

## METODOLOGIJA OPTIMALNOG KORIŠĆENJA AKUMULACIJA PO KRITERIJUMU MAKSIMIZACIJE PROIZVODNJE SISTEMA

Slobodan MILIĆ  
Energoprojekt, Entel, Beograd  
E-mail: smilic@ep-entel.com

### REZIME

U postupku vrednovanja hidroelektrana, posebno akumulacionih, sa analizom njihovog uticaja i na nizvodne objekte, jedan od osnovnih pokazatelja je moguća proizvodnja na slivu ili vodotoku. Činjenica da su realizovane akumulacije uglavnom čeone, u karstu i često neusaglašenih parametara sa nizvodnim objektima, ukazuje na potrebu primene složenijih optimizacionih modela za upravljanje akumulacijom u cilju realizacije maksimalne proizvodnje na slivu. Višenamenski karakter ovih akumulacija (ublažavanje poplavnog talasa, obezbeđenje ekološki prihvatljivog protoka za poboljšanje vodnih režima nizvodno, i sl.), i trošenje vode za neenergetske namene, dodatno usložnjavaju postupak i metode optimizacije.

U radu je metodološki obrađena jedna od metoda optimizacije takvog sistema i primenjena na sistemu Hidroelektrane na Trebišnjici (HET). Taj Sistem (HET) u svom radu primenjuje savremene upravljačke metode za povećanje efikasnosti energetske proizvodnje, kao i efekata zaštitnih vodoprivrednih funkcija akumulacija. Kao rezultat modeliranja dobijeni su poželjni nivoi u akumulaciji koji su poslužili za definisanje načina upravljanja Bilečkom akumulacijom u cilju maksimizacije proizvodnje na slivu uz poštovanje zahteva prioritetnih korisnika voda.

**Ključne reči:** Hidroenergetika, akumulacije, optimizacija, upravljanje, maksimizacija proizvodnje, Bilečka akumulacija, Trebišnjica.

### 1. UVOD

Po svojoj prirodi i osnovnim energetske parametrima akumulacione hidroelektrane predstavljaju veoma fleksibilan izvor koji se može angažovati za pokrivanje bilo kog dela dijagrama opterećenja i u bilo kom

periodu dana i godine. One su jedini koncentrisani izvor obnovljive energije koji bitno poboljšava pouzdanost funkcionisanja EES (detaljnije: *Dorđević, 2008*). To treba istaći decidno, jer postoji velika i sve opasnija strateška zabluda da se energetske potrebe mogu zadovoljiti realizacijom mnoštva malih hidroelektrana, navodno ekološki povoljnijih. O toj strateškoj zabludi detaljnije (*Dorđević et al., 2007*).

Akumulacione hidroelektrane su izuzetno pogodne i za pokrivanje svih vidova rezerve u sistemu kao i za garantovanje određenog nivoa proizvodnje što je od značaja za nastup na tržištu električne energije. Iz tih razloga kao logična se nameće primena metodologije optimalnog korišćenja akumulacije sa stanovišta elektroenergetskog sistema kao celine (*L.1., Milić, 2001*).

Aktuelno stanje, međutim, nametnulo je kao realnu činjenicu, da se prihod hidroelektrana dominantno formira prema obimu proizvodnje, što je uslovalo optimizaciju upravljanja prema kriterijumu maksimizacije proizvodnje. Efekti pomoćnih usluga koje sistem hidroelektrana može da pruži, prema aktuelnim cenama i potrebama elektroenergetskog sistema, su sekundarnog karaktera. Potencijalne mogućnosti sistema akumulacionih hidroelektrana su i na tom polju značajne, posebno u domenu rezerve u energiji i snazi. Ova problematika (rezerve) biće sve značajnija sa porastom udela obnovljivih izvora u sistemu (*L.2., Milić, 1997 i 2001*).

U okviru ovog članka prikazan je metodološki postupak optimizacije sistema sa akumulacionim elektranama i kao primer je obrađena problematika vezana za energetske analize i proračune sistema hidroelektrana na Trebišnjici (HET). HET je jedan od onih vrlo uzorno organizovanih hidroenergetskih sistema koji za svoju vrlo značajnu energetske i višenamensku funkciju,

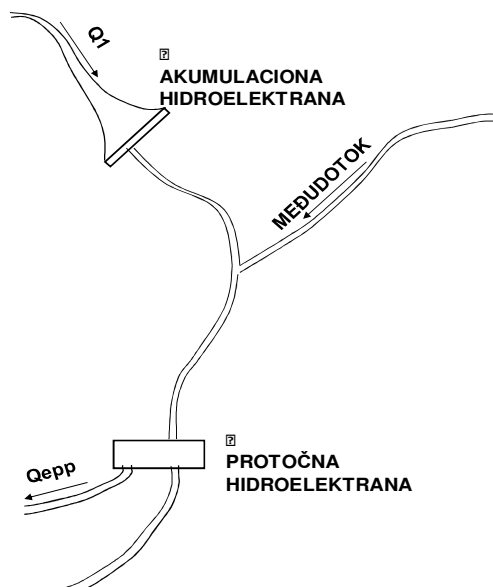
posebno u domenu maksimizacije energetske proizvodnje i upravljanju vodnim režimima (ublažavanje poplavnih talasa i poboljšanje režima malih voda) koriste optimizacione metode. Te metode se u skladu sa razvojem nauke i tehnologije računarskih sistema povremeno osavremenjavaju. Ovaj metodološki doprinos upravljaju sistemima sa akumulacijama nastao je kao rezultat najnovijeg projekta 'Upravljanje akumulacijama i hidroelektranama sistema Trebišnjice' koji je uradio Zavod za vodoprivredu Republike Srpske (L.3.). Složenost sistema HET-a značajno povećava i činjenica da su akumulacije realizovane u vrlo složenim uslovima karstne hidrografije, što nameće potrebu da dotoci u obe akumulacije moraju da se određuju posredno, preko vrlo preciznog praćenja bilansa voda i stanja akumulacija. To ima i posebno delikatne zahteve u pogledu održavanja najpovoljnijih ekoloških stanja u uslovima karsta (Bonacci, 2008a i 2008b). Pomenuti naučno-razvojni projekat omogućava da se održavanjem poželjnih stanja u akumulacijama i obezbeđivanjem odgovarajućih ekološki prihvatljivih protoka obezbede uslovi za očuvanje i povećanje biološke raznovrsnosti u granicama sistema.

## 2. OSNOVE METODOLOŠKOG POSTUPKA

Metoda polazi od elektrane, ili sistema tehnološki povezanih hidroelektrana na jednom vodotoku, slivu ili području. U suštini metode je kriterijum maksimalnog prihoda koji se, najčešće, svodi na kriterijum maksimalne proizvodnje energije. Pogodna je za rešavanje problematike maksimalnog iskorišćenja potencijal, usklađivanje parametara objekata na jednom vodotoku i sl.. Bazira se na fizičkim pokazateljima (energija, snaga, vreme rada, prilagodljivost potrebama, mogućnost regulacije) i nije vezana za konkretan elektroenergetski sistem. Maksimalno uvažava osnovne karakteristike objekata i opreme, hidrološke prilike i topologiju sliva.

Polazi se od hipotetičkog vodotoka (L.4.) koji se sastoji iz jedne čeone akumulacione hidroelektrane (1), međudotoka i nizvodne protočne hidroelektrane (2) (slika 1). Jedina upravljiva veličina na ovom vodotoku je stanje (zapremina) akumulacije (AK). Promena stanja akumulacije uslovljava promenu nivoa vodenog ogledala u akumulaciji (prema funkciji  $H=f(AK)$ , promena pada) i protoka nizvodno od brane,  $Q_1$ . Na taj način menja se i dotok prema nizvodnoj protočnoj hidroelektrani po veličini i rasporedu, što izaziva i promenu iskoristivog protoka (isticanja kroz turbine,  $Q_{ist}$ ). Sam sadržaj akumulacije može se regulisati sa dve promenljive:

- poželjnim stanjem akumulacije, i
- minimalnim isticanjem.



Slika 1. Skica hipotetičkog vodotoka

Raspoloživi potencijal vodotoka na slici 1 dat je relacijom:

$$E=9,81 \times T \times (H1_{min} + H1(AK)) \times Q1 + 9,81 \times T \times H2 \times (Q1 + Q_{md} - Q_{epp}) \quad (1)$$

gde je:

- $T$  – broj sati u godini,
- $H1_{min}$  – pad koji odgovara minimalnom stanju akumulacije,
- $H1(AK)$  - promenljivi deo pada u funkciji stanja akumulacije,
- $Q1$  - prosečan višegodišnji protok na profilu brane akumulacione hidroelektrane,
- $H2$  – pad na profilu brane protočne hidroelektrane,
- $Q_{md}$  – prosečan višegodišnji međudotok,
- $Q_{epp}$  – ekološki prihvatljivi protok koji se obezbeđuje i ispušta mimo turbine protočne hidroelektrane, prema posebnim zahtevima dobijenih na bazi ekoloških studija.

Tehnički iskoristivi potencijal predstavlja deo raspoloživog potencijala koji se može iskoristiti realizovanim tehničkim rešenjem.

Karakteristike objekata koje su bitne za nivo i kvalitet iskoristivog potencijala su:

- Instalirani proticaj,  $Q_{INS1}$  i  $Q_{INS2}$ , i
- korisna zapremina akumulacije,  $V_k$ .

Korisna zapremina akumulacije omogućava regulaciju protoka nizvodno prilagođavajući ih raspoloživom kapacitetu turbina. Instalirani protoci (kapaciteti turbina) definišu protoke (ili deo protoka) koji se mogu energetske iskoristiti.

Kako su instalirani protoci definisani tehničkim rešenjem i fiksni, jedini element kojim se može upravljati ovakvim slivom je stanje akumulacije (AK).

### 2.1. Algoritam za upravljanje akumulacionim bazenima hidroelektrana

Pod akumulacionim bazenom, u smislu regulisanja voda, podrazumeva se bazen čija veličina omogućava sezonsko regulisanje voda, odnosno bazen sa korisnom zapreminom većom od 8% prosečnog višegodišnjeg dotoka. Pri tome se posmatra jedan korisnik akumulacije.

