

Kratkoročna optimizacija rada hidroelektrana u nizu

Klaudija Bašić¹, doc.dr.sc. Damir Bekić²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kbasic@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, damir.bekic@grad.hr

Sažetak

Hidroenergetski sustavi su višenamjenski objekti čija je osnovna namjena proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora - vode. Osim proizvodnje električne energije, ističe se i zaštita okolnog područja od štetnog djelovanja voda. Optimalan rad hidroelektrana u nizu predstavlja traženje funkcije cilja s obzirom na postavljene kriterije i uz definirana ograničenja koja mogu biti fizikalna i operativna. Dva su glavna kriterija koja se postavljaju pri optimizaciji: kako minimizirati potreban rad te kako maksimizirati korist. Za definiranje optimalnog rada višenamjenskih objekata koriste se različite metode pa je potrebno odabrati prikladnu metodu optimizacije koja odgovara tipu problema. U radu hidroelektrana u nizu poseban izazov predstavlja optimizacija za vrijeme velikih voda. Optimizacija hidroelektrana u nizu uključivat će rezultate hidroloških prognoza.

Ključne riječi: hidroelektrane, optimizacija, obrana od poplava, funkcije cilja, hidrološke prognoze

Short-term optimization of cascade hydropower plant systems

Abstract

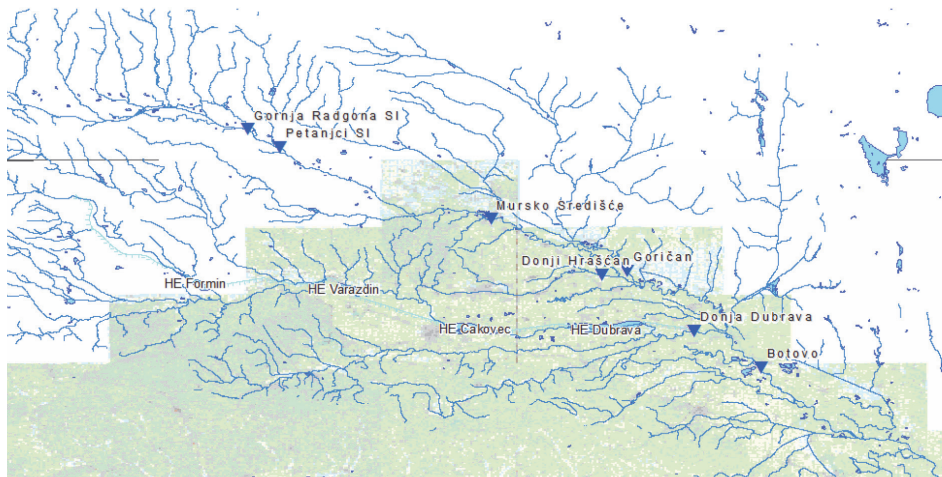
Hydropower plant systems are multifunctional facilities whose primary purpose is to produce electricity from renewable water sources. Besides electrical energy production, a significant objective of these systems is to ensure an appropriate flood control. To define an optimum operation of a hydropower plant, it is necessary to determine an objective function, based on definition of objectives and constraints that can be physical and operational. Two main optimisation criteria involve reducing the effort to minimum, and maximizing the benefit. Various methods are used to define an optimum operation of multifunctional facilities, and an appropriate one must be selected taking into account the type of the problem to be solved. A particular challenge in the use of cascade power plant systems is the optimisation of plat operation in high water conditions. The optimization of cascade hydropower plant systems also involves consultation of hydrological forecast results.

Key words: hydropower plants, optimization, flood control, objective functions, hydrological forecast

1 Uvod

Hidroenergetski sustavi su višenamjenske građevine čija je glavna svrha proizvoditi električnu energiju. Zadovoljavanje vršnih potreba za električnom energijom ostvaruje se proizvodnjom električne energije na hidroelektranama iz razloga što su troškovi pogona hidroelektrana znatno manji nego što je to slučaj kod termoelektrana [1-3]. Jedna od važnijih namjena hidroenergetskih sustava je i zaštita okolnog područja od štetnog djelovanja voda. Od ostalih namjena ističu se vodoopskrba, navodnjavanje, plovidba, rekreacija, zaštita od erozije [4]. Optimalno upravljanje hidroelektranom iznimno je zahtjevan zadatak zato što su određene namjene akumulacijskog jezera hidroelektrane oprečne, kao na primjer proizvodnja električne energije i zaštita od štetnog djelovanja voda okolnog područja. Ako se želi optimizirati hidroelektrane u nizu, problem se dodatno komplicira uslijed povećanja broja hidroelektrana. Osim navedenog, slučajna priroda dotoka u akumulacijsko jezero hidroelektrane također otežava rješavanje ovog problema.

