providne kutije' su znatno složeniji od prethodnih i postoji znatno više parametara (procesa) kojima treba raspolagati i koje treba kalibrisati. Za razliku od prethodne klase modela njima se ne određuje samo operator preslikavanja ulaza u izlaz, već modelom oponašaju fizičke zakonitosti kojima se opisuje transformacija padavina u površinski i podzemni oticaj. Zato modeli kao međurezultat pokazuju i šta se u pogledu vodnog bilansa dešava u pojedinim bitnim čvorovima sistema (zbog toga i naziv 'providne kutije').

Od tri klase mogućih modela tog tipa – prostorno homogenih, prostorno delimično raspoređenih i prostorno raspoređenih, razvijena je najsloženija klasa prostorno raspoređenih modela, koja omogućava najbolje modeliranje u uslovima karsta, kod koga se sreću upravo velike prostorne karstne različitosti [8,16]. Razvijen je i višestruko proveravan hidrološki 3 Dnet-CATCH model [8]. Model je pogodan i za uslove karsta, kod kojih je karstna struktura veoma heterogena, jer omogućava da se prostor razloži na manje podsisteme proizvoljnog oblika i različitih površina (podslivove - CACTH) koji imaju slične hidrogeološke osobenosti (koeficijenti vertikalne filtracije, poroznost, karakteristične vlažnosti, itd.). Nad ovim elementima se najprije vrši proračun vertikalnog vodnog bilansa. U okviru prostorne diskretizacije, korišćeni su još elementi koji predstavljaju karstne izdani, karstna polja, veštačke akumulacije i hidrauličke veze koje u hidrauličkom smislu povezuju prethodno navedene elemente kao čvorove sistema. Površinski i podzemni tokovi su linijske, hidrauličke veze, kojima se modelira horizontalni vodni bilans.

Modeli ove klase omogućavaju rešavanje istih zadataka koji su već nabrojani za ARMA modele: prognoze

potrebne za operativno upravljanje, rekonstrukciju ekstremnih hidroloških događaja, apriorna sagledavanja šta će se u sistemu desiti ako se primene neka upravljanja u sistemu, ili ako se izvrše neke izmene u konfiguraciji i parametrima sistema (realizacija novih kanalskih sistema, nasipa, dogradnja novih akumulacija ili retenzija, itd.).

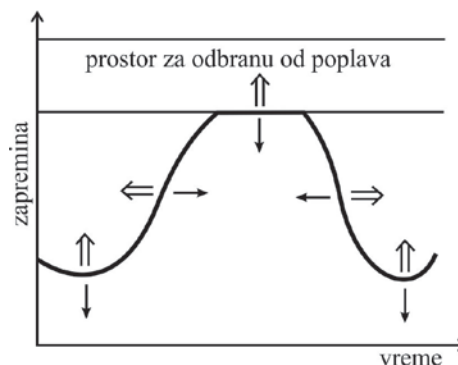
Iskustva i preporuke za korišćenje modela. Na izbor modela bitno utiču raspoloživi podaci. U tom pogledu su mnogo zahtevniji fizički zasnovani modeli. No, čak i u slučaju da se raspoloža se dovoljnim informacijama za izradu modela iz obe klase, mogu se dati sledeće preporuke.

(1) Ukoliko se kao izlazni rezultat modela traže samo izlazni protoci (y), u okviru preslikavanja $\{xRy\}$, onda treba odabrati model ARMA, jer se njegovim optimiziranjem mogu postići odlična slaganja Prirode i modela. Upravo je zbog toga taj tip modela i odabran za razmatranje problema apriornog sagledavanja hidroloških procesa na Buni, Bunici i Bregavi u uslovima realizacije sistema Gornji horizonti, tako da su dobijeni rezultati koji su potpuno verodostojni.

(2) Ukoliko je potrebno da se osim izlaza (y) sagledaju i neke druge veličine kao međurezultati (protoci u nekim ključnim čvorovima u sistemu, u zoni naselja i nekih objekata na slivu, stanja u retenzijama i/ili akviferima, itd.), onda je svrsishodnije da se koriste fizički zasnovani modeli. Upravo je to bio razlog što je za razmatranje sistema Mušnice u zoni RiTE Gacko odabran model 3 Dnet-CATCH, koji se pokazao veoma uspešnim.

