

OPTIMIZACIJA SUSTAVA HIDROAKUMULACIJE MODRAC

**doc. dr. sc. Omer Kovčić,
dipl. ing. građ.**

JP SPREČA za vodoprivrednu
djelatnost d.d. Tuzla,
Aleja Alije Izetbegovića 29/VII,
omer.kovcic@gmail.com

Razmatrajući problem hidroakumulacija uočava se kako reguliranje vodnog režima predstavlja izazov, osobito kod hidroakumulacija sa smanjenim volumenskim prostorom kao što je to slučaj kod hidroakumulacije Modrac. Nedjelotvorno upravljanje i iskoristivost hidroakumulacije Modrac dovodi do nedovoljne iskoristivosti vodnih resursa. Stoga je potrebno načiniti optimizaciju sustava, odnosno napraviti optimizacijski matematički model kako bi se povećali njeni učinci. U radu je dat pregled dinamičkog matematičkog modela sustava hidroakumulacije Modrac, odnosno svi koraci o optimizaciji sustava za efikasnije upravljanje hidroakumulacijom Modrac. Prikazano je i nekoliko urađenih dinamičkih matematičkih modela rada sustava hidroakumulacije koji su do sada napravljeni u svijetu i regiji. Može se istaknuti da je analizirani diskretni model dinamičkog programiranja upravljanja sustavom hidroakumulacije Modrac procentualno za cca 26,80 %, efikasniji i operativniji u odnosu na stvarni sustav hidroakumulacije Modrac.

Ključne riječi: višenamjenska hidroakumulacija Modrac, optimizacija, matematički model, dinamički model, ciljna funkcija, maksimalizacija hidroenergije, efikasno upravljanje, operativni dijagram

1. UVOD U UPRAVLJANJE VIŠENAMJENSKIM HIDROAKUMULACIJAMA

Upravljanje hidroakumulacijama predstavlja složen problem koji podrazumijeva mnoge varijable odlučivanja, mnogostruke ciljeve, kao i znatan rizik i nesigurnost. Osim toga, sukobljeni ciljevi dovode do značajnih izazova za operatore prilikom donošenja odluka pri upravljanju.

Osim toga, upravljanje hidroakumulacijama predstavlja jedan od najkompleksnijih problema u upravljanju vodnim resursima prvenstveno uslijed (1) stohastičke prirode doticaja, (2) višenamjenske prirode rada hidroakumulacije i (3) višestupanjske i dinamičke prirode donošenja odluka o radu sustava hidroakumulacije, te je zbog toga vrlo teško pronaći jedan model ili tehniku, koja bi bila univerzalno prihvaćena za rad sustava hidroakumulacija (P.

Simonović, S. 2009).

Namjene jedne višenamjenske hidroakumulacije mogu uključivati kontrolu poplava, plovidbu, proizvodnju hidroenergije, opskrbu industrije i stanovništva vodom, navodnjavanje, upravljanje kvalitetom vode, rekreaciju, kontrolu erozije i sedimentacije; te kombinaciju svih gore navedenih stavki (P. Simonović, S. 2009).

Upotreba analitičkih i sustavnih pristupa upravljanju hidroakumulacijama je veoma korisna, ne samo u probabilističkim/stohastičkim analizama nego i u predviđanju ekstremnih hidroloških događaja i informiranju javnosti o njima. Stoga upotreba naprednih računalnih tehnologija omogućuje porast učinkovitosti rada hidroakumulacije za balansiranje potreba korisnika.

Operativna (radna) pravila (engl. *rule curves*) često se koriste za pružanje smjernica za ispuštanje količine vode iz hidroakumulacije kojim se zadovoljavaju potrebe u mnogim praktičnim situacijama, a koje se obično prikazuju u obliku grafikona ili tabelarno, za ispuštanje

količine vode iz sustava hidroakumulacije prema trenutnoj razini ili volumenu vode u hidroakumulaciji, hidrometeorološkim uvjetima i drugim čimbenicima (P. Simonović, S. 2009).

Višenamjenske hidroakumulacije svih stupnjeva reguliranja, posebno one s godišnjim reguliranjem protoka, postaju jedini i nezamjenljivi upravljački odgovor na pogoršanje ionako veoma nepovoljne neravnomjernosti proticaja unutar godine. Pored presudno značajne uloge za povećanje pouzdanosti isporuke vode korisnicima voda, hidroakumulacije će imati sve važnije još dvije funkcije: (a) ublažavanje poplavnih valova, kao sve neophodniji vid aktivne obrane od poplava, (b) povećavanje proticaja u periodima malih voda (Dašić, T 2021).

2. DEFINIRANJE PROBLEMA OPTIMIZACIJE UPRAVLJANJA SUSTAVOM HIDROAKUMULACIJE

Nekoliko desetljeća intenzivnog istraživanja o primjeni modela optimizacije za sustave hidroakumulacije pokazuju kontinuirani jaz između teorijskog razvoja i implementacije u stvarnom svijetu (W. Labadie, J. 2004).

Mogući razlozi za ovu različitost uključuju sljedeće:

- Mnogi operatori sustava hidroakumulacija skeptični su prema implementaciji novih modela upravljanja i zamjeni postojećih, što podrazumijeva nova strategijska rješenja, već se oslanjaju na korištenje postojećih simulacijskih modela;
- Računalna, hardverska i softverska ograničenja u prošlosti su zahtijevala pojednostavljenja i aproksimacije koje operatori nisu htjeli prihvatiti;
- Optimizacijski modeli su općenito matematički složeniji od simulacijskih modela, stoga ih je i teže shvatiti;
- Neke metode optimizacije, kao što je dinamičko programiranje, često zahtijevaju prilagođene programe razvoja (W. Labadie, J. 2004).

Upravljanje hidroakumulacijama je kompleksno i često nudi znatan porast u dobitima za relativno mala poboljšanja u učinkovitosti upravljanja. Shodno tome, procjena poboljšanja i modifikacija upravljanja postojećih hidroakumulacijskih sustava dobiva sve veći značaj (Gereš, D. 2003).