Republika Hrvatska jedna je od vodećih država u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora. Više od polovice izvora proizvodnje električne energije, u strukturi elektroenergetskog sustava, čine hidroelektrane. Područje ovog istraživanja su hidroelektrane u nizu na sjeveru Republike Hrvatske (slika 1.), odnosno hidroelektrane HE Varaždin, HE Čakovec i HE Dubrava koje pripadaju proizvodnom području HE Sjever [5].



Slika 1. Pregled predmetnog područja [6]

Osim proizvodnog područja HE Sjever koje se sastoji od tri hidroelektrane, u Hrvatskoj postoje još dva proizvodna područja PP HE Zapad i PP HE Jug. U pogonu se sada nalazi 26 hidroelektrana koje su podijeljene u ta tri proizvodna područja [5].

2 Optimizacija rada višenamjenskih hidroelektrana

2.1 Općenito o optimizaciji višenamjenskih hidroelektrana

Definiranje optimalnog upravljanja višenamjenskim objektima, kao što su akumulacijsko jezero hidroelektrane, svodi se na problem višekriterijske optimizacije. Poteškoće koje se javljaju pri višekriterijskom odlučivanju proizlaze iz činjenice da su namjene takvih objekata u pravilu konfliktne te konačna odluka, odnosno odabir optimalnog načina upravljanja predstavlja kompromis između određenih namjena. Pri donošenju konačne odluke, odnosno u slučaju optimalnog upravljanja hidroelektranama u nizu, mora se voditi računa i o važnostima pojedinih namjena višenamjenskih objekata [7]. Uzmimo za primjer upravljanje radom hidroelektrane tijekom velikovodnog događaja kada su suprotstavljene dvije različite namjene akumulacijskog jezera hidroelektrane, a to su proizvodnja električne energije i zaštita od štetnog djelovanja voda. Sa stajališta proizvodnje električne energije, razina u akumulacijskom jezeru hidroelektrana s dnevnim ili tjednom regulacijom protoka treba se održavati na što većoj razini, odnosno na koti normalnog uspora. Međutim, to se odnosi na periode bez velikovodnih događaja. Tijekom nekog velikovodnog događaja potrebno je održavati razinu vode u akumulacijskom jezeru hidroelektrane što bliže koti minimalnog radnog nivoa za vrijeme tog događaja. Da bi se prihvatio vodni val, potrebno je napraviti i pretpražnjenje akumulacijskog jezera. Predpražnjenje akumulacija za prihvrat vodnog vala kod hidroelektrana u nizu potrebno je obavljati od uzvodnih akumulacijskih jezera prema nizvodnima. Međutim, nakon što prođe vodni val potrebno je što prije vratiti razinu u akumulacijskom jezeru na kotu normalnog uspora [8].

2.1 Ograničenja optimizacijskog problema

Kontrolne varijable [9], odnosno varijable koje se mogu mijenjati tijekom optimizacije, mogu biti ograničene i neograničene. Pri upravljanju radom hidroelektrana postoje određena ograničenja, što čini ovaj problem ograničenim [10]. Ograničenja mogu biti fizikalna i operativna [11]. Postavljena ograničenja moraju biti ne-negativna, odnosno moraju biti zadovoljena [12]. Pri upravljanju radom hidroelektrana postoje određena ograničenja. Očuvanje volumena u akumulacijskom jezeru definira se na način da volumen u svakom od akumulacijskih jezera mora biti jednak razlici količine vode koja dotječe u jezero i koja istječe iz jezera preko turbine ili preko preljeva:

$$V_{t+1,i} - V_{t,i} = (Q_{t,i}^F - Q_{t,i}^T - Q_{t,i}^S) \Delta t \quad (1)$$

$V_{t+1,i}$ - volumen u akumulaciji u trenutku $t+1$

$V_{t,i}$ - volumen u akumulaciji u trenutku t

- $Q_{t,i}^F$ - dotok u akumulacijsko jezero i u trenutku t
 $Q_{t,i}^T$ - protok kroz turbinu akumulacijskog jezera i u trenutku t
 $Q_{t,i}^S$ - protok preko preljeva akumulacijskog jezera i u trenutku t
 Δt - vremenski interval.