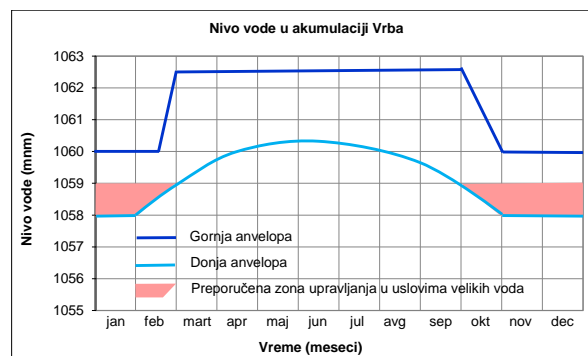
STRATEŠKA ZAKLJUČIVANJA PRIMENOM RAZVIJENOG MODELA

Matematički 3Dnet CATCH model za sliv i vodoprivredni sistem Mušnice imao je niz specifičnosti: postojanje akumulacija Vrba i Klinje, postojanje retenzije u Malom Gatačkom polju koja je veoma važan element zaštitnog sistema RiTE Gacko, neizvesnosti oko dinamizma aktiviranja ponora i pražnjenja te retenzije, jer su karstni ponori preko kojih se retenzija prazni raspoređeni po celoj dužini polja, dinamizam razvoja konfiguracije sistema, jer se Mušnica i delovi nekih njenih pritoka fazno izmeštaju po obodu velikog Gatačkog polja, kako bi se oslobodio prostor za širenje površinskih kopova. Primenom tog modela dobijeni su vrlo korisni zaključci za upravljanje tim sistemom, od kojih neki imaju u širi metodološki značaj.



Slika 2. Sukobljeni interesi za režime punjenja i pražnjenja akumulacije dva korisnika akumulacije: za snabdevanje vodom (smer interesa: ⇒) i aktivne zaštite od poplava (smer interesa: →)[3]

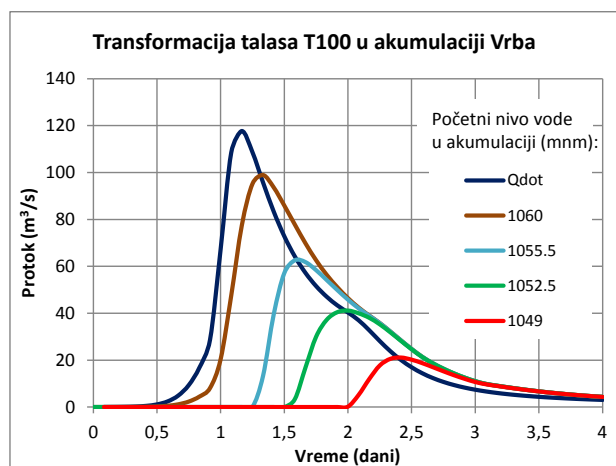
Modeliranje ukazuje na veliki značaj višenamenskih akumulacija sa godišnjim regulisanjem, čak i ako se njima ne kontrolišu velike površine sliva. Akumulacija Vrba, planirana prevashodno kao objekat za snabdevanje vodom RiTE Gacko, mada kontroliše relativno malu površinu (30 km²), kao akumulacija sa godišnjim regulisanjem u čeonom delu sliva može adekvatnim upravljanjem da dobije značajnu ulogu i u zaštiti od poplava. Uslov je da se upravljanje zasniva na vrlo operativnom modelu, koji omogućava da se upravljački deluje odmah nakon dobijanja informacija o nailasku velikih padavinskih ciklona. Suština upravljačkog problema režima punjenja i pražnjenja takvih akumulacija je prikazana na slici 2. Dva ključna korisnika, snabdevanje vodom i zaštita od poplava, imaju suprotne strategije: snabdevanje vodom je zainteresovano da se kote u akumulaciji podižu i brže i više (smer interesa upravljanja: ⇒), dok je interes zaštite od poplava suprotan (oznaka →): da se obezbeđuje što veći prostor za prijem talasa.