U tretmanu višenamenskih akumulacija, najpre se definišu prioritetni korisnici sa svojim uslovima i ograničenjima, koja se moraju poštovati do nivoa fizičkih mogućnosti ili do nivoa dogovorenih vrednosti.

Potrebne podloge za definisanje načina upravljanja akumulacionim bazenima su:

- Dotoci u akumulacioni bazen po hronološkom rasporedu,  $QP$  ( $m^3/s$ )
- Korisna zapremina akumulacionog bazena,  $V_k$  ( $m^3$ )

Neophodna ograničenja u kojima su sadržani tehnički uslovi, zahtevi drugih korisnika i sl., iskazuju se kroz:

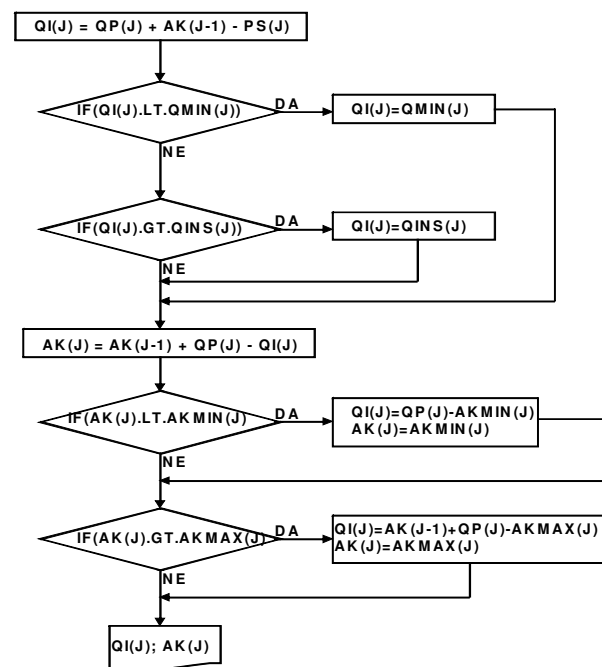
- Minimalno dozvoljeno stanje akumulacije,  $AMIN$  (zavisi od ekoloških zahteva održavanja ekoloških protoka i energetske zahteva pouzdanosti EES).
- Maksimalno dozvoljeno stanje akumulacije,  $AMAX$  (uslovljeno zahtevima koji proističu iz upravljačkog modela za ublažavanje poplavnih talasa).
- Maksimalno moguće ispuštanje iz akumulacije kroz turbine,  $QINS$ .

Promenljive kojima se upravlja akumulacijom su:

- Poželjno stanje akumulacije na kraju razmatrane vremenske jedinice,  $PS$ ,
- Minimalno zahtevano ispuštanje iz akumulacije,  $QMIN$ .

Minimalno zahtevano isticanje ima prioritet u odnosu na poželjna stanja.

Na slici 2 prikazan je dijagram toka upravljanja akumulacijom (L.3.), proračuna regulisanog isticanja i stanja akumulacije. Jednostavnosti radi, stanje akumulacije (zapremina) izražava se u  $m^3/s$ . To je količnik konkretne zapremine i trajanja vremenske jedinice.



Slika 2. Dijagram toka upravljanja akumulacijom

Obzirom da se vremenski regulisanje vrši po hronološkom redosledu, indeks  $J$  predstavlja tekući vremenski interval. Ostale veličine su:

- $QI$  - regulisano isticanje iz akumulacije,
- $QP$  - dotok u akumulaciju,
- $AK$  - stanje akumulacije,
- $PS$  - poželjno stanje akumulacije na kraju vremenske jedinice,
- $QMIN$  - minimalno zahtevano isticanje tokom vremenske jedinice,
- $QINS$  - maksimalno ispuštanje iz akumulacije (kroz turbine),
- $AKMIN$  - minimalno dozvoljeno stanje akumulacije,
- $AKMAX$  - maksimalno dozvoljeno stanje akumulacije.

Postupak po ovom algoritmu je sledeći:

Definiše se očekivano stanje akumulacije na kraju vremenske jedinice za koju se vrši regulacija,  $PS(J)$ . Nakon toga sračunava se regulisano isticanje. U izrazu za regulisano isticanje, za prvi vremenski interval,

uzima se kao početno stanje akumulacije AK(J-1), poželjno stanje sa kraja analiziranog perioda. Ovo sa ciljem da se, nakon izvršenog regulisanja, stanje akumulacije dovede na početno, tj. da se bilans regulisanih i doteklih proticaja izjednači.

Nakon toga se vrši provera da li se regulisano isticanje QI(J) nalazi u opsegu dozvoljenih vrednosti ( $Q_{MIN} < QI < Q_{INS}$ ). Ako se ne nalazi u dozvoljenom opsegu, vrši se odgovarajuća korekcija, i nakon toga sračunavanje odgovarajućeg stanja akumulacije.

Provera stanja akumulacije u odnosu na zadata ograničenja,  $AK_{MIN}(J) < AK(J) < AK_{MAX}(J)$ , može usloviti novu promenu regulisanog isticanja, QI(J), koja se računa uvažavajući zadata ograničenja.

Provodeći ovaj postupak dolazi se do vrednosti regulisanog proticaja QI(J), i stanja akumulacije AK(J), što definiše potrebne podloge za proračune tehnički iskoristivog potencijala (proizvodnje i snage elektrane) na bazi regulisanog isticanja.

## 2.2. Diskusija opšteg izraza za tehnički iskoristivi potencijal

Na osnovu izraza za raspoloživi potencijal, uzimajući u obzir realna tehnička ograničenja po korisnoj zapremini i instalisanim protocima, dolazi se do sledećeg izraza za tehnički iskoristivi potencijal:

$$W = 9,81 \times T \times (H1_{min} + H1(AK)) \times Q1_{ist} \times \eta_i + 9,81 \times T \times H2 \times (Q12_{ist} + Q_{md.ist} - Q_{epp}) \times \eta_i \quad (2)$$

gde su:

- Q1<sub>ist</sub> - iskoristivi protok na akumulacionoj elektrani,
- Q12<sub>ist</sub> - iskoristivi dotok iz akumulacione elektrane na nizvodnoj protočnoj elektrani,
- Q<sub>md.ist</sub> - iskoristivi deo međudotoka na protočnoj elektrani.

Ovaj izraz se može razdvojiti na konstantni i promenljivi deo. Konstantni deo (kojim se ne može upravljati) predstavlja potencijal koji potiče od međudotoka na protočnoj elektrani:

$$W_k = 9,81 \times T \times H2 \times Q_{md.ist} \times \eta_i \quad (3)$$

Promenljivi deo predstavlja deo kojim se može upravljati, i realizuje se i na akumulacionoj i na protočnoj elektrani:

$$W_v = 9,81 \times T \times H1_{min} \times Q1_{ist} \times \eta_i + H1(AK) \times Q1_{ist} \times \eta_i + 9,81 \times T \times H2 \times Q12_{ist} \times \eta_i \quad (4)$$

Na akumulacionoj elektrani, realizacija upravljivog dela potencijala vrši se po osnovu promenljivog pada (H1(AK)) i promenljivog isticanja kroz turbine (Q1<sub>ist</sub>), a na protočnoj samo po osnovu promenljivog iskoristivog protoka iz akumulacije (Q12<sub>ist</sub>).

Promenljivi deo na akumulacionoj elektrani direktno je proporcionalan sa stanjem akumulacije, a promenljivi deo na protočnoj direktno je proporcionalan iskoristivom protoku (Q12<sub>ist</sub>) koji dolazi iz akumulacije. Ovaj protok je obrnuto proporcionalan stanju akumulacije.

Na osnovu prethodnog proizilazi da zahtev za maksimalnim iskorišćenjem potencijala generiše dva oprečna stava koja se ogledaju u sledećem:

- zahtev za povećanjem sadržaja akumulacije u cilju povećanja raspoloživog pada i potencijala na akumulacionoj elektrani, i
- zahtev za smanjenjem sadržaja akumulacije u cilju omogućavanja većeg stepena regulisanja, a time i većeg iskoristivog protoka (Q12<sub>ist</sub>) i potencijala na nizvodnoj protočnoj elektrani.

Optimizacija načina korišćenja akumulacije prema kriterijumu maksimalne proizvodnje predstavlja traženje maksimuma funkcije izražene relacijom 4, po kriterijumu  $W_v \rightarrow \max$ . U konkretnom slučaju primenjen je postupak pretraživanja u konačnom broju tačaka. U tom postupku korisno je poći od ekstremnih vrednosti stanja akumulacije.

Pri niskim stanjima akumulacije imamo situaciju koja omogućava maksimalnu regulaciju proticaja i prilagođavanje raspoloživim kapacitetima turbina što dovodi do maksimalnog iskorišćavanja protoka. Sa druge strane, niska stanja akumulacije imaju za posledicu male vrednosti padova na akumulacionoj elektrani.

Pri visokim stanjima akumulacije imamo situaciju koja odgovara prirodnim režimima voda (raspoloživi prostor za regulaciju je mali ili ne postoji), što prouzrokuje minimalno iskorišćenje protoka, ali i maksimalno iskorišćenje pada.

Pogodnim izborom poželjnog stanja akumulacije, kao ciljne vrednosti, moguće je doći do stanja akumulacije koje obezbeđuje maksimalno iskorišćenje potencijala na razmatranim profilima, odnosno maksimalne vrednosti moguće proizvodnje na slivu, što je osnovni zadatak optimizacije.