Izraz (1) predstavlja izravnu vezu između protoka i volumena u akumulacijskom jezeru. Ako je akumulacijsko jezero prvo u nizu hidroelektrana, tada dotok u jezero predstavlja prirodni protok samog vodotoka. Ako to nije slučaj, kao dotok u akumulacijsko jezero uzima se količina vode koja dolazi iz uzvodnog jezera i količina vode sa sliva promatranog akumulacijskog jezera [11]:

$$Q_{t,i}^F = \sum_{k=1, k \in U}^N (Q_{t,k}^T + Q_{t,k}^S) + Q_{t,k}^I \quad (2)$$

- $Q_{t,i}^F$ - dotok u akumulacijsko jezero i u trenutku t
 $Q_{t,k}^T$ - protok kroz turbinu akumulacijskog jezera k u trenutku t
 $Q_{t,k}^S$ - protok preko preljeva akumulacijskog jezera i u trenutku t
 $Q_{t,k}^I$ - dotok s vlastitog sliva akumulacijskog jezera i u trenutku t .

Fizikalna ograničenja u radu hidroelektrana odnose se na kapacitet akumulacijskog jezera te turbine, prema [13] su:

- Ograničenje volumena - minimalni i maksimalni dopušteni volumen u akumulaciji

$$V_{i,t}^{min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t}^{max} \quad (3)$$

- $V_{i,t}^{min}$ - minimalno dopušteni volumen u akumulacijskom jezeru i u trenutku t
 $V_{i,t}$ - volumen u akumulacijskom jezeru i u trenutku t
 $V_{i,t}^{max}$ - maksimalno dopušteni volumen u akumulacijskom jezeru i u trenutku t .

- Ograničenje razina u akumulacijskom jezeru - minimalna i maksimalna dopuštena razina u akumulaciji

$$h_{min} \leq h_t \leq h_{max} \quad (4)$$

- h_{min} - minimalno dopuštena razina u akumulacijskom jezeru
 h_t - razina u akumulacijskom jezeru u trenutku t
 h_{max} - maksimalno dopuštena razina u akumulacijskom jezeru

- Ograničenje proizvodnje - maksimalna proizvodnja električne energije hidroelektrane

$$W_{t,i} \leq W_i^{max} \quad (5)$$

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t

W_i^{max} - maksimalno moguća proizvodnja električne energije hidroelektrane i

- Ograničenje ispravnog rada turbina - minimalni protok kroz turbine koji treba osigurati zbog ekoloških, sanitarnih i ekonomskih razloga [11]

$$Q_i^{D,min} \leq Q_{t,i}^T \quad (6)$$

$Q_i^{D,min}$ - minimalno dopušteni protok kroz turbinu akumulacijskog jezera i

$Q_{t,i}^T$ - protok kroz turbinu i u trenutku t .

Operativna ograničenja u radu hidroelektrana odnose se na minimalne zahtjeve vodotoka, prema [13]:

- Ograničenje protoka - minimalni i maksimalni dopušteni izlazni protok iz akumulacijskog jezera preko preljeva i kroz strojarnicu [14]

$$Q_{i,t}^{min} \leq (Q_{i,t} + S_{i,t}) \leq Q_{i,t}^{max} \quad (7)$$

$Q_{i,t}^{min}$ - minimalno dopušteni izlazni protok iz akumulacijskog jezera i u trenutku t

$Q_{i,t}$ - protok kroz turbinu akumulacijskog jezera i u trenutku t

$S_{i,t}$ - protok preko preljeva akumulacijskog jezera i u trenutku t

$Q_{i,t}^{max}$ - maksimalno dopušteni izlazni protok iz akumulacijskog jezera i u trenutku t