3. MATEMATIČKO PROGRAMIRANJE ZA UPRAVLJANJE SUSTAVIMA VIŠENAMJENSKIH HIDROAKUMULACIJA

Optimiziranje raznih vrsta benefita od sustava vodnih resursa je klasični i stalni problem. Rješenje problema je sve kompleksnije uslijed velikog broja uključenih varijabli u proračun, nelinearnosti dinamičkih sustava, stohastičke prirode budućih doticaja i drugih nesigurnosti sustava. Ipak, razvijene su brojne tehnike matematičkog programiranja kako bi se pomoglo derivaciji optimalnih radnih strategija upravljanja

sustavima vodnih resursa (Opricović, S. 1998). Pri tome je potrebno razmotriti sve raspoložive opcije, pažljivo se predviđaju rezultati i procjenjuje rizik, uz upotrebu najpogodnijih metoda optimizacije i tehnika za odlučivanje, koje obuhvaćaju *linearne* i *nelinearne* metode.

4. OPTIMIZACIJSKE TEHNIKE MATEMATIČKOG PROGRAMIRANJA

U praksi, operatori sustava hidroakumulacije obično slijede kontrolne krivulje upravljanja koje propisuju mjere koje treba poduzeti uvjetovane trenutnim stanjem sustava, a koje će kasnije biti prezentirane i za hidroakumulaciju Modrac.

Analitičke metode optimalnih upravljanja višenamjenskim hidroakumulacijama, mogu se podijeliti na *determinističku* i *stohastičku* optimizaciju upravljanja. Većina optimizacijskih modela temelji se na nekoj vrsti tehnika matematičkog programiranja. Modeli za analizu sustava hidroakumulacije mogu se kategorizirati na sljedeći način (US Army Corps of Engineers 1991): opisni, deskriptivni simulacijski modeli, konvencionalni simulacijski modeli, simulacijski modeli koji koriste mrežne programske algoritme, teorijski modeli stohastičkog volumena, preskriptivni optimizacijski modeli, linearno programiranje (LP), dinamičko programiranje (DP), nelinearno programiranje i različite ostale kombinacije optimizacija i simulacijskih modela.

5. METODE DINAMIČKOG PROGRAMIRANJA

Dinamičko programiranje (DP) je način rješavanja problema tako da se početni problem rastavi na više jednostavnijih subproblema te se rješenja svakog subproblema koriste kako bi se dobilo rješenje početnog problema. Takvi modeli razvijeni za rješavanje problema upravljanja hidroakumulacijama mogu se klasificirati na osnovu načina kako karakteriziraju proces doticaja u hidroakumulaciju. Jedna grupa modela, deterministički modeli, koriste specifičnu sekvencu doticaja, dok druga grupa modela predstavlja modele stohastičke prirode, a sve za određivanje operativnih pravila upravljanja. Stoga se metode dinamičkog programiranja mogu podijeliti na (Guo, S. i dr. 2011):

I. Determinističko dinamičko programiranje

- diskretno dinamičko programiranje (DDP);
- diskretno diferencijalno dinamičko programiranje (DDDP);
- ograničeno diferencijalno dinamičko programiranje (CDDP);
- inkrementalno dinamičko programiranje (IDP).

II. Stohastičko dinamičko programiranje (SDP)

Proširenje dinamičkog programiranja predstavlja stohastičko dinamičko programiranje (SDP). Ova metoda uzima u obzir hidrološke uvjete stohastičke prirode.

Stohastička priroda doticaja u hidroakumulaciju može se pretpostaviti s dva pristupa: implicitno (generiranje broja sekvenci sintetičkog doticaja) i eksplicitno (razmatra raspodjelu vjerojatnosti doticaja).

6. PRIMJERI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

6.1. Povećanje učinkovitosti upravljanja akumulacijama u periodu obrane od poplava - na primjeru Hidroenergetskog sustava na Trebišnjici

Ovim primjerom je prezentirano poboljšanje svih vidova efektivnosti sustava i mogućnosti operativnog upravljanja tim sustavom u periodu velikih voda (Đorđević, B. i dr. 2012).

Sušтина zadatka postupne upravljačke kibernetizacije sustava najbolje se uočava na kibernetskoj shemi vodoprivrednog sustava, [slika 1](#) (Đorđević, B. i dr. 2012).

Upravljački model "Ublažavanje poplavnog vala" je formiran kao vrlo operativan *simulacijski model*.

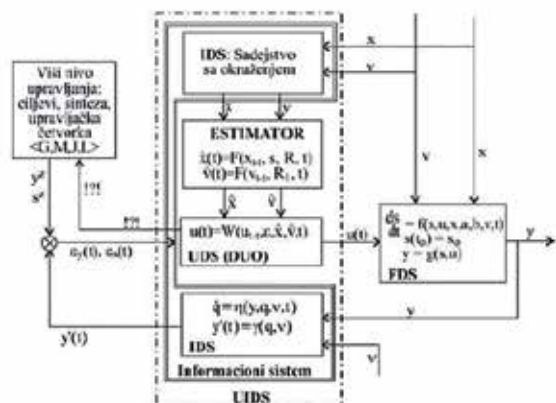
Model se zasniva na rješavanju bilančnih jednadžbi - najprije za uzvodnu hidroakumulaciju Bileća, a zatim za nizvodnu hidroakumulaciju (kompenzacijski bazen) Trebinje, u skladu sa shemom koja je prikazana na [slici 2](#).

Ovim modelom jasno je definiran pojas optimalnih stanja hidroakumulacije unutar kojeg treba održavati trajektoriju stanja tokom eksploatacije u realnom vremenu. Taj dijagram, prikazan na [slici 3](#) omogućuje dugoročno upravljanje sustavom po kriteriju maksimalizacije proizvodnje.

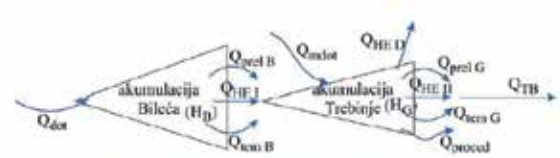
6.2. Optimalna operacija velike hidroakumulacije hidroelektranom s prirodnim proticajima

U ovom primjeru, eksplicitna optimizacija je izvedena sa SDP (engl. *Stochastic Dynamic Programming*) tipom modela za veliku hidroakumulaciju Dokan, u Iraku.