### 3. PRIMENA POSTUPKA NA SISTEM HIDROELEKTRANA NA TREBIŠNJICI

Zahvaljujući velikoj zapremini Bilečke akumulacije Hidroelektrane na Trebišnjici imaju veliku mogućnost regulacije proticaja (oko 55%) i kao takve su jedan od najvrednijih sistema u tom delu Evrope. Po tom osnovu one su veoma fleksibilan proizvodni kapacitet i mogu učestvovati u svim oblicima pokrivanja dijagrama opterećenja sistema (pokrivanje potreba u energiji i snazi, regulisanje proizvodnje na nivou godine, rotirajuća rezerva, hladna rezerva i sl.). Nizak nivo instalisanosti nizvodne stepenice (HE Dubrovnik: 90 m<sup>3</sup>/s) donekle umanjuje ovu fleksibilnost, kao i ograničene mogućnosti kanala kroz Popovo Polje i gubici u kanalu i gornjem bazenu PHE Čapljina. Ipak, za elektroenergetski sistem Republike Srpske i šire, HET predstavlja izuzetno značajan regulacioni i balansni čvor.

Imajući u vidu da su korisnici dve akumulacije (Bilečke i Trebinjske) elektroprivreda i vodoprivreda, da je vodoprivreda u periodima odbrane od poplava i poboljšanja režima malih voda primarni korisnik, a da je upravljanje akumulacijama u nadležnosti Hidroelektrana na Trebišnjici (HET-a), pri analizi načina korišćenja Bilečke akumulacije nametnula se potreba da se optimizacija upravljanja prilagodi toj činjenici. Ovakav tehnički veoma složen sistem, sa dve akumulacije i četiri hidroelektrane, tehnološki je veoma povezan i uslovljen, a organizaciono je podeljen i njime upravljaju tri elektroprivrede<sup>1</sup>. Ta činjenica dodatno komplikuje kako eksploataciju sistema tako i analize režima rada uzvodne Bilečke akumulacije. Da bi se prevazišli ti problemi i stvorili uslovi za optimizaciju sistema, isti je posmatran kao jedna celina ne ulazeći u problematiku raspodele potencijala od HE Dubrovnik. Optimizacija je rađena po kriterijumu vrednovanja energetske efektivnosti na nivou HET-a, jer je to jedino primereno sadašnjoj realnosti upravljanja u upravljački nezavisnim sistemima.

Na osnovu prethodnog definisani su kriterijumi optimizacije načina korišćenja Bilečke akumulacije kao upravljački najuticajnijeg elementa, na veličinu,

strukturu i godišnji raspored proizvodnje HET-a, kao i na obezbeđenje vodoprivrednih zahteva i ograničenja. Ti kriterijumi su:

- poštovanje zahteva vodoprivrede po osnovu obezbeđenja ekološki prihvatljivog protoka tokom malovodnog perioda (*Dorđević i Dašić, 2011*),
- poštovanje zahteva vodoprivrede po osnovu obezbeđenja prostora za ublažavanje poplavnog talasa tokom pojave velikih voda,
- maksimizacija proizvodnje električne energije hidroelektrana na Trebišnjici.

Dispozicija i karakteristike objekata na Trebišnjici imaju neke specifičnosti koje su od značaja za eksploataciju sistema, a time i za način provođenja optimizacionih analiza i proračuna. Posebno su relevantne činjenice:

(a) najveći deo potencijala Trebišnjice realizovan je potapanjem vrela Trebišnjice i čitavog njenog gornjeg toka, tako da se dolazni bilansi protoka Trebišnjicom ne mogu meriti vodomerima na reci, već samo posredno, preko bilansa stanja akumulacije, što bilansno obuhvata i dotok sa međusliva;

(b) značajno je manji instalisani protok na nizvodnoj stepenici (Dubrovnik 90 m<sup>3</sup>/s)<sup>2</sup> u odnosu na Trebinje 1 (pribranska HE Trebinje1 uz Bilečku akumulaciju 210 m<sup>3</sup>/s);

(c) na brani Gorica vrši se usmeravanje - raspodela proticaja na HE Dubrovnik 1 i PHE Čapljinu;

(d) dovodni kanal vode do PHE Čapljina ukupne dužine 67,82 km većim je delom u RS (41,72 km), dok se nizvodni deo nalazi u FBiH. Kanal se ne održava na tehnički zadovoljavajućem nivou (zbog nerešenih međusobnih odnosa), zbog čega su tokom vremena dostignuti veliki gubici u kanalu. To je veoma bitno sa stanovišta strategije upravljanja sistemom, jer se najveći deo vodnog potencijala usmerenog ka RHE Čapljina gubi na infiltraciju;

(e) na PHE Čapljina raspoloživi pad je znatno manji (227 m) nego na HE Dubrovnik 1 (295m). Sve su to činjenice koje bitno utiču na strategiju upravljanja sistemom.

<sup>1</sup> Sistemom HET-a (obe akumulacije, HE Trebinje 1 i 2 i deo HE Dubrovnik) upravlja preduzeće HET, sa delom HE Dubrovnik upravlja Elektroprivreda Hrvatske, dok sa RHE Čapljina upravlja Elektroprivreda Hercege Bosne).

<sup>2</sup> Razlog neusklađenosti instalisanih protoka u okviru sistema HET-a je zbog toga što je na neodređeno vreme odložena izgradnja HE Dubrovnik 2, za koju je već izgrađena podzemna mašinska zgrada. Realizacijom HE Dubrovnik 2 instalisan protok u tom pravcu bi se povećao na oko 180-200 m<sup>3</sup>/s, čime bi se izvanredno poboljšale energetske performanse čitavog sistema, kako u energetskom smislu, tako i u pogledu mogućnosti smanjenja poplavnih talasa na nizvodnom toku reke Trebišnjice.

### 3.1. Opšti izraz za hidroenergetski potencijal Trebišnjice

Imajući u vidu navedene specifičnosti, relacija koja definiše energetske potencijale se delimično razlikuje od klasične jednačine za određivanje potencijala površinskih tokova.

**Potapanjem izvorišta** koristi se i jedan deo potencijala koji, u prirodnom stanju, ne pripada kategoriji površinskog toka. Može se, međutim, smatrati da je i to potencijal površinskog toka koji ima konkretnu dubinu na izvorištu jednaku dubini potapanja izvorišta – Vrela Trebišnjice. Dalja razmatranja ovog potencijala su analogna potencijalu površinskih tokova.

**Bifurkacija na profilu Gorica** je veštačka tvorevina. Na ovom profilu se deli potencijal na pravac prema Jadranskom moru direktno (HE Dubrovnik 1) i na pravcu kroz Popovo Polje prema Neretvi (PHE Čapljina).

**Gubitak vode i potencijala kroz Popovo Polje** i u gornjem bazenu PHE Čapljina posledica je realne mogućnosti realizacije objekata na ovom području.

Opšti izraz uvažava navedene specifičnosti i definiše raspoloživi potencijal na vodotoku Trebišnjice na realizovanim objektima. Na bazi osnovnih energetskih parametara objekata, opšti izraz za raspoloživi potencijal vodotoka Trebišnjice je:

$$E = 9,81 \times 8760 \times ((53 + H(V)) \times Q_{gr} + 295 \times (Q_{gr} + Q_{md} - Q_{epp}) + 20 \times (Q_{epp} + Q_{pr.gor}) + 230 \times (Q_{epp} + Q_{pr.gor} + Q_{md.pp} - Q_{gub})) \times 10^{-6} \quad [\text{GWh}] \quad (5)$$

gde je:

$H(V)$  - promena pada u funkciji zapremine akumulacije Bileća,

$Q_{gr}$  - protok na profilu Grančarevo,

$Q_{md}$  - međudotok na brani Gorica,

$Q_{epp}$  - ekološki prihvatljiv protok kroz Trebinje,

$Q_{pr.gor.}$  - prelivene vode na brani Gorica,

$Q_{md.pp.}$  - međudotok na potesu kroz Popovo Polje,

$Q_{gub.}$  - gubici na poniranje u Popovom Polju.

Suštinski prvi član predstavlja raspoloživi potencijal na HE Trebinje 1, drugi član raspoloživi potencijal na HE Dubrovnik 1, treći član raspoloživi potencijal na HE Trebinje 2 i četvrti član raspoloživi potencijal na PHE Čapljina. Brojni koeficijenti predstavljaju vrednosti bruto padova na pojedinim profilima.

**Uticaj osnovnih energetskih parametara na postupak optimizacije.** Obzirom na veličinu instalisanog protoka HE Trebinje 1 (210 m<sup>3</sup>/s),

zapreminu akumulacije Bileća ( $V_k = 1113,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) i raspoloživi prirodni dotok od 66,2 m<sup>3</sup>/s, može se konstatovati da će se sav protok energetske iskoristiti na padu između 53 i 105 m (oko 87 m, 2/3 visine vodenog stuba). Na hidroelektrani Dubrovnik 1, instalisanog protoka od 90 m<sup>3</sup>/s i sa zanemarivom zapreminom bazena Trebinje (7,00 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s), a sa dotokom od 79,5 m<sup>3</sup>/s, mogu se očekivati značajni prelivni. Ovo posebno zbog izražene vremenske neravnomernosti prirodnog doticaja (85 % voda dotekne u periodu oktobar – maj, a samo 15% u periodu maj - oktobar).

HE Trebinje 2 je trći objekat na ovom vodotoku, malog raspoloživog pada (20 m) koji koristi samo vode ekološkog protoka i prelive na brani Gorica.

PHE Čapljina, koja je ovde tretirana samo kao klasična elektrana, osim voda koje koristi HE Trebinje 2 ima na raspolaganju i međudotok Popovog Polja. Od ovih voda realizovano tehničko rešenje ima konstantne gubitke u kanalu oko 3 m<sup>3</sup>/s i u bazenu Hutovo oko 2 m<sup>3</sup>/s. Pri proticajima koji su veći od kapaciteta kanala kroz Popovo Polje, pojavljuju se dodatni gubici vode reda 35%. Manji bruto pad na PHE Čapljina (230 m) i gubici voda u dovodu, po principu minimalnih gubitaka potencijala, uslovljavaju jasnu energetske logiku - usmeravanje voda ka HE Dubrovnik 1. U periodu intenzivnog preliivanja na Gorici (preko 45 m<sup>3</sup>/s), Bilećka akumulacija je, po pravilu, na maksimalno dozvoljenom nivou te ne vrši nikakvu regulaciju u energetske smislu. Sve ovo dovodi do zaključka da je korišćenje potencijala na PHE Čapljina, u aktuelnoj situaciji, nezavisno od načina korišćenja Bilećke akumulacije.