Slika 3. Teoretske anvelope i pojas preporučenih poželjnih nivoa akumulacije Vrba za rad u normalnim uslovima

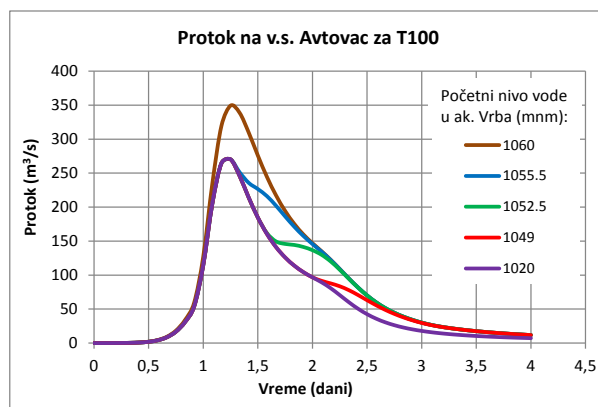
Brojnim simulacijama rada akumulacije u raznim hidrološkim uslovima – malovodnim i sa povodnjima – može se doći do dijagrama poželjnih stanja u akumulaciji tokom godine (slika 3). On je definisan gornjom i donjom anvelopom, pa se smisao dugoročnog (godišnjeg) upravljanja u normalnim okolnostima svodi na to da se trajektorija stanja akumulacije održava u granicama između dve anvelope (videti sliku 3). To omogućava da se u slučaju prognoze nailaska cilona sa velikim padavinama odmah započne sa namenskim obaranjem kota u jezeru, kako bi se povećala zapremina za prijem i ublažavanje talasa velikih voda.

Modelom su analizirani efekti ublažavanja poplavnih talasa u akumulaciji Vrba (slika 4), ali i na drugim bitnim mestima nizvodno, zavisno od nivoa u jezeru na koji nailazi talas. Zapaža se mogućnost efikasnog ublažavanja povodnja ukoliko je akumulacija snižavanjem kota pripremljena za takvo delovanje. Prognoze nailaska velikih padavinskih ciklona sada su dosta ažurne i pouzdane, daju se bar jedan dan ranije, i oni su bitna upravljačka informacija koja omogućava da se poveća efikasnost delovanja u uslovima operativne odbrane od poplava. Dijagrami tog tipa, na raznim mestima u hidrografskoj mreži (na slici 5 se daju efekti ublažavanja u zoni naselja Avtovac), omogućavaju da se sagledaju realni stepeni zaštite, što je vrlo bitno jer se na osnovu toga mogu blagovremeno planirati mere uređenja teritorije za zaštitu (nasipi, dodatne retenzije, itd.).



Slika 4. Ublažavanje talasa stogodišnje vode (T100) u akumulaciji Vrba za razne kote (mm) sa kojih započinje prijem talasa (desno)

Jedna od specifičnosti sistema za zaštitu RiTE Gacko je postojanje prirodne retenzije u Malom Gatačkom polju



Slika 5. Ublažavanje talasa stogodišnje vode u naselju Avtovac u raznim uslovima korišćenja akumulacije Vrba

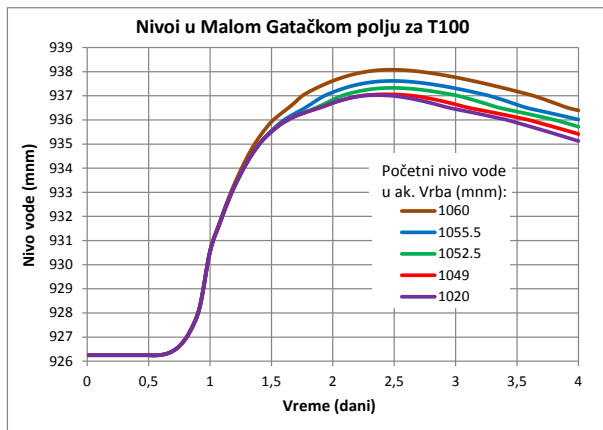
(MGP). Polje počinje da se puni kada dotok rekom Mušnicom postane veći od kapaciteta gutanja ponora duž južnog oboda Malog Gatačkog polja (od Srđevića do Šabanovog ponora), kojima kroz podzemnu karstnu hidrografiju voda otiče prema prema vrelima Trebišnjice i Fatničkom polju.

Jedna od ključnih informacija koja je potrebna sa gledišta uređenja teritorije za bezbednu zaštitu od poplava RiTE Gacko je određivanje kota do kojih će se podići nivo u MGP pri nailasku povodnja, kako bi se videlo da li su svi delovima RiTE Gacko bezbedni. Razvijen model daje i tu izuzetno važnu informaciju. Na slici 6 je prikazan taj rezultat: kote do kojih će se podići nivo plavljenja u MGP zavisno od upravljanja u akumulaciji Vrba. Takav rezultat ima višestruku primenu, od kojih su dve posebno bitne.