Diskretno dinamičko programiranje (DDP) predstavlja odgovarajući postupak optimizacije za

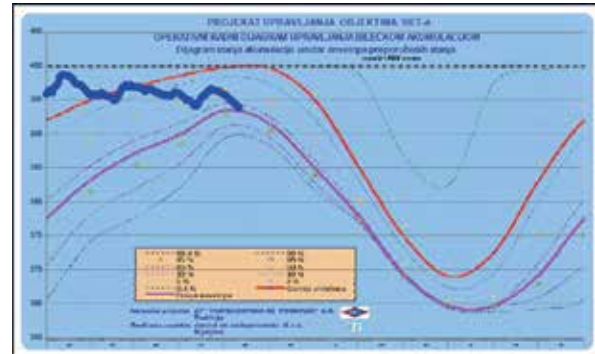


Slika 1: Opća kibernetička shema složenog vodoprivrednog sustava (Đorđević, B. i dr. 2012)

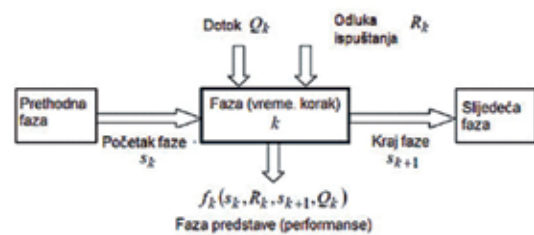


Slika 4: Šematski prikaz modeliranog sustava "Trebinje"

Slika 2: Šematski prikaz modeliranog sustava Trebinje (Đorđević, B. i dr. 2012)



Slika 3: Operativni dijagram za godišnje upravljanje Bilećkom hidroakumulacijom (Đorđević, B. i dr. 2012)



Slika 4: Ilustracija rada sustava hidroakumulacije kao sekvencijalni proces odlučivanja (Ahmad-Rashid, K. i dr. 2007)

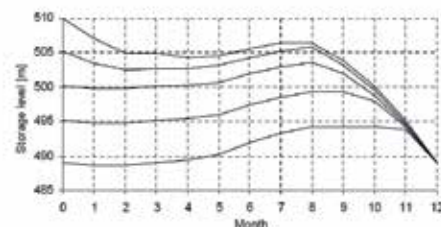


Fig. 2: Several optimal storage guidances for Dekan reservoir in stochastic conditions.

Slika 5: Nekoliko optimalnih krivulja upravljanja za Dekan hidroakumulaciju u stohastičkim uvjetima (Ahmad-Rashid, K. i dr. 2007)

rješavanje problema, kao što je optimizacija sustava hidroakumulacije. [Slika 4](#) predstavlja prijelaz s tipičnog stanja na višestupanjske probleme.

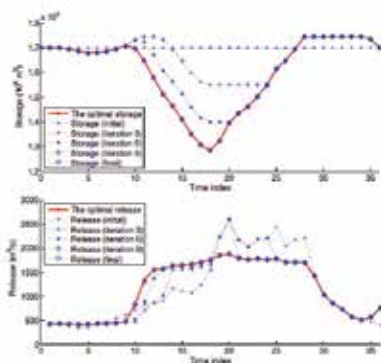
Ciljna funkcija modela je:

gdje predstavlja godišnju "neto" proizvodnju hidroenergije, koja mora biti maksimalna u stohastičkim uvjetima.

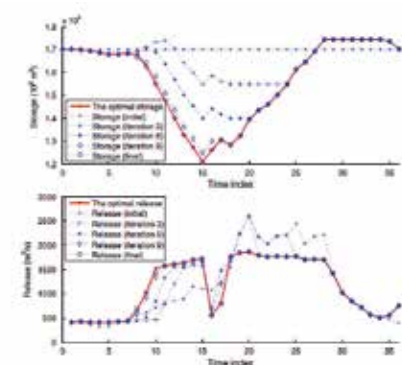
Bilanca mase hidroakumulacije računa se kao:

gdje je mjesečna količina ispuštanja iz hidroakumulacije.

Operativna ograničenja zavise od kapaciteta volumena i količine ispuštanja vode. [Slika 5](#) predstavlja krivulje upravljanja za različite razine na početku hidrološke godine (mjesec siječanj).



Slika 6: Konvergencija odluka volumena i ispuštanja za Slučaj 1 (optimalne odluke su određene DP-om i iterativnim odlukama generirane SIDP-om) (Zhao, T. i dr. 2014)



Slika 7: Konvergencija odluka volumena i ispuštanja za Slučaj 2 (optimalne odluke su određene DP-om i iterativnim odlukama generirane SIDP-om) (Zhao, T. i dr. 2014)

Ovakve kontrolne krivulje vrlo su korisne za pomoć donositelju odluka za što bolje upravljanje sustavom hidroakumulacije.

6.3. Poboljšano dinamičko programiranje za upravljanje hidroakumulacijom hidroelektranom

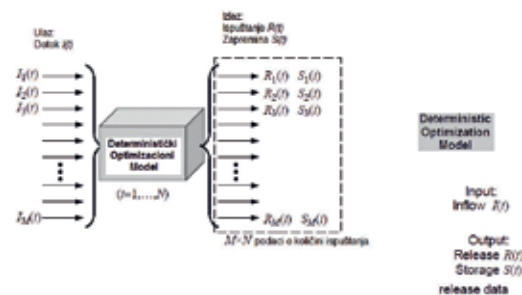
Ovim primjerom prikazano je maksimiziranje ukupnog prihoda od proizvodnje hidroenergije hidroakumulacije Danjiangkou.

Optimizacijski model planiranja hidroenergije je: u skladu s ograničenjima:

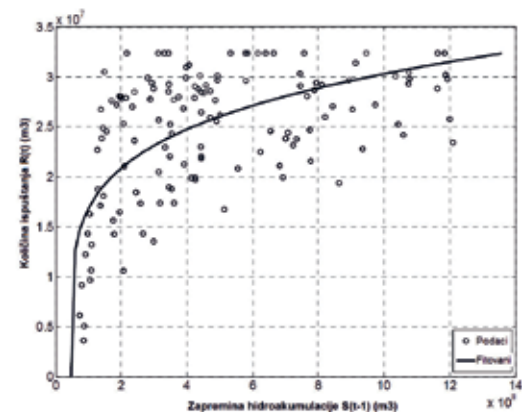
gdje su = garantirana snaga; = maksimalna snaga; = minimalni volumen; = maksimalni volumen; = dužina razmatranog perioda.