Od ukupno raspoloživog potencijala vodotoka Trebišnjice oko 20% se odnosi na potez uzvodno od Grančareva, oko 65% na potez od Gorice do Dubrovnika 1 (nivo mora) i oko 15% na potes nizvodno od Gorice prema PHE Čapljina. Kao najveći deo, i ujedno najosetljiviji na promene načina korišćenja akumulacije Bileća, pojavljuje se potencijal na HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1. Zanemarujući, kao male vrednosti, ekološki protok i potencijal na HE Trebinje 2 i, kao nezavistan od uzvodnog uticaja, potencijal na PHE Čapljina, relacija 5 prelazi u:

$$E = 9,81 \times 8760 \times ((53 + H(V)) \times Q_{gr} + 295 \times (Q_{gr} + Q_{md})) \times 10^{-6} \quad [\text{GWh}] \quad (6)$$

Uvažavajući konkretne vrednosti energetskih parametara i mogućnost iskorišćenja dotoka sa profila Grančarevo bez uticaja akumulacije Bileća (42,2 m<sup>3</sup>/s),

tehnički iskoristivi potencijal (moguća proizvodnja) dat je relacijom:

$$W = (8,5 \times 8760 \times 53 \times 66,2 + 8,5 \times 8760 \times H(V)) \times 66,2 + 8,5 \times 8760 \times 295 \times 13,3 + 8,5 \times 8760 \times 295 \times 42,2 + 8,5 \times 8760 \times 295 \times Q_{isk.gr} \times 10^{-6}$$

$$W = 261 + 4,9 \times H(V) + 292 + 22 \times Q_{isk.gr} - 110 + 925 = (1368 + 4,9 \times H(AK) + 22 \times Q_{isk.gr}) \times 10^{-6} \quad [GWh] \quad (7)$$

gde je:

$Q_{isk.gr}$  – dotok iz Grančareva koji se može iskoristiti na HE Dubrovnik 1 po osnovu regulacije u akumulaciji Bileća.

U ovoj relaciji su razdvojene konstantne vrednosti potencijala od promenljivih. Konstantna vrednost potencijala iznosi 1368 GWh, a promenljivi deo 0-255 GWh na HE Trebinje 1, i 0-527 GWh na HE Dubrovnik 1. Promenljivi deo na HE Trebinje 1 direktno je proporcionalan sa stanjem akumulacije Bileća, a promenljivi deo na HE Dubrovnik 1 direktno je proporcionalan iskoristivom protoku ( $Q_{isk.gr}$ ) koji dolazi iz akumulacije Bileća. Ovaj protok je, pak, obrnuto proporcionalan stanju akumulacije Bileća.

Pogodnim izborom poželjnog stanja akumulacije Bileća, kao ciljne vrednosti, moguće je doći do stanja akumulacije koje obezbeđuje maksimalno iskorišćenje potencijala na profolima Grančarevo i Gorica odnosno maksimalne vrednosti moguće proizvodnje (u zbiru) na HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1, što je osnovni zadatak optimizacije.

#### 4. REZULTATI IZVRŠENIH ANALIZA I PRORAČUNA

##### 4.1. Primenjeni postupak za nalaženje optimalnog načina korišćenja akumulacije Bileća

U cilju definisanja optimalnog načina korišćenja akumulacije Bileća (kriterijum maksimalne proizvodnje na vodotoku Trebišnjice) primenjen je iterativni postupak definisanja poželjnih stanja akumulacije. Postupak je proveden na delu vodotoka koji obuhvata objekte HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1, bez uticaja ekološki prihvatljivog protoka kroz Trebinje. Iz prethodnih analiza proizilazi da ostali objekti nisu od uticaja na iskoristivost potencijala bilo da je njihov uticaj mali ili je nezavistan od stanja akumulacije Bileća.

Iz relacije 7 se zaključuje da najveći uticaj na promenljivi deo potencijala ima vrednost protoka iz akumulacije Bileća koja se može iskoristiti na HE Dubrovnik 1. Ovo posebno dolazi do izražaja zbog

niske instalisanosti HE Dubrovnik 1. Koncentracija međudotoka na praktično sedam meseci godišnje, značajne i brze promene istog kao i koincidencija sa dotokom u akumulaciju, još više zaoštravaju problem iskorišćenja voda na nizvodnoj stepenici. Drugi po značaju uticaj na promenljivi deo potencijala, ima promenljivi deo pada u akumulaciji Bileća.

Oba uticaja su posledica stanja akumulacije Bileća. Promenom poželjnih stanja, kao upravljачkom funkcijom koju akumulacija teži da ostvari uz poštovanje svih ograničenja koja nameću drugi, prioritetni korisnici voda i prostora, menja se i nivo iskoristivog potencijala. Uzastopnim proračunima iskoristivog potencijala za više vrednosti poželjnih stanja formira se odgovarajuća funkcija,  $W=f(AK)$ , čiji maksimum definiše optimalno stanje akumulacije. Obzirom da se analiza vrši na hronološkoj matrici protoka, osim veličine poželjnih stanja bitan je njihov raspored tokom godine. Može se reći i da je raspored tokom godine, često, od većeg uticaja.

Za sagledavanje tog uticaja iskorišćena je raspoloživa matrica dotoka na profilu Grančarevo (mesečni podaci) i matrica međudotoka na profilu Gorica (dnevni podaci). Matrica međudotoka definisala je preostali raspoloživi kapacitet turbina na HE Dubrovnik 1, a matrica dotoka ostvarena stanja akumulacije Bileća. Polazeći od minimalnih poželjnih stanja tokom cele godine, kao rezultat u **prvom koraku**, dobijaju se realizovana stanja akumulacije (matrica koja sadrži i vrednosti i raspored) i vrednost iskoristivog potencijala. U **drugom koraku** se realizovana stanja akumulacija zadaju kao poželjna (veličina i raspored), a kao rezultat se dobijaju nova, veća, stanja i odgovarajuća vrednost iskoristivog potencijala. Priroda procesa je takva da se razlika između zahtevanih i realizovanih stanja akumulacije smanjuje. Nakon nekoliko koraka razlike postaju tako male da se praktično ne odražavaju na nivo iskoristivog potencijala. Time je postupak optimizacije završen, a realizovana stanja akumulacije koja daju maksimalnu proizvodnju predstavljaju optimalna stanja kojima treba težiti tokom eksploatacije sistema.

##### 4.2. Analize i proračuni optimalnog korišćenja akumulacije Bileća

Ekstremne varijante korišćenja akumulacije Bileća su:

- protočno korišćenje (bez regulacije proticaja), i
- maksimalna regulacija proticaja.

Fizičko tumačenje protočnog korišćenja, u okviru ovih analiza, svodi se na maksimalno stanje akumulacije

(maksimalan pad, bez slobodnog prostora u akumulaciji) i na isticanja koja su po veličini i rasporedu identična prirodnim dotocima. Protočno korišćenje akumulacije obezbeđuje maksimalne nivoe i padove na HE Trebinje 1, a time, uz visok instalisani protok, i maksimalno iskorišćenje dotoka, i maksimalnu proizvodnju.

Maksimalna mogućnost regulacije proticaja fizički se obezbeđuje maksimalnim slobodnim prostorom u akumulaciji, tj. minimalnim sadržajem akumulacije. Korišćenje akumulacije Bileća za maksimalno regulisanje protoka (prema slobodnim kapacitetima HE Dubrovnik) daje maksimalne vrednosti iskoristivog protoka na HE Dubrovnik 1 i maksimalnu proizvodnju, ali i minimalnu proizvodnju na HE Trebinje 1.

U cilju formiranja zavisnosti ukupne proizvodnje (HE Trebinje 1 + HE Dubrovnik 1) od stanja akumulacije Bileća ( $W=f(AK)$ ), logično se pošlo od ekstremnih mogućnosti regulisanja.

Za potrebe optimizacije sistema u svim varijantama, najpre su dnevni međudotoci na profilu Gorica redukovani prema propusnoj mogućnosti opreme i na osnovu njih formirane matrice mesečnih vrednosti za:

- iskoristivi međudotok na HE Dubrovnik 1,
- preostali kapacitet turbina na HE Dubrovnik 1,
- protok koji se usmerava prema HE Trebinje 2, i PHE Čapljina,
- protok koji se prelijeva na brani Gorica, i
- potrebno isticanje iz akumulacije Bileća radi obezbeđenja ekološki prihvatljivog protoka kroz Trebinje ( $4\div 6 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

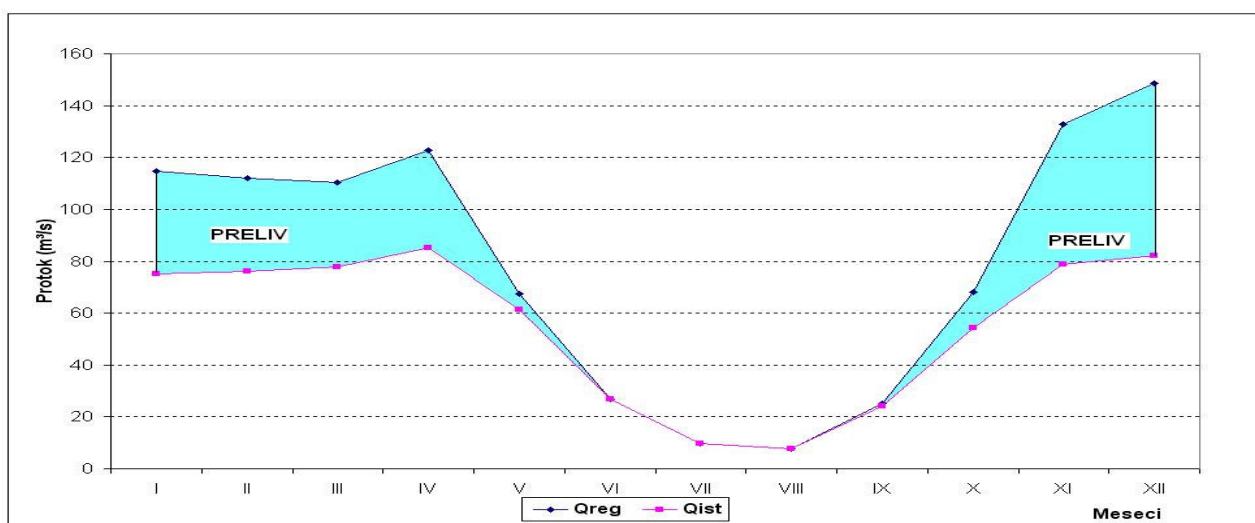
### Proračuni iskoristivog protoka i moguće proizvodnje pri protočnom korišćenju akumulacije Bileća.