2.2 Funkcije cilja

Da bi se definirao optimalan rad hidroelektrana u nizu, potrebno je odrediti funkciju cilja s obzirom na postavljene ciljeve i uz definirana ograničenja [15]. Funkcija cilja može biti postavljena u odnosu na proizvodnju električne energije ili u odnosu na neke druge namjene akumulacijskog jezera hidroelektrane, kao što su vodoopskrba, navodnjavanje, zaštita od štetnog djelovanja voda okolnog područja, plovidbe i drugih. U nastavku će se prikazati funkcije cilja postavljene u odnosu na dvije važne namjene akumulacijskog jezera hidroelektrana, a to su proizvodnja električne energije i zaštita od štetnog djelovanja vode. Važno je odabrati prikladnu funkciju cilja koja će se minimizirati ili maksimizirati. Funkcije cilja sa stajališta proizvodnje električne energije mogu se postaviti na različite načine, odnosno prema različitim kriterijima [10]:

1. Minimiziranje proizvodnje energije iz drugih izvora

Kao drugi izvori za proizvodnju električne energije najčešće se koriste termoelektrane i nuklearne elektrane koje imaju puno veće troškove pogona i održavanja.

$$\min[W_{ce} = \sum_{t=1}^M (D_t - \sum_{i=1}^N W_{t,i})^2] \quad (8)$$

W_{ce} - ukupno proizvedena energija iz drugih izvora

D_t - ukupna potražnja energije u određenom razdoblju

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t .

2. Maksimiziranje proizvodnje električne energije

Postavljanje funkcije cilja na ovaj način ima smisla ako je maksimalna moguća proizvodnja energije uvijek manja od potražnje za električnom energijom. Na taj način se osigurava da će sva proizvedena električna energija biti prodana.

$$\max(W_G = \sum_{t=1}^M \sum_{i=1}^N W_{t,i}) \quad (9)$$

W_G - ukupno proizvedena energija

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t .

3. Maksimiziranje minimalne proizvodnje električne energije

Postavljanje funkcije cilja na ovakav način sa stajališta neovisne tvrtke koja prodaje električnu energiju na tržištu predstavlja maksimiziranje garantirane proizvodnje električne energije bez obzira na moguće okolnosti. Ta proizvedena energija prodaje se po cijeni koja je dogovorena unaprijed dugoročnim ugovorom te u konačnici predstavlja bolju cijenu energije. Sa stajališta cijelog sustava, postavljanje funkcije cilja na ovaj način minimizira potrebu za instalacijom elektrana koje će raditi u periodu kada je raspoloživost hidroenergije mala. Taj cilj je izrazito važan kada postoje velike varijacije u količini oborine, koje bi bez akumulacijskog jezera hidroelektrane, dovele do odgovarajućih varijacija u proizvodnji električne energije.

$$\max \min \sum_{i=1}^N W_{t,i} \quad (10)$$

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t .

4. Maksimiziranje profita od sekundarne energije

Ako se ukupno proizvedena energija umanjuje za osiguranu energiju koja se definira dugoročnim ugovorom, tada se ta preostala energija prodaje na predviđenom tržištu. Postavljanjem funkcije cilja na ovakav način nastoji se maksimizirati profit od prodaje te energije u trenucima kada se očekuje da je cijena najviša.

$$\max \sum_{t=1}^M p_t \left(\sum_{i=1}^N W_{t,i} - D_c \right) \quad (11)$$

p_t - očekivana cijena električne energije u određenom razdoblju

$W_{t,i}$ - proizvedena energija hidroelektrane i u trenutku t

D_c - osigurana energija.