Cilj funkcije (3) jest maksimiziranje ukupnog prihoda od proizvodnje hidroenergije. Ograničenja uključuju odnos konverzije energije, vodna bilanca, kapacitet proizvodnje hidroenergije, kapacitet volumena, kapacitet količine ispuštanja te početni i krajnji volumen.

Analiza operacije proizvodnje hidroenergije može se ilustrirati prema sljedećim karakteristikama: (1) za jedinični period proizvodnje hidroenergije, volumen hidroakumulacije i količina ispuštanja predstavljaju parametre koji se smanjuju; (2) za proizvodnju hidroenergije za vremenski period koji je veći od jednog



Slika 8: Implicitna stohastička optimizacija (B. Celeste i dr. 2009)



Slika 9: Krivulja upravljanja za mjesec listopad (B. Celeste i dr. 2009)

desetljeća, a gdje je glavni čimbenik onaj koji utječe na konkavnost ciljne funkcije i monotoničnosti operativnih odluka.

SIDP algoritam je demonstriran za dugoročno planiranje jednonamjenske hidroakumulacije s ciljem maksimiziranja prihoda od proizvodnje hidroenergije.

6.4. Implicitna stohastička optimizacija za izvođenje operativnih pravila hidroakumulacije u polusušnom području u Brazilu

Ovim primjerom je prikazana primjena implicitne stohastičke optimizacije (engl. *Implicit Stochastic Optimization (ISO)*) - metoda kojom su određena mjesečna operativna pravila za hidroakumulacijski sustav (hidroakumulacija Coremas i hidroakumulacija Mãe d'Água) u polusušnom području (u kojima je potencijalna evapotranspiracija veća od količine oborina) u sjevernom Brazilu.

Za određivanje mjesečnih krivulja upravljanja, ISO procedura slijedi osnovna tri (3) koraka, i to:

1. Generiranje M-sintetičkih i N-mjesečnih sekvenci doticaja;
2. Za svaku realizaciju doticaja pronalaženje optimalnog ispuštanja za sve N mjeseci;
3. Koristeći cjelinu optimalnih ispuštanja ($M \times N$ podaci) za razvijanje mjesečnih operativnih pravila.

Za predmetni deterministički optimizacijski model ciljna funkcija je:

gdje predstavlja mjesec, gdje je ukupan broj mjeseci, gdje su količina ispuštanja i potrebe za vodom u mjesecu, respektivno.

Na sljedećoj slici prikazana je generirana krivulja upravljanja za sušni mjesec listopad.

U ovom primjeru, izvedeno je nekoliko operativnih pravila za sustav koji pokazuje kako je moguće producirati politike upravljanja mjerljive s onima koje su određene determinističkom optimizacijom korištenjem prognoziranih doticaja.

7. OPĆENITO O SUSTAVU HIDROAKUMULACIJE MODRAC

7. 1. Opis sustava hidroakumulacije Modrac

Sustav predstavlja brana i hidroakumulacija Modrac s pripadajućim slivom. Brana sa svojim ispustima i prelivima predstavlja elemenat sustava koja preko količine ispuštanja kroz ispuste ili preliv direktno djeluje na hidroakumulaciju, odnosno njen volumen i razinu.

Sljedeći element sustava je sliv hidroakumulacije i padaline koje se dešavaju unutar sliva. Ovaj element sustava utječe na sustav, ali sustav nema utjecaja na njega.

7.2. Osnovne karakteristike brane Modrac

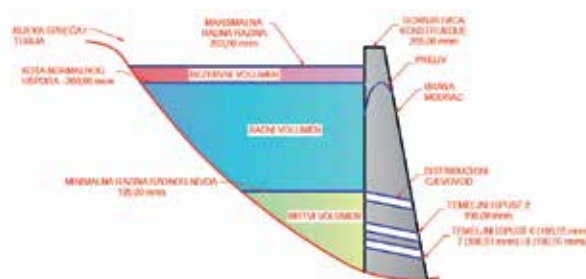
Hidroakumulacija Modrac formirana je 1964. godine izgradnjom brane na rijeci Spreči, u tjesnacu Modrac. Prema Zakonu o zaštiti akumulacije Modrac (Službene novine Tuzlanskog kantona, broj: 5/06), namjene hidroakumulacije Modrac, po redoslijedu prioriteta, su osiguranje vode za potrebe stanovništva, osiguranje vode za potrebe industrije, zaštita od poplava nizvodno od brane, osiguranje hidrobiološkog minimuma za rijeku Spreču, nizvodno od hidroakumulacije, razvoj turizma, rekreacije i sportova na vodi, te proizvodnja hidroenergije na MHE, korištenjem viška voda u hidroakumulaciji Modrac.

Brana Modrac je višelučna armirano-betonska, s 11 kontrafora, sa sljedećim osnovnim karakteristikama:

- projektirana kota maksimalnog uspora 203,00 m.n.m;
- kota prelivnih polja brane – kota normalnog uspora 200,00 m.n.m;
- kota minimalne radne razine 194,00 m.n.m;



Slika 10: Slivno područje hidroakumulacije Modrac (Kovčić, O. 2017)



Slika 11: Zone volumena hidroakumulacije Modrac (Kovčić, O. 2017)

- četiri temeljna ispusta (broj: 2, 6, 7 i 8) u kontraforima (2, 6, 7 i 8), ukupnog kapaciteta oko 80,00 m³/s
- tri prelivna polja sa ski-skokom, bez ustava (Kupusović, T. i dr. 2015).

Od 1999. godine, na temeljnom ispustu broj 2 izvedena je MHE Modrac približno instalirane snage 2,0 MW (točnije, pri čemu je ukupni evakuacijski kapacitet preostalih temeljnih ispusta i MHE-a ostao približno isti, 80,0 m³/s).