(a) *Uređenje teritorije.* Brojnim apriornim modeliranjima, za pretpostavljene padavinske situacije raznih verovatnoća visina padavina i intenziteta, mogu se na vreme, u normalnim okolnostima, sagledati opsezi plavljenja u Malom Gatačkom polju. To daje neophodne elemente za blagovremeno uređenje prostora te prirodne retenzije (visine nasipa oko nje, uređenje ponskih zona, namenska oblikovanja terena prosecanjem useka do ponora na nešto višim kotama, kako bi se što pre aktivirali ti ponori kao odvodnici u cilju smanjenja visine plavljenja i skraćivanja trajanja plavljenja, itd.).

(b) *Operativno upravljanje.* Tokom operativne odbrane od poplava, kada se već raspolaže sa prognozama o nailazećim padavinama, posebno o njihovom intenzitetu, model omogućava da se nađe najbolje upravljanje akumulacijom Vrba u tadašnjim okolnostima, i da se sagleda kako će se menjati nivoi plavljenja MGP, kao i

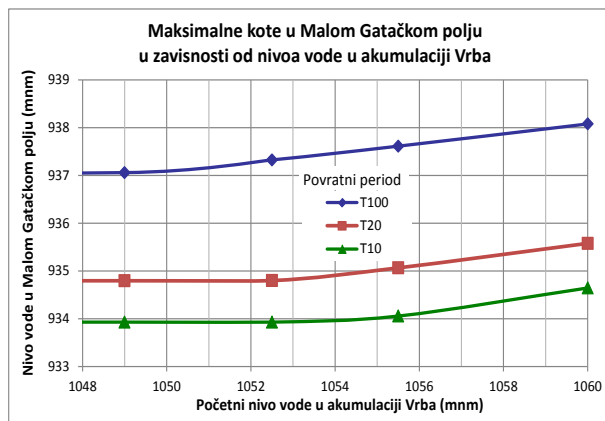
posledice na objekte RiTE Gacko. Takva informacija ima veliku operativnu vrednost.



Slika 6. Dinamika punjenja Malog Gatačkog polja u slučaju pojave stogodišnje velike vode (T100), za razne kote (mm) sa kojih započinje prijem talasa u akumulaciji Vrba

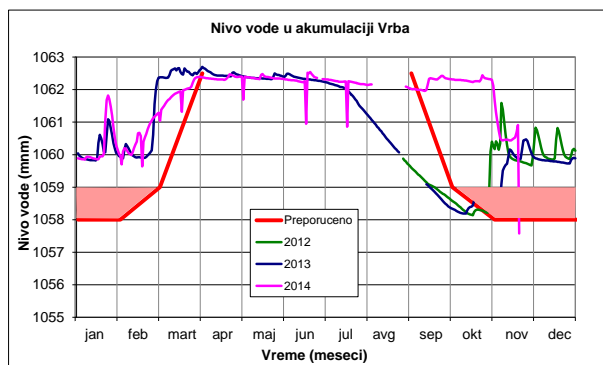
Da bi se sagledala upravljačka upotrebljivost modela za ispunjenje oba navedene zadatka, na slici 7 se prikazuje veza nivoa koji će se javiti u MGP zavisno od upravljanja akumulacijom Vrba, za razne vetovatnoće nailaska poplavnog talasa (talasi verovatnoća 1%, 5% i 10%). Dobija se veoma važna apriorna informacija, koja, nakon provera sa dodatnim analizama primenom ovog modela, pokazuje kako treba urediti / zaštititi taj deo teritorije: da bi se prostor uspešno zaštitio od poplava verovatnoće 1% (stogodišnja voda) treba pripremiti nasipe da mogu da izdrže kotu plavljenja u Malom gatačkom polju do 938,08 mm. Tome treba dodati i zaštitnu visinu do krune nasipa (*freeboard*) za zaštitu od talasa ne manju od $\Delta h=1,5$ m, jer često sredozemni padavinski cikloni koincidiraju sa nepogodama i jakim vetrovima koji izazivaju velike talase na poplavljenom Malom Gatačkom polju. Pošto nema mogućnosti da se na tom isturenom prostoru organizuju masovna dežurstva i intervencije priručnim sredstvima, zaštitna visina od kote plavljenja do kote nasipa treba da bude pouzdana da ne dođe do oštećenja.