Za definiranje funkcije cilja sa stajališta zaštite od štetnog djelovanja voda postoje dvije mogućnosti. Jedna od mogućnosti definirana je izrazom (12) da se zanemare sve ostale namjene akumulacijskog jezera hidroelektrane te da se sve podredi zaštiti od štetnog djelovanja voda. Druga mogućnost, izraz (14), odnosi se na to da se uz zaštitu od štetnog djelovanja voda u obzir uzimaju i ostale namjene, odnosno da se osigura određena količina vode u akumulacijskom jezeru hidroelektrane i za vodoopskrbu, navodnjavanje, proizvodnju električne energije i slično [11].

$$\min \sum_{t=1}^M \sum_{i=1}^N (Q_{t,i}^D - Q_i^{fc})^2 \quad (12)$$

$$\min \sum_{t=1}^M \sum_{i=1}^N \max\{Q_{t,i}^D - Q_i^{fc}, 0\} \quad (13)$$

$Q_{t,i}^D$ - ukupni izlazni protok (protok neposredno nizvodno od hidroelektrane i u trenutku t)

Q_i^{fc} - granični protok.

3 Metode optimizacije

Metoda optimizacije ima mnogo te odabir prikladne metode ovisi o problemu optimizacije. Metodama optimizacije nastoji se, uz što kraće vrijeme proračuna i što manje zauzimanje računalne memorije, odrediti optimalno rješenje [16]. U nastavku je dan kratak uvid u determinističke, stohastičke, klasične i napredne metode optimizacije.

3.1 Metode optimizacije prema tipu varijable

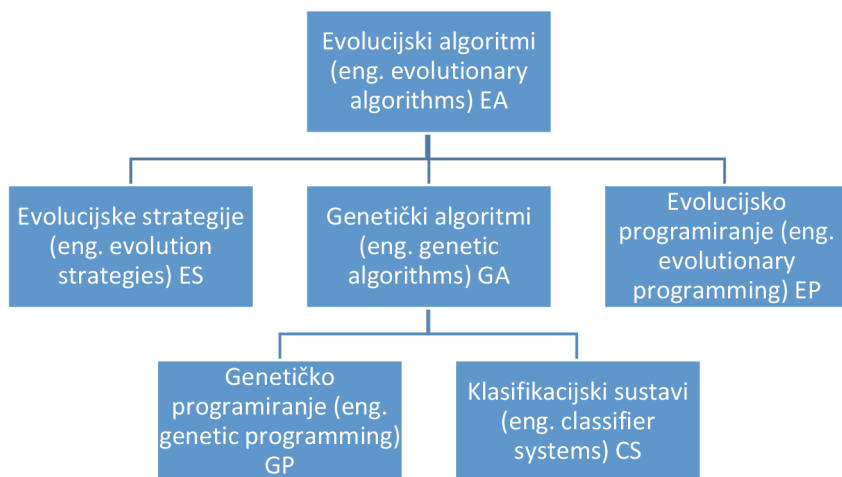
Metode optimizacije prema tipu varijable mogu biti determinističke i stohastičke. Za optimizaciju hidroelektrana u nizu mogu se koristiti i jedne i druge metode. Svaka od njih ima određene prednosti i nedostatke za optimizaciju hidroelektrana u nizu. Stohastička optimizacija ima važnu ulogu u analizi, projektiranju i upravljanju modernim sustavima. Metode stohastičke optimizacije koriste se kod sustava koji su izrazito nelinearni, višedimenzionalni ili na bilo koji drugi način neprimjereni za klasične determinističke metode optimizacije. Stohastički algoritmi za optimizaciju široko su dostupni te imaju široku primjenu na problemima u statistici, znanosti, inženjerstvu i poslovanju [15]. Cilj kod stohastičkih metoda je pronaći pristup koji je primjenjiv za sve ili gotovo sve moguće tipove podataka te optimizira očekivane performanse modela. Prednost u primjeni stohastičkih metoda leži u činjenici da se mogu koristiti u slučajevima kada podaci za određeni problem nisu poznati već se koriste distribucije vjerojatnosti. Stohastička optimizacija uključuje nesigurnosti u model.

Kod determinističkih pristupa pretpostavlja se da su podaci za određeni problem točno poznati, ali u većini praktičnih problema to nije slučaj iz dva razloga. Prvi razlog je uslijed pogreške mjerenja. Drugi i temeljni razlog je da neki podaci predstavljaju podatak odnosno informaciju o budućnosti (npr. prognozirani dotok u akumulacijsko jezero hidroelektrane, cijena za buduće razdoblje) te se taj podatak ne može sa sigurnošću točno znati [10]. Stohastički pristupi su fleksibilniji i učinkovitiji od determinističkih pristupa, ali vjerojatnost dobivenog rješenja nije zajamčena [18].