Gore navedene kote bitne su jer je njima definiran korisni volumen vode u hidroakumulaciji preko minimalne i maksimalne radne razine, zatim kota iznad koje dolazi do prelijevanja vode u slučajevima kada se vodni val pojavi u trenutku skoro pune ili pune hidroakumulacije (Kovčić, O. 2017).

8. DINAMIČKI MATEMATIČKI MODEL UPRAVLJANJA HIDROAKUMULACIJOM MODRAC

8. 1. Uvodna razmatranja

Za izradu dinamičkog matematičkog modela upravljanja hidroakumulacijom Modrac, korišten je softverski paket Matlab R 2015 a.

Urađen je dinamički matematički model za postojeće stanje (s trenutnim količinama – isporukama potrošačima i količinom hidroenergetskog iskorištenja).

Dinamički matematički model rada sustava hidroakumulacije Modrac sastoji se od tri (3) komponente (Kovčić, O. 2017): *ciljna funkcija*: može predstavljati maksimiziranje hidroenergetskog iskorištenja, prihoda od vodosnabdijevanja i benefita od navodnjavanja te minimiziranja troškova (npr. šteta od poplava ili cijena izgradnje hidroenergetskog sustava); *varijable odlučivanja*: može biti količina ispuštanja u svakom razdoblju, ili prenošenje volumena iz prethodnih perioda do subsekventnih (sljedećih) perioda. Vrijednosti varijabli odlučivanja predstavljaju parametre koji određuju ciljnu funkciju; *ograničenja*: tipična ograničenja u radu sustava hidroakumulacije uključuje odnos vodne bilance, kapacitet sustava hidroakumulacije, kapacitet ispuštanja sustava hidroakumulacije (kapacitet temeljnih ispusta i prelijeva), količina ispuštanja, početni volumen, krajnji volumen itd.

8.2. Ulazni parametri za model dinamičkog programiranja (DP model) upravljanja hidroakumulacijom Modrac

Ulazni parametri za izradu modela dinamičkog programiranja upravljanja hidroakumulacijom Modrac, kako za postojeće stanje tako i za planirano stanje su sljedeći:

- pri izradi modela hidroakumulacije Modrac, zbog obimnosti svih podataka koji su korišteni, uzet je vremenski period $t = 10$ dana (jedna dekada), tako da je jedna kalendarska godina podijeljena na trideset i šest (36) dekada;
- visinske radne kote na brani Modrac (kota maksimalne radne razine, kota preljevnih polja, kota kontrafora, kota mosta iznad kontrafora, kota normalne radne razine, kota minimalne radne razine);
- objekti na brani Modrac (temeljni ispusti i preljevni organi);
- krivulja volumena hidroakumulacije Modrac;
- sekvence doticaja u hidroakumulaciju Modrac;
- karakteristike rada postojeće mini hidroelektrane MHE Modrac 1;
- količina vode za snabdijevanja industrije i stanovništva vodom - postojeće stanje;
- ekološki prihvatljiv proticaj EPP rijeke Spreče na profilu brane Modrac;
- sušni period je tretiran od mjeseca svibnja do mjeseca listopada;
- vlažni period godine je tretiran od mjeseca listopada do mjeseca svibnja (Kovčić, O. 2017).

8.3. Sekvence doticaja u hidroakumulaciju Modrac

Na osnovu promjene volumena i razine vode u hidroakumulaciji i isticanja kroz temeljne ispuste na brani, određen je prirodni proticaj ili doticaj u hidroakumulaciju.

Ova interakcija elemenata sustava iskorištena je za utvrđivanje proticaja (doticaja).

Za proračun doticaja na raspolaganju je bio 17-godišnji niz promatranja razine vode na profilu brane Modrac (2005. - 2021. godine). Na osnovu tih promatranja i na osnovu analize promjene dinamike volumena te ispuštanja i zahvaćanja, određene su vrijednosti srednjih dekadnih doticaja u hidroakumulaciju.

Ukupan broj srednjih dekadnih doticaja u akumulaciju za razmatrani 17-godišnji niz iznosi 612.

Sračunate dekadne sekvence doticaja u hidroakumulaciju Modrac, predstavljaju jedan od vitalnih ulaznih podataka za izradu modela dinamičkog programiranja upravljanja hidroakumulacijom Modrac (Kovčić, O. 2017).

8.4. Opis modela

Urađen je optimizacijski dinamičko-matematički

model za postojeće stanje gdje je analiziran sustav hidroakumulacije postojećom mini hidroelektranom MHE Modrac 1.

Dobiveni rezultati urađenih matematičkih modela predstavljaju sliku optimizacije sustava hidroakumulacije Modrac, gdje je izvršeno znatno poboljšanje rada sustava hidroakumulacije Modrac, odnosno "ponašanja sustava" hidroakumulacije Modrac.

Optimizirane razine hidroakumulacije Modrac tj. razine vode na profilu brane Modrac ne prelaze kotu preljeva brane (200,00 m.n.m) zbog 10-dnevnog osrednjavanja za srednje dekadne doticaje u hidroakumulaciju, što s aspekta kontrole poplava predstavlja vrlo važnu činjenicu za buduće upravljanje sustavom.

8.4.1. Sekvencijski proces upravljanja hidroakumulacijom Modrac

Dugoročno odlučivanje

Modeliranje za vremenski period od jedne godine podijeljeno je na $T = 36$ dekadnih perioda.

U optimizacijskom modelu ciljna funkcija maksimiziranja predstavlja sumu pojedinačnog perioda.

U modeliranju sustava hidroakumulacije Modrac, ciljna funkcija maksimiziranja hidroenergetskog iskorištenja izabrana je kao operativni cilj kako slijedi:

U jednadžbi (6) i respektivno predstavljaju volumen hidroakumulacije na početku perioda i na kraju perioda (početak perioda); dok predstavlja količina ispuštanja iz hidroakumulacije tokom perioda.

Jedinični period proizvodnje hidroenergije u periodu je prikazan kako slijedi:

gdje su – količina ispuštanja iz hidroakumulacije, m^3/s , – količina doticaja u hidroakumulaciju, m^3/s , – količina vode u hidroakumulaciji, m^3/s , – koeficijent efikasnosti proizvodnje hidroenergije, SDR – odnos razina vode – volumen hidroakumulacije, SSR – odnos razina vode – volumen hidroakumulacije, $dh = LOSS(rt)$ – gubitak hidraulične visine h (gubitak u dovodu i turbini i zavisi od količine ispuštanja).