Model omogućava da se brojnim simulacijama dobiju što očiglednija pravila upravljanja, ona koja omogućavaju operaterima koji upravljaju sistemom da i u uslovima vremenske iznudice i stresa (koji su normalna pojava u uslovima odbrane od ekstremno velikih voda) donose što bolje upravljačke odluke. Na slici 8 je dat sintezni grafik, dobijen nakon niza simulacija mogućih kriznih hidroloških situacija, na



Slika 7. Efekti koji se ostvaruju u Malom Gatačkom polju u slučaju pojave talasa T100, T20 i T10, za razne kote (mm) sa kojih započinje prijem talasa u akumulaciji Vrba (desno)

kome je prikazana preporučena zona održavanja nivoa u akumulaciji Vrba (crvena zona i crvena dispečerska linija) tokom ciklusa godišnjeg punjenja i pražnjenja akumulacije, imajući u vidu i njenu ulogu u zaštiti od poplava. Zavisno od vodnosti moguća su kratkotrajna prekoračenja i iznad i ispod navedene zone (linije), ali je poželjno da se nakon tih prekoračenja, ako to hidrološke prilike omogućavaju, nivoi postepeno ponovo približe toj poželjnoj dispečerskoj liniji.



Slika 8. Preporučena zona održavanja nivoa u akumulaciji Vrba (crvena zona) i dispečerske linije poželjnih nivoa tokom ciklusa godišnjeg punjenja i pražnjenja akumulacije

Primena takvog pravila omogućiće poboljšanje efekta zaštite od poplava, kao bitnu meru tzv. aktivne zaštite (ublažavanja talasa u akumulaciji). Zapaža se da su u prošlosti, dok se nije vodilo računa o efektima akumulacije na ublažavanje talasa, održavane kote na višim nivoima, što je bilo logično po tadašnjem

kriterijumu korišćenja akumulacije isključivo kao objekta snabdevanja vodom RiTE Gacko. U novim okolnostima, preuzimanjem i zadataka aktivne zaštite od poplava, anvelope stanja će se, svakako, spustiti niže i približiti grafiku preporučenih nivoa.

Model je pokazao svoju visoku operativnost (simulacije se obavljaju u vremenu od po par sekundi), što omogućava da se veoma mobilno koristi za upravljanje u kriznim hidrološkim situacijama nailaska talasa velikih voda. Da bi se što bolje iskoristile njegove visoke performanse potrebno je da ga prati i odgovarajući IS (merno informacioni sistem), sa malim brojem kišomera, vodomera i bar jednim piježometrom – svi sa automatskim merenjem i 'on line' dostavom podataka do komandnog centra.

ZAKLJUČCI

Razvijane su i u praktičnim zadacima proveravane dve klase matematičkih modela za upravljanje vodoprivrednim sistemima: (a) višedimenzionalni korelacioni i autokorelacioni modeli, koji hidrološke procese tretiraju kao složene markovske serije, čiji je tipičan reprezent ARMA model, (b) fizički zasnovani modeli, čiji je reprezent namenski razvijen 3Dnet CACTH model. Obe grupe modela su se pokazali vrlo dobrim za rešavanje zadataka upravljanja vodoprivrednim sistemima, u ključnim upravljačkim situacijama: • u periodu planiranja i realizacije sistema i uređenja teritorije u cilju što bolje njene zaštite od poplava - za pouzdan izbor konfiguracija i parametara sistema, • u periodima operativnog upravljanja - kada je tokom razvoja krizne hidrološke situacije neophodno donositi brze i pouzdane odluke, čija je ispravnost i bezbednost prethodno proverena na matematičkom modelu. Nakon primene tih modela mogu se izvući sledeće preporuke i zaključci.

- Model ARMA je znatno pogodniji ukoliko se za rešavanje upravljačkog zadatka traže samo izlazni protoci (y), u okviru ulazno-izlaznog preslikavanja $\{xRy\}$, jer se optimiziranjem modela mogu postići odlična slaganja Prirode i modela, znatno bolja no u slučaju fizički zasnovanih modela.