Protočno korišćenje akumulacije Bileća podrazumeva pun sadržaj bazena, bez promene prirodnog protoka po veličini i rasporedu tokom godine. Veličina instalisanog protoka HE Trebinje 1 ( $210 \text{ m}^3/\text{s}$ ) omogućava skoro potpuno iskorišćenje dotoka ( $66,0$  od  $66,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) na ovoj stepenici. Sa maksimalnom vrednošću pada i osnovnim karakteristikama elektrane, moguća proizvodnja iznosi **502 GWh**. Prirodne vrednosti i raspored dotoka na profilu Gorica ( $79,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i instalisani protok HE Dubrovnik 1 ( $90 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dali su iskoristivi protok od  $55,0 \text{ m}^3/\text{s}$  i prelive u iznosu od  $24,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pri tome je moguća proizvodnja HE Dubrovnik 1 iznosila **1073 GWh**, što daje ukupno **1575 GWh**. Dijagrami na slici 3. prikazuju raspored prosečnih vrednosti dotoka i iskoristivog protoka tokom godine.

Prelivi se pojavljuju od oktobra do juna u kontinuitetu, maksimalni su u decembru mesecu, ali su visoki sve do maja meseca. Ova visina prelijeva i raspored upućuje na značaj regulisanja voda u akumulaciji Bileća.

### Proračuni iskoristivog protoka i moguće proizvodnje pri maksimalnom korišćenju akumulacije Bileća.

Maksimalno korišćenje akumulacije Bileća podrazumeva maksimalno prilagođavanje mogućnostima HE Dubrovnik 1 u smislu iskorišćenja protoka. To znači da treba imati na raspolaganju maksimalni prostor u akumulaciji, što se postiže režimom rada koji zahteva minimalna stanja akumulacije. Konkretni proračuni su rađeni sa poželjnim stanjima koja definišu praznu akumulaciju ( $Apož.=0$ ).



Slika 3. Prirodni i iskoristivi protok na HE Dubrovnik u protočnom radu



Prethodno izvršeni proračuni iskoristivog međudotoka, preostalog kapaciteta turbina na HE Dubrovnik 1 i minimalnog isticanja za obezbeđenje garantovanog ekološkog protoka kroz Trebinje, poslužili su kao ulazni podaci za proračun moguće proizvodnje HE Trebinje 1, sa poželjnim stanjima prazne akumulacije. Ograničenje instalisanog protoka (u cilju sprečavanja preliva na Gorici) poštovano je sve do maksimalnog dozvoljenog nivoa akumulacije (400 mnm). Nakon dostizanja maksimalnog stanja, nivo ispuštanja iz akumulacije povećava se do maksimalnog instalisanog protoka na HE Trebinje 1 ( $210 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a po potrebi i više, što iziskuje aktiviranje preliva.

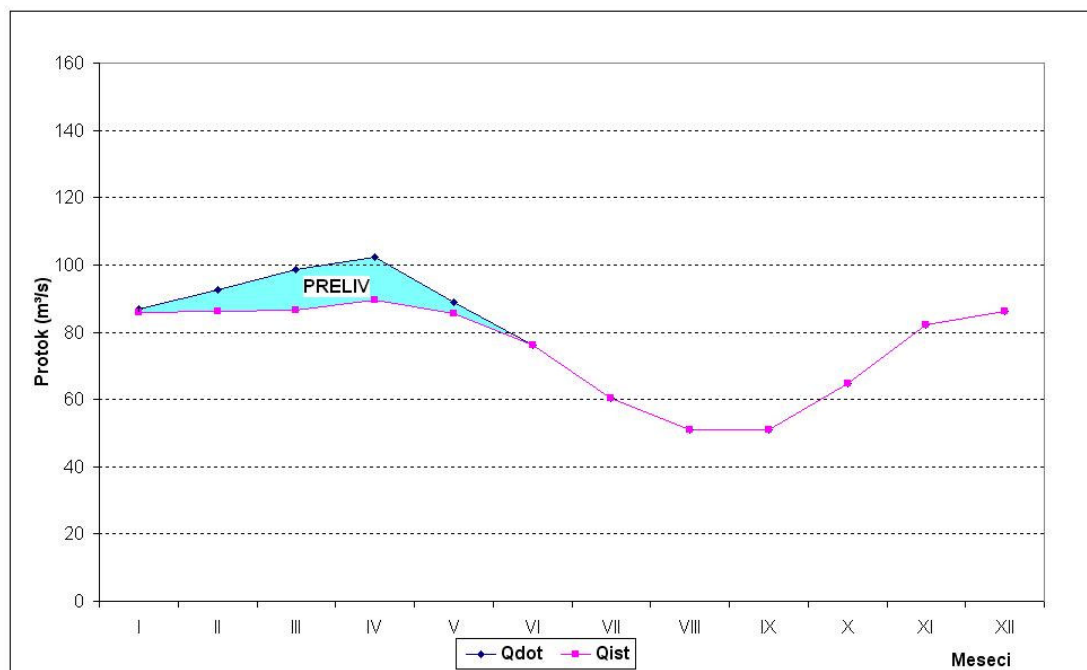
Proračuni su pokazali da su, i pored zahteva za praznom akumulacijom, ostvarena značajna stanja akumulacije (oko  $470 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), što je posledica konkretnih dotoka i male vrednosti instalisanog protoka na HE Dubrovnik 1. To su, ujedno i minimalna stanja akumulacije Bileća sa energetskeg stanovišta. U ovom slučaju stvaraju se maksimalne mogućnosti regulacije protoka prema raspoloživim kapacitetima HE Dubrovnik 1, a kao rezultat se dobijaju maksimalne vrednosti iskoristivog dotoka iz akumulacije Bileća i maksimalna proizvodnja na HE Dubrovnik 1. Logično da je tada minimalno realizovano stanje akumulacije Bileća, minimalni raspoloživi pad i minimalna proizvodnja na HE Trebinje 1. Raspoloživi dotok na HE Trebinje 1 iskoristiv je

skoro u potpunosti, ali na raspoloživom padu koji odgovara sadržaju bazena od  $470 \times 10^6 \text{ m}^3$  realizuje se proizvodnja od samo 376 GWh. Na HE Dubrovnik 1 iskoristivi protok je maksimalan, za ove parametre objekata, i iznosi  $75,8 \text{ m}^3/\text{s}$ , čemu odgovaraju prelivi u iznosu od  $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$  i maksimalna proizvodnja od 1474 GWh. Ukupna proizvodnja HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1 iznosi **1850 GWh**.

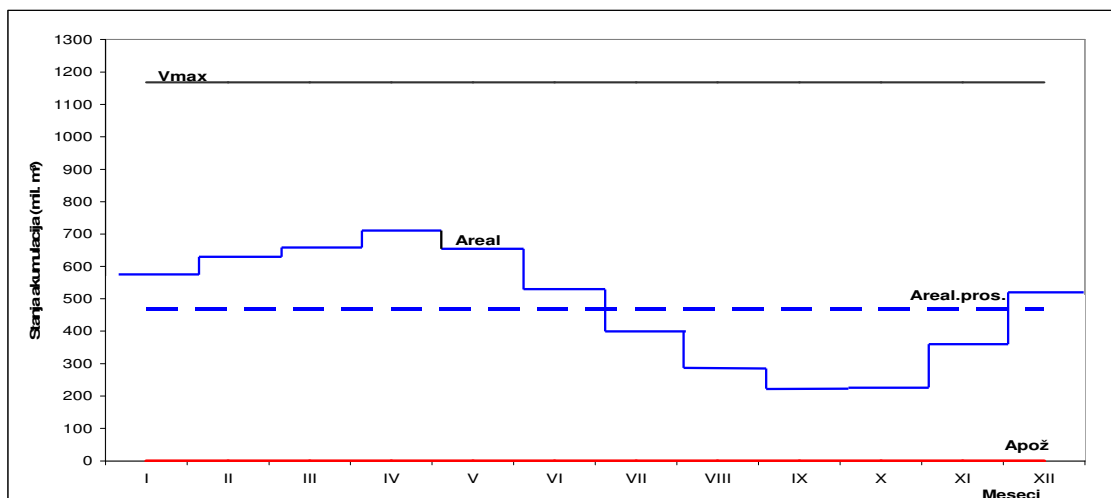
Dijagram na slici 4. pokazuje pojavu preliva samo početkom godine. Prelivi krajem godine su eliminisani u potpunosti. Pojava preliva na HE Dubrovnik 1 početkom godine, u nekim hidrološkim situacijama ne može se izbeći. Iz ove analize sledi važan zaključak:

- Postoje hidrološke situacije u kojima se prelivi na HE Dubrovnik 1, pri ovim parametrima sistema (posebno instalisani protok HE Dubrovnik 1), ne mogu eliminisati ni ako se u period povodanja uđe sa potpuno praznom akumulacijom Bileća.

Izvršeni proračuni pokazuju da se značajno veća proizvodnja realizuje pri zahtevanim niskim stanjima akumulacije Bileća (1850 GWh), nego pri punoj akumulaciji (1575 GWh). Ovi rezultati potvrđuju zaključak iz analize tehnički iskoristivog potencijala o većem uticaju iskoristivog protoka na HE Dubrovnik 1 od stanja akumulacije na HE Trebinje 1.