Desna strana jednadžbe (7) je proizvod sljedeće tri (3) komponente:

1. koeficijent efikasnosti proizvodnje hidroenergije je funkcija količine ispuštanja i određena je iz linearne interpolacije i ekstrapolacije funkcije karakteristike rada turbine;

2. prosječna hidraulična visina perioda t je, gdje je srednja uzvodna razina vode, gdje predstavlja inverzni odnos razine vode u hidroakumulaciji i volumena hidroakumulacije minus nizvodna razina vode (ova vrijednost je tretirana kao deterministička vrijednost limitirana podacima. U generalnom slučaju, predstavlja inverzni odnos razine vode u hidroakumulaciji i količina ispuštanja, minus gubitak hidraulične visine (gubitak u dovodu i turbini i zavisi od količine ispuštanja);

3. količina ispuštanja iz hidroakumulacije tokom perioda.

Ograničenja su kako slijede:

- Vodna bilanca

Treba imati na umu da je volumen hidroakumulacije uobičajeno izražena u m^3 . U međuvremenu, količine ispuštanja i dotoci () su izraženi u m^3/s . Prema tome, u jednadžbi (8) predstavlja dužinu perioda (npr. 10-dnevni period sadrži $10 \times 24 \times 3600$ sekundi) koja konvertira količinu ispuštanja (proticaj) u volumen.

- Kapacitet volumena

U kojoj i respektivno predstavljaju donju i gornju granicu volumena hidroakumulacije Modrac. Mogu biti određene iz karakteristika hidroakumulacije Modrac, odnosno iz razine vode u hidroakumulaciji koristeći odnos razina – volumen SSR (odnos između razine vode i volumena u hidroakumulaciji).

Karakteristike razine vode u hidroakumulaciji obično su fiksirane za sustav hidroakumulacije. Da bi se odredio volumen iz razine voda u hidroakumulaciji, volumen mora biti fleksibilan i adaptivan prema modelu hidroakumulacije promjenom vrijednosti SSR-a (npr. uslijed povećanja količine nanosa).

- Donja granica količine ispuštanja iz hidroakumulacije

gdje predstavlja donju granicu količine ispuštanja iz hidroakumulacije u periodu t .

Dvostupanjska optimizacija

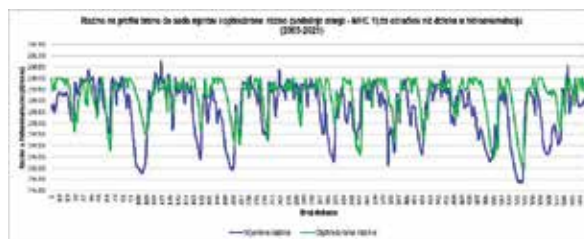
Dvostupanjski proces odlučivanja rada hidroakumulacije Modrac riješen je dinamičkim programiranjem (DP) u okviru dvostupanjske optimizacije.

U nastavku su prikazane jednadžbe koje su korištene pri izradi dinamičkog modela:

Kao što je prikazano u jednadžbi (13), DP pokreće unatrag rekurzivni proračun od perioda T do perioda 1. Maksimalna kumulativna proizvodnja hidroenergije od perioda T do perioda t određena je na osnovu proizvodnje hidroenergije u periodu t i maksimalne kumulativne proizvodnje hidroenergije od perioda T do perioda $t+1$.

Dvostupanjska optimizacija je riješena numerički (ne postoji generalno analitičko rješenje), na sljedeći način:

- ograničenje kapaciteta volumena hidroakumulacije (jednadžba 13) je inkorporirano u diskretizaciju volumena hidroakumulacije;
- i vrijednosti su diskretizirane u višestruka (npr. N) ekvidistantna stanja;
- u praktičnom, minimalna i maksimalna diskretizacijska stanja volumena hidroakumulacije su i , respektivno.
- Kako se svako diskretizirano stanje, N stanja "dodatni" volumeni (engl. *carryover storage*) su tražena:
- N tranzicije od do generira N vrijednosti proizvodnje hidroenergije;
- u međuvremenu, tranzicije od do određuje (razmatrajući odnos vodne bilance, jednadžba 8). Vrijednost se provjerava protiv donje granice (zadržavajući granicu ispuštanja, jednadžba 12):
- Ako je ograničenje zadovoljeno, odgovarajuća proizvodnja hidroenergije je zadržana.



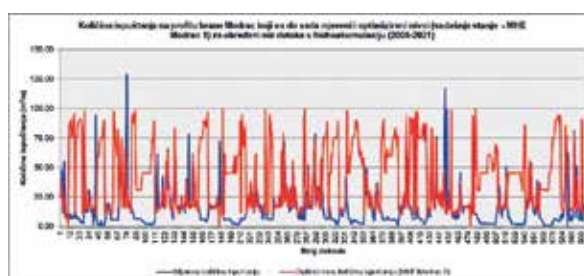
Slika 12: Grafički prikaz mjerenih i optimiziranih razina za postojeće elemente sustava (MHE Modrac 1) za sračunate srednje dekadne vrijednosti doticaja u hidroakumulaciju Modrac za period od 2005. do 2021. godine

S rekurzivnim formulacijama, jednadžba (13), od perioda T do perioda 1 dobiva se maksimalna proizvodnja hidroenergije i izvodi optimalno odlučivanje količine ispuštanja iz hidroakumulacije i "dodatni" volumen.