3.2 Metode optimizacije prema pristupu

Za definiranje optimalnog upravljanja višenamjenskim hidroelektranama koriste se različite metode. Metode optimizacije prema pristupu dijele se na klasične i na napredne metode optimizacije. Odabir prikladne metode optimizacije ovisi o tipu problema optimizacije. Klasične metode optimizacije koriste se kod jednodimenzionalnih i višedimenzionalnih problema optimizacije.

Od klasičnih metoda najčešće se koriste direktne metode kao što su metoda zlatnog reza te metoda kvadratne interpolacije, gradijentne metode, metode linearnog programiranja te metode unutarnje točke. S obzirom na to da su problemi u praksi dosta složeni i nelinearni te su ciljevi višestruko suprotstavljeni, klasične metode nisu učinkovite u rješavanju ovih problema. Tada se primjenjuju metode kao što su metoda simuliranog kaljenja ili evolucijski algoritmi [19].



Slika 2. Podjela evolucijskih algoritama [20]

Evolucijski algoritmi (slika 2.) su skup modernih stohastičkih metoda koje se uspješno koriste u rješavanju vrlo složenih problema. Valja naglasiti da je metoda i raznih varijacija mnogo. Kao važnije ističu se dvije grupe evolucijskih algoritama, a to su genetičko programiranje i klasifikacijski sustavi [21].

4 Utjecaj hidroloških prognoza na optimalno upravljanje hidroelektranama u nizu

Hidrološke prognoze izravno utječu na nepouzdanosti i pogreške pri proizvodnji električne energije te predstavljaju rizik pri provedbi plana proizvodnje električne energije. Ako se za definiranje plana proizvodnje električne energije koriste prognozirani dotoci, a ne izmjerene vrijednosti, tada na primjenu definiranog plana proizvodnje električne energije može utjecati nepouzdanost i nepreciznost hidroloških prognoza dotoka u akumulacijsko jezero hidroelektrane. Iz tog razloga, izvorni plan upravljanja radom hidroelektrana neće biti proveden kako je planirano, već će se trebati prilagođavati i prepravljati tijekom vremena. Ovakav način rada može znatno utjecati na sigurnost samih hidroelektrana. Stoga prilikom izrade plana proizvodnje električne energije treba obratiti posebnu pozornost na nepouzdanost hidroloških prognoza [22].

Pri određivanju optimalnog upravljanja radom hidroelektrana u nizu, razmatra se u ovom radu utjecaj determinističkih i probabilističkih hidroloških prognoza. Deterministička i stohastička optimizacija hidroelektrana u nizu za vrijeme velikih voda proizvodit će se u kombinaciji s rezultatima determinističkih i probabilističkih hidroloških

prognoza. Odredit će se koja od ovih kombinacija pruža značajnu zaštitu od štetnog djelovanja voda nizvodnog područja hidroelektrana u nizu a da pritom ne utječe na proizvodnju električne energije ili kojom kombinacijom možemo ostvariti željenu razinu zaštite od poplava uz povećanje proizvodnje električne energije [3].

5 Zaključak

Uslijed klimatskih promjena dolazi do složenih vremenskih i prostornih promjena vodnih resursa što može dovesti do promjene uvjeta vezanih za rad višenamjenskih građevina kao što su hidroelektrane. Određivanje optimalnog rada hidroelektrana u nizu zahtjevno je s obzirom na veliki broj ulaznih varijabli, nelinearnosti dinamike sustava, slučajne prirode dolaznih protoka te ostalih nesigurnosti sustava [23]. Za rješavanje ovog problema postoji mnogo razvijenih metoda, pa treba odabrati one koje će ispravno riješiti optimizaciju rada hidroelektrana u nizu. Navedeni problem je višekriterijski, s ograničenjima i nelinearan. U radu su dane smjernice za istraživanje unapređenja planiranja rada hidroelektrana u nizu za vrijeme velikih voda uz prethodno definirane kriterije i funkcije cilja. Očekuje se da će rezultati budućih istraživanja pokazati kako je na temelju hidroloških prognoza moguće kratkoročno optimizirati rad hidroelektrana u nizu i povećati njihovu razinu sigurnosti za vrijeme velikih voda. Osim toga, očekuje se da će uključivanje višekriterijskog odlučivanja u planiranje rada rezultirati efikasnijim i ekonomičnijim radom višenamjenskih hidroelektrana.