Slika 4. Regulisani i iskoristivi protok na HE Dubrovnik pri maksimalnom korišćenju akumulacije Bileća



Slika 5. Zahtevana i ostvarena stanja pri maksimalnom korišćenju akumulacije Bileća

Dijagram na slici 5. prikazuje raspored tokom godine (prosečne vrednosti) zahtevanih (poželjnih, Apož.) i ostvarenih (Aost.) stanja akumulacije. U proseku ostvarena stanja su veća za  $470 \times 10^6 \text{ m}^3$  veća od poželjnih.

Karakterističan oblik dijagrama rezultat je hidroloških podataka i karakteristika realizovanih objekata. Ovaj oblik, neznatno izmenjen, pojavljuje se i u daljim analizama i proračunima i može se smatrati prirodnim za realizovano stanje objekata i opreme.

Detaljnija analiza matrice ostvarenih stanja akumulacije pokazuje da se maksimalna stanja, puna akumulacija Bileća, pojavljuju u više meseci uzastopno što ukazuje na dugo trajanje visokih protoka (većih od  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  na HE Dubrovnik 1).

**Iterativni postupak proračuna promena stanja Bilečke akumulacije.** Dalji tok proračuna, u cilju određivanja funkcije  $W=f(AK)$ , odvija se prema iterativnom postupku pri kome se ostvarena stanja akumulacije Bileća unose kao poželjna stanja u narednu iteraciju. Kao rezultat dobijaju se nove vrednosti ostvarenih stanja akumulacije, povećana proizvodnja na HE Trebinje 1, smanjenje iskoristivog protoka i smanjenje proizvodnje na HE Dubrovnik 1. Postupak se ponavlja, teoretski, dok se ne dobiju dovoljno male razlike poželjnih i ostvarenih stanja akumulacije Bileća. Praktična primena na datom sistemu pokazala je da suma proizvodnji na HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1 brže konvergira nekoj stalnoj (maksimalnoj) vrednosti nego stanja akumulacije. Već na osnovu ovog pokazatelja može se zaključiti da je maksimalna

proizvodnja na sistemu hidroelektrana HET-a stabilna za širi dijapazon promena stanja akumulacije Bileća.

**Druga iteracija.** Realizovana stanja akumulacije, iz proračuna sa maksimalnim korišćenjem akumulacije Bileća ( $470 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), zadata su kao poželjna stanja u drugoj iteraciji. Proračuni regulacije protoka i moguće proizvodnje HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1 pokazali su da je realizovano stanje akumulacije Bileća  $630 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Moguća proizvodnja na HE Trebinje 1 je povećana po osnovu povećanog stanja akumulacije i raspoloživog pada na 416 GWh. Iskoristivi protok na HE Dubrovnik 1 je smanjen na  $75,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , prelive povećani na  $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$  a moguća proizvodnja smanjena na 1467 GWh. Ukupna proizvodnja na razmatranim objektima iznosila je **1883 GWh**.

U proseku ostvarena stanja ( $630 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) su veća od poželjnih ( $470 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) za  $160 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Zadržan je karakterističan raspored stanja akumulacije tokom godine na koji je ukazano već u prvij iteraciji.

**Treća iteracija.** Realizovana stanja akumulacije iz druge iteracije ( $630 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), zadata su kao poželjna stanja u trećoj iteraciji. Proračuni regulacije protoka i moguće proizvodnje HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1 pokazali su da je realizovano stanje akumulacije Bileća  $725 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Moguća proizvodnja na HE Trebinje 1 je povećana po osnovu povećanog stanja akumulacije i raspoloživog pada na 437 GWh. Iskoristivi protok na HE Dubrovnik 1 je smanjen na  $73,9 \text{ m}^3/\text{s}$ , prelive povećani na  $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$  a moguća proizvodnja smanjena na 1447 GWh. Ukupna proizvodnja na razmatranim objektima iznosila je **1884 GWh**.

**Četvrta iteracija.** Realizovana stanja akumulacije, iz treće iteracije ( $725 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) zadata su kao poželjna stanja u četvrtoj iteraciji. Proračuni regulacije protoka i moguće proizvodnje HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1 pokazali su da je realizovano stanje akumulacije Bileća  $790 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Moguća proizvodnja na HE Trebinje 1 je povećana po osnovu povećanog stanja akumulacije i raspoloživog pada na 450 GWh. Pri ovim stanjima akumulacije javljaju se minimalni prelivi i na HE Trebinje 1 ( $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Iskoristivi protok na HE Dubrovnik 1 je smanjen na  $72,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , prelivi povećani na  $7,3 \text{ m}^3/\text{s}$  a moguća proizvodnja smanjena na 1417 GWh. Ukupna proizvodnja na razmatranim objektima iznosila je **1867 GWh**.

Dobijeni rezultati pokazuju povećanu osetljivost iskorišćenja potencijala na porast stanja akumulacije iznad  $725 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Povećanje nivoa u akumulaciji Bileća koje je realizovano u ovom proračunu ( $790 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), ima za posledicu:

- pojavu preliva i na HE Trebinje 1,
- pojavu pune akumulacije Bileća, u nekim slučajevima, i krajem godine,
- značajnije povećanje preliva i smanjenje iskoristivog protoka na HE Dubrovnik 1, i
- značajnije smanjenje proizvodnje sumarno na obe stepenice.

#### 4.3. Izbor optimalnog načina regulisanja u akumulaciji Bileća

Na bazi izvršenih analiza i proračuna regulisanja voda u Bilečkoj akumulaciji i proračuna moguće proizvodnje hidroelektrana Trebinje 1 i Dubrovnik 1 za više realizovanih stanja akumulacije, pošto je prethodno definisan prirodni raspored poželjnih stanja tokom godine, formirana je relacija  $W=f(AK)$ , koja predstavlja sumu proizvodnji HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1 (W) u funkciji stanja akumulacije Bileća (AK) i prikazana u tabeli 1.

Na slici 6. prikazan je dijagram funkcije  $W=f(AK)$ . Od značaja je deo dijagrama koji pokriva oblast maksimalnih proizvodnji. Deo dijagrama koji se odnosi na visoka stanja akumulacije Bileća, ukazuje na manji nivo moguće proizvodnje, a isto tako i deo dijagrama koji se odnosi na niska stanja akumulacije. Realan dijagram počinje od vrednosti akumulacije  $470 \times 10^6 \text{ m}^3$  (prosečna vrednost) koja predstavlja energetski minimum definisan maksimalnim

regulisanjem protoka iz akumulacije i minimizacijom preliva na Gorici. Razmatranje nižih vrednosti ima samo teoretski značaj za kompletno definisanje funkcije. Realizacija nižih stanja nema smisla, jer se ne može povećati obim iskoristivih voda na HE Dubrovnik 1 (naprotiv smanjiće se), a smanjiće se i raspoloživi pad na HE Trebinje 1. Očigledno niža stanja akumulacije dovode do smanjenja proizvodnje na obe stepenice.

Tabela 1. Sumarna vrednost proizvodnje HE Trebinje 1 i HE Dubrovnik 1

Stanje akumulacije (AK) ( $10^6 \text{ m}^3$ )	Sumarna proizvodnja ( $W_{tr1} + W_{du1}$ ) (GWh)
100	1360
470	1850
630	1883
725	1884
790	1867
1113	1575

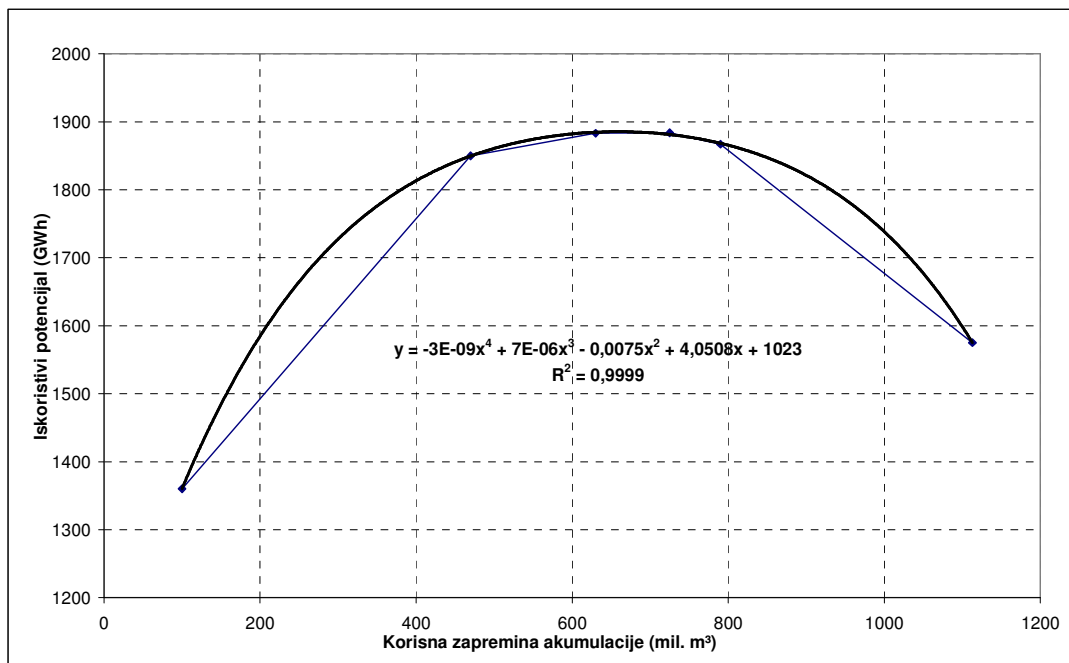
Promena iskoristivog potencijala u domenu visokih stanja akumulacije (preko  $790 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), je bliska linearnoj. U opsegu stanja akumulacije Bileća između  $470 \times 10^6 \text{ m}^3$  i  $790 \times 10^6 \text{ m}^3$  ostvaruje se maksimalna proizvodnja, tj. maksimalno iskorišćenje potencijala na vodotoku Trebišnjice. Promene u ovom opsegu veoma dobro se aproksimiraju polinomom četvrtog stepena što se i vizuelno potvrđuje.