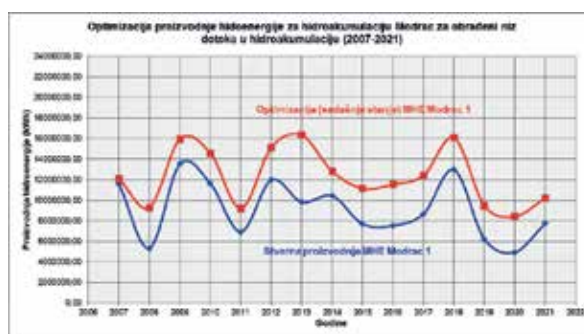
8.5. Ilustracija rezultata

Na slici 12 prikazana je usporedba ukupne količine ispuštanja koja je registrirana na profilu brane Modrac i optimiziranih količina ispuštanja za formirane matematičke modele, tj. dinamički matematički model za postojeće elemente sustava (mini hidroelektrana MHE Modrac 1) za sračunate srednje dekadne vrijednosti doticaja u hidroakumulaciju Modrac za period od 2005. do 2021. godine.

Osim toga, prikazana je usporedba proizvodnje hidroenergije, odnosno stvarne proizvodnje, optimizacije rada hidroakumulacije za postojeće elemente sustava (MHE Modrac 1), što i predstavlja osnovu i cilj ovog rada da se optimizira stanje upravljanja sustavom hidroakumulacije Modrac, i to za sračunate srednje dekadne vrijednosti doticaja u hidroakumulaciju Modrac za period od 2005. do 2021. godine (slika 13).



Slika 13: Grafički prikaz mjerenih i optimiziranih količina ispuštanja za postojeće elemente sustava (MHE Modrac 1) za period od 2005. do 2021. godine



Slika 14: Grafički prikaz optimizacije proizvodnje hidroenergije za hidroakumulaciju Modrac za period od 2005. do 2021. godine



Slika 15: Grafički prikaz operativnog dijagrama za godišnje upravljanje hidroakumulacijom Modrac za period od 2005. do 2021. godine [11]

Promatrajući sliku 14 proizvodnja hidroenergije za sračunate srednje dekadne vrijednosti doticaja u hidroakumulaciju Modrac za period od 2005. do 2021. godine procentualno bi bila veća za 26,80 % razmatrajući stvarno stanje sustava (proizvodnja hidroenergije od početka instaliranja mini hidroelektrane MHE Modrac 1) i optimizirano postojeće stanje sustava hidroakumulacije Modrac.

Na slici 15 prikazan je operativni dijagram za godišnje upravljanje hidroakumulacijom Modrac za sračunate srednje dekadne vrijednosti doticaja u hidroakumulaciju Modrac za period od 2005. do 2021. godine. Taj dijagram, omogućava da se dugoročno upravlja sustavom po kriteriju maksimalizacije proizvodnje.

Sva analiza je bazirana na proračunu i analizi srednje dnevnih dekadnih vrijednosti doticaja u hidroakumulaciju Modrac, nakon čega je izvršena optimizacija sustava za postojeće elemente sustava (MHE Modrac 1).

9. ZAKLJUČAK

U današnje je vrijeme upravljanje sustavima hidroakumulacija sve složenije, jer se temelji na velikom broju podataka, velikom broju opcija za djelovanje, a vrijeme u kojem se odluka mora donijeti sve je kraće. Potrebno je djelovati učinkovito, a to znači na osnovu raspoloživih podataka u kratkom roku predložiti dobro rješenje problema i donijeti optimalnu odluku. Uz metode optimizacije koje se koriste za nalaženje optimalnih rješenja problema složenih sustava, kao i uz modernu računalnu programsku potporu, to djelovanje je kvalitetnije.

Organizacija sustava mora se zasnivati na primjeni najsuvremenijih metoda, koje omogućuju stalnu, iterativnu i interaktivnu optimizaciju i procjenu na svim razinama upravljanja.

Povećanjem složenosti vodoprivrednih sustava bit će sve neophodnija primjena sustava za podršku odlučivanju, kako u fazi planiranja eventualno novih elemenata sustava tako i u fazi njihove eksploatacije.

Rezultati urađenih matematičkih modela predstavljaju sliku optimizacije sustava hidroakumulacije Modrac, gdje je prikazano kako je moguće poboljšati rad upravljanja sustavom hidroakumulacije Modrac, najviše s aspekta proizvodnje hidroenergije.

Optimizirane razine hidroakumulacije Modrac, tj.

razine vode na profilu brane Modrac ne prelaze kotu preljeva brane (200,00 m.n.m) zbog 10-dnevnog osrednjavanja za srednje dekadne doticaje u hidroakumulaciju, što s aspekta kontrole poplava predstavlja vrlo važnu činjenicu za buduće upravljanje sustavom.

Slika 15 predstavlja operativni dijagram za godišnje upravljanje hidroakumulacijom Modrac za sračunate srednje dekadne vrijednosti doticaja u hidroakumulaciju Modrac za period od 2005. do 2021. godine. Taj dijagram omogućuje dugoročno upravljanje sustavom po kriteriju maksimalizacije proizvodnje hidroenergije.

Može se istaknuti kako je analizirani diskretni model dinamičkog programiranja upravljanja sustavom hidroakumulacije Modrac procentualno za cca 26,80 %, učinkovitiji i operativniji u odnosu na stvarni sustav hidroakumulacije Modrac.

Rezultati su pokazali da ovakav provedeni postupak može smanjiti vrhove ("peakove") poplava nizvodno, zadržati visoku razinu vode za povećanje proizvodnje hidroenergije u sezoni i u sljedećem suhom periodu. Također, dobiveni rezultati mogu se koristiti za formiranje kontrolnih krivulja koje će biti učinkovite za rad hidroakumulacije Modrac.

Postavljeni model za upravljanje alokacijom vode iz hidroakumulacije Modrac značajan je pri analizi mogućnosti realizacije proticaja i volumena, odnosno razine vode u hidroakumulaciji u okviru dužih vremenskih perioda primjenom izračunatih sekvenci doticaja za razmatrani vremenski period.

U poglavlju 6. prikazano je nekoliko urađenih dinamičkih matematičkih modela rada sustava hidroakumulacije koji su do sada napravljeni u svijetu i regiji, a gdje je osim maksimiziranja hidroenergije prezentirano i nekoliko drugih ciljnih funkcija kao što su minimiziranje rizika od poplava, maksimiziranje vjerojatnosti punjenja na kraju razmatranog perioda, maksimiziranje minimalnih doticaja i minimiziranje ukupnog volumena vode koja se ispušta kroz temeljne ispuste i preljeve (ukoliko razina vode dostigne kotu preljeva).