Literatura

- [1] Heydari, M., Othman, F., Taghieh, M.: Optimization of multiple and multipurpose reservoir system operations by using matrix structure (Case study: Karun and Dez Reservoir Dams), PLoS ONE 11 (2016), pp. 1-16.
- [2] Sharma, R. N. et al.: Decision support system for operation, scheduling and optimization of hydro power plant in Jammu and Kashmir region, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43 (2015), pp. 1099-1113.
- [3] Fan, F. M. et al.: Performance of Deterministic and Probabilistic Hydrological Forecasts for the Short-Term Optimization of a Tropical Hydropower Reservoir, Water Resources Management, 30 (2016), pp. 3609-3625.
- [4] Multipurpose Use of Hydropower Reservoirs, https://energypedia.info/wiki/Multipurpose_Use_of_Hydropower_Reservoirs
- [5] HEP proizvodnja, <http://proizvodnja.hep.hr/proizvodnja/osnovni/hidroelektrane/default.aspx>
- [6] Copernicus - Europe's eyes on Earth, <https://land.copernicus.eu/pan-european>

- [7] Vlah, S.: Modeli višekriterijskog odlučivanja i heuristike za njihovo rješavanje., Magistarski rad, 2008.
- [8] Xie, W. et al.: Short-term power generation scheduling rules for cascade hydropower stations based on hybrid algorithm, *Water Science and Engineering*, 5 (2012), pp. 46-58.
- [9] PMF - Optimizacija, https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/PREDAVANJE5.pdf
- [10] Neos Guide, <https://neos-guide.org/optimization-tree>
- [11] Scola, L.A., Takahashi, R.H.C., Cerqueira, S.A.A.G.: Multipurpose Water Reservoir Management: An Evolutionary Multiobjective Optimization Approach, *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-14, 2014.
- [12] Zamarin, A., Jelovica, J., Hadjina, M.: Optimizacija strukture s više funkcija cilja - Pregled postojećih metoda genetskog algoritma, *Engineering Review* 29 (2009), pp. 87-100.
- [13] Madani, K., Lund, J.R.: Modeling California's high-elevation hydropower systems in energy units, *Water Resources Research*, 45 (2009), pp. 1-12.
- [14] Lu, P. et al.: Short-term hydro generation scheduling of Xiluodu and Xiangjiaba cascade hydropower stations using improved binary-real coded bee colony optimization algorithm, *Energy Conversion and Management*, pp. 19-31, 2015.
- [15] Labadie, J.W.: Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130 (2004), pp. 93-111.
- [16] Rothlauf, F.: Optimization Methods (Chapter), *Design of Modern Heuristics*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 45-102, 2011.
- [17] Spall, J.C.: Stochastic Optimization (Chapter), *Handbook of Computational Statistics*, (ur. Gentle, J., Härdle, W., Mori, Y.), Springer Heidelberg, Dordrecht, London and New York, pp. 170-194, 2004.
- [18] Lin, M.H., Tsai, J.F., Yu, C.S.: A Review of Deterministic Optimization Methods in Engineering and Management, *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-15, 2012.
- [19] Shodhganga - a reservoir of Indian theses, http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/11449/9/09_chapter%204.pdf
- [20] Grundler, D.: Evolucijski algoritmi (I) - Pobude i načela, *Automatika*, 42 (2001), pp. 13-22.
- [21] Introduction on Evolutionary Algorithms, <http://neo.lcc.uma.es/opticomm/introea.html>
- [22] Wang, L. et al.: Study on optimization of the short-term operation of cascade hydropower stations by considering output error, *Journal of Hydrology*, 549 (2017), pp. 326-339.
- [23] Gjengedal, T.: Optimization in Short-Term Operation of Hydro Power Systems, *Engineering Review*, 6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Tenerife, pp. 290-300, 2006.