- Fizički zasnovani modeli, koji analiziraju sve relevantne komponente vertikalnog i vodnog bilansa, mnogo su zahtevniji u pogledu vrste i broja potrebnih ulaznih podataka. Dobro razrađen reprezent te klase modela je 3 Dnet CATCH model, koji je razvijen i višestruko proveravan u uslovima karsta. Njega treba odabrati ukoliko su sa gledišta upravljanja sistemom

bitni i među rezultati, kao što su protoci u nekim ključnim čvorovima hidrografske mreže, stanja u retenzijama i u podzemnim akviferima. Primenjen na upravljanje sistemom Mušnice taj model je pokazao svoju visoku upotrebljivost i operativnost.

- Za zaštitu od poplava vitalno važnih objekata i prostora veliki značaj imaju akumulacije sa godišnjim regulisanjem, čak i u uslovima da kontrolišu i samo manje delove sliva. Njihovim umešnim upravljanjem uz primenu ovog modela, sa pretpražnjenjem zapremine u skladu sa prognozama nailazaka padavinskih ciklona, mogu se na nekim ključnim mestima u hidrografskoj mreži uspešno sprečavati koincidencije vrhova talasa velikih voda.

- Veoma važan doprinos modela je mogućnost apriornog proveravanja dešavanja i stanja u sistemu u raznim kriznim hidrološkim situacijama, sa padavinama raznih verovatnoća javljanja i raznih intenziteta. To omogućava da se blagovremeno i pouzdano ustanovi kako treba u normalnim okolnostima pripremiti teritoriju (nasipi, retenzije, kanalske derivacije za preusmeravanje protoka, oblikovanja terena nasipanjem ili prokopavanjem, itd.), kako bi se ostvarila zahtevana pouzdanost objekata i teritorije od poplavnih događaja.

- Da bi se omogućila najefikasnija operativna upotreba upravljačkih modela neophodna je adekvatna merno-informaciona podrška. Ona podrazumeva mali broj kišomera, vodomera i piježometara opremljenih pouzdanom opremom za automatsko merenje i dostavljanje podataka do upravljačkog centra. Nedvojbeno je utvrđeno da je za upravljanje mnogo bolje imati manji broj vrlo pouzdanih mernih stanica, nego veliki broj nepouzdatih.

- U uslovima karsta je bitno raspolagati i sa manjim brojem pouzdanih automatskih piježometara koji 'on line' dostavljaju podatke o stanju nivoa u podzemlju, jer je normalna pojava da kapaciteti ponora bitno zavise od stanja nivoa u akviferima u zaleđu. U nekim okolnostima zavisno od tog stanja ponori počinju da 'rade' kao estavele.

- Da bi se akumulacije što uspešnije koristile za prijem i ublažavanje poplavnih talasa poželjno je da raspolazu sa snažnim i vrlo operativnim evakuacionim organima, posebno temeljnim, i/ili srednjim ispustima. Poželjni su veliki kapaciteti tih organa, kako bi se u skladu sa rezultatima prognoza i modeliranja moglo da izvrši potrebno pretpražnjenje akumulacije za što uspešnije prihvatanje talasa. O tome treba voditi računa i pri

projektovanju i izboru opreme, jer operacija pretpražnjenja treba da se odvija u uslovima pune hidrauličke stabilnosti i građevine i opreme ispusta.