Nastavak istraživanja bi, također, mogao ići u smjeru izrade dinamičkog modela za sustav hidroakumulacije Modrac upotrebom tehnike stohastičkog dinamičkog programiranja (SDP), gdje bi se doticaj u hidroakumulaciju uzeo kao slučajna varijabla (model prepoznaje slučajnu prirodu ulaznih komponenti).

Sustav hidroakumulacije Modrac trebao bi se tako mjerno i informacijski osposobiti, kako bi se omogućila kvalitetna primjena vanjskih procjenitelja, kojima se ostvaruju najbolje upravljačke performanse sustava, kako u fazi planiranja parametara sustava tako i u fazi optimalnog operativnog upravljanja.

Donositelji odluka koji upravljaju hidroakumulacijom Modrac odlučit će o primjeni i implementaciji ovog modela upravljanja sustavom hidroakumulacije Modrac.



LITERATURA

Ahmad-Rashid, K.; Diacon Al. G; Popa, B. 2007. Optimal operation of large hydropower reservoir with unregulated inflows. *U.P.B. Sci. Bull. Series C*. Vol. 69. No. 2.

B. Celeste, A.; F. Curi, W. C.; Curi, R. 2009. Implicit Stochastic Optimization for deriving reservoir operating rules in semiarid Brazil. *Pesqui. Oper.* (online) Vol. 29. No.1: 223-234. ISSN 1678-5142.

Dašić, T.; Stanić, M.; Topalović, T.; Sudar, N.; Đorđević, B. 2021. Nastupilo je vreme kada se bez akumulacija ne mogu obezbediti uslovi za opstanak i razvoj. *Vodoprivreda*. 0350-0519, Vol. 53. No. 309-310: 25-43.

Đorđević, B.; Dašić, T.; Sudar, N. 2012. Povećanje efikasnosti upravljanja akumulacijama u periodu odbrane od poplava - na primjeru hidroenergetskog sustava na Trebišnjici. *Vodoprivreda*. 0350-0519 Vol. 44 255-257: 43-58.

Gereš, D. 2003. Upravljanje vodnim resursima na slivnom području. *Priručnik za hidrotehničke melioracije*. Vol. 3. No. 1: 133.

Guo, S.; Liu, P.; Chen, L.; Li, X. 2011. Deriving Optimal Refill Rules for Multi-Purpose Reservoir Operation. *Water Resource Management*. 25:431–448. DOI 10.1007/s11269-010-9707-8.

Kovčić, O. 2017. *Upravljanje hidroakumulacijama za*

višenamjensko korištenje, na primjeru jezera Modrac. Doktorska disertacija. Univerzitet u Tuzli. Rudarsko-geološko-građevinski fakultet.

Kupusović, T., Vučijak B., Kovčić O. 2015. Akumulacija Modrac i njeno funkcioniranje tijekom poplave u svibnju 2014. godine. *Hrvatske vode*. No. 91: 19-28.

Opricović, S. 1998. *Višekriterijumska optimizacija sistema u građevinarstvu*. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Beograd.

P. Simonović, S. 2009. *Managing Water Resources Methods and Tools for a Systems Approach*. UNESCO i Taylor & Francis. ISBN: 978-92-3-104078-8 UNESCO.

US Army Corps of Engineers 1991. *A Review of Modeling and Analysis Approaches*, Hydrologic Engineer Center Optimization of Multiple – Purpose Reservoir System Operation.

W. Labadie, J. 2004. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*. 10.1061/~ASCE073394962004 130:2~93.

Zhao, T.; Zhao, J.; Yang, D. 2014. Improved Dynamic Programming for Hydropower Reservoir Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Ožujak, 2014. DOI:10.1061/(ASCE)wr.1943-5452.0000343.

OPTIMIERUNG DES STAUSEESYSTEMS MODRAC

ZUSAMMENFASSUNG: Die Regulierung des Wasserhaushalts von Stauseen ist eine Herausforderung, namentlich von Stauseen mit reduziertem Volumen, wie das bei dem Stausee Modrac der Fall ist. Die ineffiziente Verwaltung und Nutzung des Stausees Modrac führt zu einer unzureichenden Nutzung der Wasserressourcen. Um die Leistung des Systems zu verbessern, ist es also notwendig, das System zu optimieren, d.h. ein mathematisches Optimierungsmodell zu erstellen. Im Beitrag wird das dynamische mathematische Modell des Stauseesystems Modrac dargestellt, einschließlich aller Schritte zur Systemoptimierung für eine effizientere Verwaltung des Stausees. Es werden auch mehrere dynamische mathematische Modelle der Funktionsweise von Stauseesystemen vorgestellt, die bisher in der Welt und der Region erstellt wurden.

Es kann betont werden, dass das analysierte diskrete Modell der dynamischen Programmierung der Verwaltung des Stauseesystems Modrac um etwa 26,80 % effizienter und betriebsbereiter im Vergleich zum realen Stauseesystem Modrac ist.

SCHLÜSSELWÖRTER: Mehrzweckstausee Modrac, Optimierung, mathematisches Modell, dynamisches Modell, Zielfunktion, Maximierung der Wasserkraft, effiziente Verwaltung, Betriebsdiagramm

OPTIMISATION OF THE MODRAC RESERVOIR SYSTEM

ABSTRACT: When considering the problem of reservoirs, it is observable that water regime regulation poses a challenge, particularly for reservoirs with reduced reservoir volume, as is the case with the reservoir Modrac. Inefficient management and utilization of the reservoir Modrac lead to under-utilization of water resources. It is, therefore, necessary to optimize the system, i.e. develop an optimising mathematical model in order to maximize its effects. The paper provides an overview of a dynamic mathematical model for the Modrac reservoir system, including all steps in the system optimisation to achieve its more efficient management. The paper also contains several dynamic mathematical models of the operation of reservoir systems that have been developed to date both in the world and in the region.

It can be emphasised that the analysed dynamic programming model of the Modrac reservoir system management is about 26.80% more efficient and operational compared to the actual Modrac reservoir system.

KEY WORDS: multi-purpose reservoir Modrac, optimisation, mathematical model, dynamic model, target function, hydropower maximisation, efficient management