Prikazani rezultati (dijagram na slici 6.), pokazuju da se značajno veća proizvodnja ostvaruje pri stanjima akumulacije između 40 i 80% nego pri maksimalnoj akumulaciji. Ta razlika od 275 GWh (17%) nedvosmisleno ukazuje na izvanredno veliki uticaj akumulacije Bileća na iskoristivost voda i na moguću proizvodnju na obe stepenice.

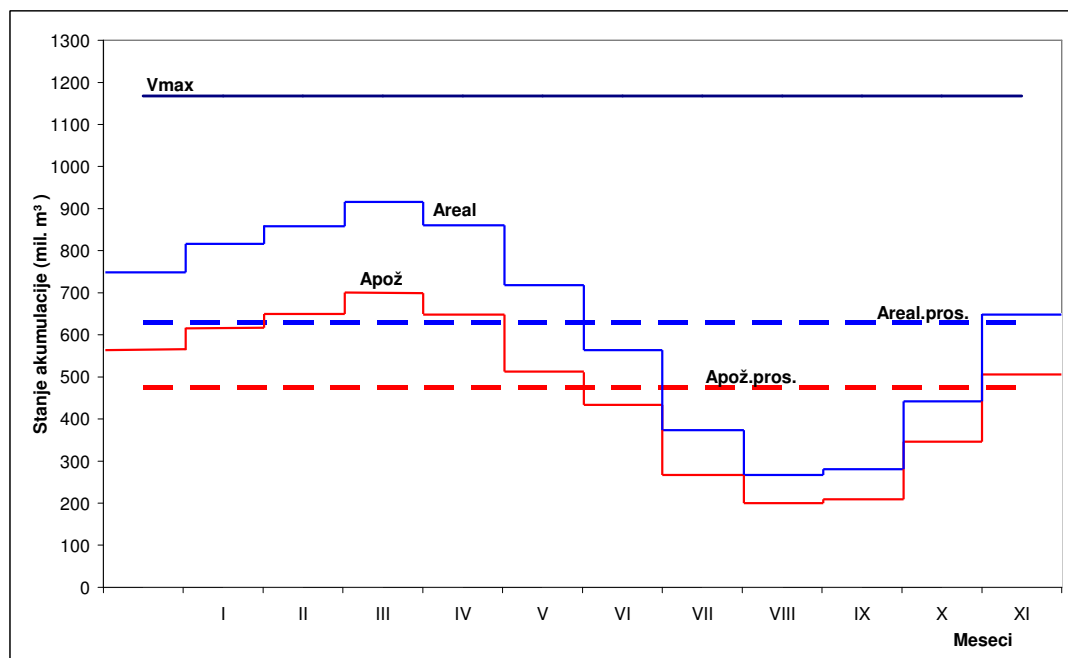
Drugi element od uticaja, u ovom slučaju ograničavajući faktor, je instalisani protok HE Dubrovnik 1 ( $90 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Može se reći da veličina akumulacije Bileća kompenzira nisku instalisanost HE Dubrovnik 1. Promena (povećanje) iskoristivog potencijala (moguća proizvodnja) u opsegu promene stanja akumulacije Bileća od 40 do 80% iznosi svega 34 GWh ili oko 2%. Postoji, dakle, širok dijapazon promene stanja akumulacije Bileća u kome je promena iskoristivog potencijala minimalna (manja od 2%). U tom smislu relaksiran je izbor optimalnog načina korišćenja Bilečke akumulacije prema kriterijumu maksimalne proizvodnje na objektima HET-a.

Iz opsega stanja akumulacije između 40 i 80%, izabran je, kao optimalan, način korišćenja akumulacije Bileća koji odgovara stanju akumulacije od  $630 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Ovo stanje akumulacije predstavlja prosečnu vrednost za

hidrološki period od 50 godina (1956. – 2005.). U cilju detaljnijeg definisanja načina angažovanja akumulacije Bileća, na slici 7. prikazan je prirodni raspored stanja akumulacije tokom godine.



Slika 6. Tehnički iskoristivi potencijal u funkciji stanja akumulacije Bileća



Slika 7. Prirodni raspored optimalnih stanja akumulacije Bileća tokom godine (apsolutne vrednosti)

Dijagrami prikazani na slici 7 su prosečne mesečne vrednosti i bliske su podacima koji odgovaraju verovatnoći pojave od 50%. Za različite hidrologije i ove vrednosti su različite, ali je oblik, odnosno godišnji raspored, veoma sličan.

## 5. KORDINACIJA ENERGETSKOG KORIŠĆENJA SA PRIORITETNIM KORISNICIMA VODA I PROSTORA

Uvažavajući potrebu i realnost koordinacije oba korisnika Bilečke akumulacije u pogledu principa upravljanja, ali i konkretnih obaveza, izvršena je analiza mogućih međusobnih uticaja optimalnog načina korišćenja akumulacije u energetskom i vodoprivrednom pogledu, posebno sa stanovišta vodoprivrednih ograničenja.

Svakodnevno obezbeđenje ekološki prihvatljivog protoka kroz Trebinje obavlja se prvenstveno iz međudotoka (kada je međudotok veći on kapaciteta HE Dubrovnik 1), pa tek zatim iz Bilečke akumulacije. Dok se korišćenje međudotoka u ove svrhe svodi na iskorišćenje preliva, korišćenje akumulacije Bileća ima, za HE Dubrovnik 1, tretman preliva. Prema još važećoj vodoprivrednoj dozvoli garantovani ekološki protok kroz Trebinje iznosi između 4 m<sup>3</sup>/s i 6 m<sup>3</sup>/s u zavisnosti od perioda godine i temperature. I najnovije analize, za potrebe produženja dozvole kreću se približno u sličnim opsezima.

Po pitanju prostora u akumulaciji za potrebe obezbeđenja ekološki prihvatljivog protoka, suština se iskazuje činjenicom da matrica optimalnih stanja nije, ni u jednoj hidrološkoj situaciji, zahtevala silazak na tako niske nivoe koji bi ugrozili ovu ulogu. Naprotiv, stanja akumulacije su bila značajno veća, što znači da se optimalnim stanjima pokrivaju i garancije u pogledu ekološki prihvatljivog protoka. Zahtevana obezbeđenost prostora u akumulaciji prikazana je u tabeli 2. Ovaj nivo

zapremine akumulacije omogućava ispuštanje ekološki prihvatljivog protoka do kraja vegetacionog perioda, ne računajući na dotok u akumulaciju ni međudotok na Gorici.

Veoma je bitna uloga Bilečke akumulacije za aktivnu zaštitu od poplava, ublažavanjem poplavnih talasa. Dinamika punjenja i održavanja stanja te akumulacije vodi računa o činjenici da se na početku zimskih meseci, kada se ulazi u period povećane verovatnoće nailaska velikih povodanja (*Dorđević, 2012*) održavaju stanja koja omogućavaju uspešnu transformaciju povodanja. Treba imati u vidu da su stanja akumulacija (na kraju meseca) dobijena na bazi prosečnih mesečnih protoka i da stvarna stanja tokom meseca odstupaju od ove vrednosti u oba smera. Osim toga, u hidrološkim podacima na mesečnom nivou sadržana je količina vode koju sa sobom donosi poplavni talas. Ona je samo uprosečena na ceo mesec, ali je obuhvaćena regulacijom u akumulaciji. U tom smislu stanja akumulacije (pa i optimalna) u sebi sadrže, u određenoj meri, i uticaj poplavnog talasa (po količini vode).

Imajući u vidu problematiku transformacije poplavnog talasa i uzvodno (Bileća) i nizvodno (Trebinje) stanja akumulacije su ograničena po maksimumu na nivoe prikazane u tabeli 3.

U hidrološkim uslovima većih rizika od poplava projekat upravljanja poplavnim rizicima predviđa da se u kritičnim zimskim mesecima ta anvelopna linija može spustiti za još oko 1 m (sl.10 u radu (*Dorđević, 2012*)).

Uvažavajući prethodna ograničenja i zahtevana optimalna stanja akumulacije Bileća izvršen je proračun realizovanih stanja u akumulaciji Bileća i regulisanih proticaja nizvodno. Zbirno, sa međudotokom, ovi regulisani proticaji daju dotok na profil Gorica koji se, prvenstveno, upućuje na HE Dubrovnik 1, a potom prema HE Trebinje 2 i PHE Čapljina.

Tabela 2. Potrebne zapremine za obezbeđenje ekološki prihvatljivog protoka

Mesec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V <sub>pp</sub> (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,2	32,1	16,1	0,0	0,0	0,0