LITERATURA

- [1] Bonacci, O. (2015): Qwo vadis hydrologia? Kuda ideš Hidrologijo? *Vodoprivreda*, N^o 273-275, s.15-28
- [2] Dasic T. i B. Djordjevic: *Incorporation of water storage reservoirs into the environment*, Scientific Journal of Civil Engineering, Vol. 2, Issue 2, Skopje 2013 (pp. 7-16) ISSN 1857-839X.
- [3] Đorđević, B. (1990): *Vodoprivredni sistemi*, Naučna knjiga, Beograd, ISBN 86-23-41056-4
- [4] Djordjević, B. (1993): *Cybernetic in Water Resources Systems*, WRP, USA, pp. 620, ISBN 0-918334-82-9
- [5] Đorđević, B. & Dašić T (2011a): Water storage reservoirs and their role in the development, utilization and protection of catchment, *Spatium – International Review*, 24, pp 9-15
- [6] Đorđević, B. and Dašić T (2011b): Određivanje potrebnih protoka nizvodno od brana i rečnih vodozahvata, *Vodoprivreda*, 252-254, str.151-164
- [7] Đorđević, B., N.Sudar, U.Hrkalović i B.Knežević: *Strategija upravljanja vodama Republike Srpske*, *Vodoprivreda*, 261-263 (2013/1-3), s.3-20
- [8] Jaćimović, N., T.Dašić et al. (2015): Razvoj distribuiranog modela za simulacije oticaja na slivovima u karstu, *Vodoprivreda*, N^o 273-275, s.29-40
- [9] Milanović P. (2002): The environmental impacts of human activities and engineering constructions in karst regions. Episodes, *Journal of International Geoscience*, Vol. 25 No. 1. p. 13-21.
- [10] Milanović, P. (2006): *Karst istočne Hercegovine i dubrovačkog priobalja*. Izdavač ASOS, Beograd.
- [11] Milanović, S., Stevanović, Z. i Lj.Vasić (2010), *Vodoprivreda, Monitoring podzemnih voda Beljaničkog masiva u funkciji formiranja modela karstovog sistema*, *Vodoprivreda*, 246-248, str.199-212
- [12] Milanović, S. i Lj.Vasić (2011): Hidrološka osnova zaštite podzemnih voda u karstu na primeru Beljanice, *Vodoprivreda*, 252-254, str. 165-174
- [13] Milanović, P. i saradnici (2012): Uticaj delimičnog prevođenja voda iz slivova Bune u Bregave u sliv Trebišnjice, *Vodoprivreda*, N^o 255-257, s.3-24,
- [14] Milićević M., (1991). Uticaj čovjekovog rada na promjene prirodnog režima voda na kršu. D.P. Zavod za vodoprivredu, Sarajevo.
- [15] Popovska, C. i B.Đorđević: *Rehabilitacija reka – nužan odgovor na pogoršanje ekoloških i klimatskih uslova*, *Vodoprivreda*, 261-263 (2013/1-3), s.3-20, ISSN 0350-0519
- [16] Stanić, M. i T. Dašić (2005): Modeliranje vodnih režima u karstu, *Vodoprivreda*, 213-215, (1-3/2005), str. 83-93
- [17] Studija: Aktualizacija uticaja prevođenja voda Gornjih horizonata na režim površinskih i podzemnih voda (2009), Konzorcijum: Energoprojekt - Hidroinženjering, Beograd i Zavod za vodoprivredu, Bijeljina
- [18] Studija upravljanja vodnim resursom (višenamenskim akumulacijama 'Vrba' i 'Klinje' i režimima površinskih vodnih tokova u Gatačkom polju) u slivu rijeke Mušnice – I faza, Zavod za vodoprivredu, Bijeljina, 2015.
- [19] Touloumdjian C. The Springs of Montenegro and Dinaric Karst. Proceedings of the International Conference "Water Resources and Environmental Problems in Karst – Cvijić 2005". National Committee IAH of Serbia and Montenegro, Belgrade.

METHODS FOR WATER MANAGEMENT AND AREA MANAGEMENT
IN THE ZONE OF SYSTEMS VULNERABLE TO FLOODS
- THE CASE STUDY OF MINE AND THERMAL POWER PLANT GACKO -

by

Tina DAŠIĆ¹⁾, Branislav ĐORĐEVIĆ, Petar MILANOVIĆ,
Miloš STANIĆ¹⁾, Nenad JAĆIMOVIĆ¹⁾, Nedeljko SUDAR²⁾

¹⁾ University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering

²⁾ Institute for Water Management, Bijeljina

Summary

Large systems as mines with open pits and thermal power plants are particularly sensitive to flooding. Outage of such systems (due to flooding of mines or threats to other vital elements of the system) cause serious consequences on the widest area, because the damage and interruptions of work impact on productive systems and settlements. It is therefore necessary to protect such systems against floods, including application of mathematical models, on two levels: (a) during the area management - to be able to sustain the extreme hydrological situation, (b) during the operational management of such systems in flood periods.

Using methods of mathematical modeling both mentioned tasks are considered in the article, on the

example of mines and thermal power plant Gacko. Coupled mathematical model is developed and applied with two purposes: (a) to examine the hydrologic-hydraulic scenarios in the wider area of the system during the flood period, in order to arrange environment (embankments, retention basins) to protect the vital facilities, (b) to enable suggesting the best management decisions for the use of existing reservoirs and surface storage during the unfavorable hydrological situation by implementing software that uses information collected in real-time, in order to protect the most vital facilities of this important and very sensitive energy system.

Keywords: flood protection, water storage management, mine and TPP Gacko, River Musnica

Redigovano 14.11.2016.