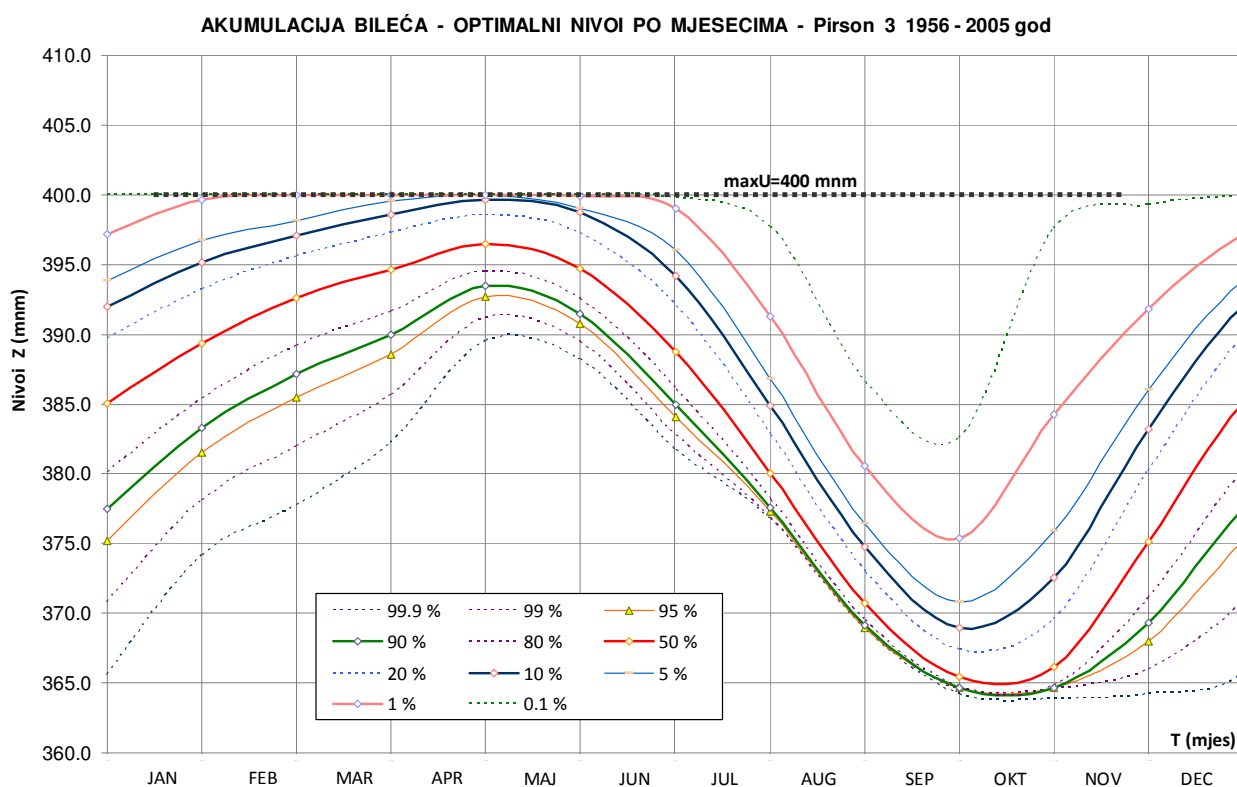
Tabela 3. Maksimalne kote punjenja akumulacija Bileća tokom godine

Mesec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kota (m.n.m.)	396	397	398	399	400	400	400	400	400	399	398	397

Na osnovu matrice optimalnih stanja, preko krive zapremine akumulacije  $H=f(AK)$ , određena je matrica optimalnih nivoa akumulacije Bileća. Diskretne vrednosti funkcija su aproksimirane teoretskom raspodelom (Pirson 3), a zatim je urađen i proračun raspodele verovatnoće pojave optimalnih nivoa (koji su u korelaciji sa optimalnim stanjima). Rezultati izvršenih analiza, u obliku dijagrama verovatnoće pojave optimalnih nivoa po mesecima, prikazani su na slici 8, koji su podloga za formulisanje pravila za korišćenje akumulacije Bileća.

Dijagram verovatnoće optimalnih stanja Bilečke akumulacije je veoma pogodan za dugoročno optimalno upravljanje sistemom. Na dijagramu su posebno vizuelno istaknute izolinije verovatnoće optimalnih stanja 10% (gornja anvelopa) i 90% (donja anvelopa). Tim linijama je definisan koridor optimalnih stanja u okviru koga treba da se kreće realizovana trajektorija stanja akumulacije tokom godine. Ona je odličan indikator da li se upravljanje dugoročno gledano odvija na poželjan način i da li treba izvršiti izvesnu korekciju u dinamici punjenja i pražnjenja akumulacije. Najpovoljnije je ako se radna trajektorija realizovanih

stanja akumulacije kreće približno oko verovatnoće 50% (središnja linija). Ukoliko se radna trajektorija ubrzano 'spušta' prema donjoj anvelopi, to je vrlo uverljiva indikacija da se akumulacija previše brzo prazni i da treba u skladu sa tim usporiti pražnjenje, da sistem ne bi došao u krizno stanje u malovodnom delu godine. Nasuprot, brzo podizanje radne trajektorije prema godnjoj anvelopi (10%) daje veoma korisnu upravljačku informaciju da hidrološke prilike omogućavaju da se akumulacija intenzivnije energetski koristi, čime se povećavaju energetski učinci, ali i smanjuje verovatnoća eventualnih nepotrebnih preliivanja u periodu nailaska povodanja. Ovo je kriterijum energetskog korišćenja, ali trajektorije optimalnih stanja postaju upravljački potpune tek kada se spoje sa krivama koje definišu neophodne rezervne (ispražnjene) zapremine Bilečke akumulacije, sa stanovišta optimizacije sistema za aktivnu odbranu od poplava ublažavanjem poplavnih talasa, čime se bavi članak (Đorđević, 2012) u ovom broju. Upravljačke dijagrame ovog tipa treba povremeno preispitati, u skladu sa novim hidrološkim podacima, ali i sa iskustvima u operativnom upravljanju.



## ZAKLJUČAK

Hidroelektrane na Trebišnjici (HET), koje su i do sada uočljivo prednjačile u širem regionu ovog dela Evrope u primeni savremenih metoda za optimizaciju upravljanja tim složenim višenamenskim sistemom, novim projektom 'Upravljanje akumulacijama i hidroelektranama sistema Trebišnjice' koji je uradio Zavod za vodoprivredu (2010) - dobio je savremen metodološki i veoma operativni upravljački softver koji omogućava optimizaciju upravljanja u pojedinim upravljačkim situacijama. Deo te metodike, prikazan u ovom radu, omogućava optimizaciju energetskog rada hidroelektrana po kriterijumu maksimizacije energetske proizvodnje, čime se najpotpunije iskorišćavaju performanse tog sistema. Metodika je na najpogodniji operativan način sažeta u vrlo jasno i lako upotrebljiv dijagram kojim se definišu verovatnoće optimalnih stanja Bilečke akumulacije tokom godine. Upravljanje elektranama kojim se radna trajektorija stanja Bilečke akumulacije održava unutar definisanog 'optimalnog koridora' (između 10% i 90%) obezbediće najveće energetske učinke, po kriterijumu maksimizacije energetske proizvodnje sistema.

U periodima povodanja prioritetno upravljanje postaje upravljanje po kriterijumu maksimalnog ublažavanja poplavnih talasa, čime se detaljno bavi rad u ovom broju (Đođević *et al.*, 2012). Pošto efikasno upravljanje sistemom i u tom periodu zavisi od stanja Bilečke akumulacije, optimizacija ta dva korisnika, koji imaju oprečne zahteve, miri se odgovarajućim korigovanim dispečerskim dijagramima. Na dijagram optimalnog upravljanja utiču i zahtevi upravljanja u malovodnim periodima, kako bi se u akumulaciji održavale neophodne zalihe vode (poštuju se kote minimalnih stanja), koje treba da obezbede pouzdano ispunjavanje i tih veoma važnih ekoloških funkcija.

## LITERATURA

[1] Metodologija za određivanje energetske-ekonomske opravdanosti i redosleda izgradnje novih elektrana u okviru ZEP-a - Energoprojekt, 1978.

- [2] Analiza energetske-ekonomske opravdanosti daljih aktivnosti na projektu RHE Bistrica, Energoprojekt-Hidroinženjering, 2011.
- [3] Upravljanje akumulacijama i hidroelektranama sistema Trebišnica, Zavod za vodoprivredu, d.o.o., Bijeljina, 2010.
- [4] Moguća proizvodnja hidroelektrana u Srbiji, Energoprojekt-Entel, 1992.
- [5] Milić, S., Milovanović M. (2001): Uloga i značaj hidroelektrana u elektroenergetskom sistemu i moguća dalja razvoja hidroenergetike, Izgradnja, u organizaciji SANU.
- [6] Milić, S., Orlić D. (1997): Zbirne karakteristike hidroelektrana, SIGRE 1997.
- [7] Đorđević, B. i M. Šaranović (2007): Male hidroelektrane ne mogu biti zamena za velika i srednja hidroenergetska postrojenja, Vodoprivreda, br. 228, s.205-214
- [8] Đorđević, B. (2008): Objektivno vrednovanje obnovljivih energija, Vodoprivreda, br. 231-233. s.19-38
- [9] Đorđević, B. i T. Dašić (2011): Određivanje potrebnih protoka nizvodno od brana i rečnih vodozahvata, Vodoprivreda, br. 252-254, s. 151-164
- [10] Đorđević, B., T. Dašić i N. Sudar (2012): Povećanje efikasnosti upravljanja akumulacijama u periodu odbrane od poplava, Vodoprivreda, br. 255-257, s. 43-58
- [11] Bonacci, O. et al. (2008a): Prilozi za ekohidrologiju karsta, Vodoprivreda, br. 231-233, s. 3-18
- [12] Bonacci, O. (2008b): Upravljanje rizicima u vodoprivredi, Vodoprivreda, br.234-236, s.167-174
- [13] Strategija integralnog upravljanja vodama Republike Srpske, Zavod za vodoprivredu, Bijeljina, 2012. sajt Agencije za vode RS: [www.voders.org](http://www.voders.org)

## METHODOLOGY FOR OPTIMAL USAGE OF HPP RESERVOIRS FROM THE ASPECT OF THE RIVER BASIN GENERATION MAXIMISATION

by

Slobodan MILIĆ  
Energoprojekt, Entel, Beograd  
E-mail: smilic@ep-entel.com

### Summary

The paper addressed one methodological approach for optimization of the system of HPPs in one river basin with front reservoir and downstream run-of-river hydro power plant (r-o-r HPP). The approach is applied to the hydro system at River Trebišnjica characterized by large front reservoir, low rated discharge at downstream r-o-r HPP and significant lateral inflow that coincides with the inflow into the front reservoir. Characteristic of the system is that upstream HPP with reservoir has also environmental obligations (environmental flow) and obligations regarding mitigation of flood wave, as well as that spillages at the r-o-r HPP cannot be used at

downstream HPPs due to river sunk into the earth. As a result of optimization, desirable levels in the reservoir were obtained and these levels were used to define the operation manner of the Bileća reservoir with the aim to maximize the generation at HPPs in the river basin respecting the water and space priority users' requirements.

Key words: hidropower plants (HPP), Trebishnjica river, water storage reservoir, optimal usage od HPP, maximisation, control policy during a year

Redigovano 02.08.2012.