



Mr. sc. Ranko Goić, dipl. ing.  
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje – Split  
Marko Lovrić, dipl. ing.  
HEP - Dispečerski centar Split

39-08

## MOGUĆNOSTI EFIKASNIJEG OPERATIVNOG PLANIRANJA RADA I VOĐENJA HIDROENERGETSKOG SUSTAVA RIJEKE CETINE

### SAŽETAK

Na slivu rijeke Cetine nalazi se pet hidroelektrana koje svojom instaliranom snagom ( 860 MW), te mogućom godišnjom proizvodnjom (prosječno 2500 GWh), osim značajnog ukupnog energetskeg doprinosa, čine i glavni oslonac rada elektroenergetskog sustava Hrvatske u pogledu dnevne i sezonske regulacije radne snage. U ovom radu dane su smjernice za daljnji razvoj cjelovitog modela planiranja i vođenja sliva koji bi, uz uvažavanje praktičnih ograničenja i nepouzdanosti određenih parametara, trebao omogućiti efikasnije korištenje postojećih resursa sliva unutar postojećeg modela dispečiranja EES-a Hrvatske, ali i šire. Također su prikazani i preliminarni rezultati jednog od mogućih optimizacijskih modela za kratkoročno planiranje rada hidroenergetskog sustava Cetine.

**Ključne riječi:** optimizacija, kratkoročno planiranje, sliv

## POSSIBILITIES OF THE MORE EFFICIENT OPERATIVE PLANNING AND CONTROL OF THE CETINA RIVER BASIN

### ABSTRACT

On the river of Cetina, there are five hydro power plants, with by their power (860 MW) and possible yearly production (2500 GWh on average), apart from being an important part of energy production, are also the most important part of Croatian power system in daily and seasonal regulation of power. This paper presents the guidelines for future development of the wholesale model for planning and control of Cetina river basin, with respect to practical restriction and unreliability of some parameters. The model should be able to insure a more efficient use of the existing resources of the Cetina river basin under the existing dispatching model of Croatian power system and wider. The preliminary results of the one of possible optimization model for a short-term planning of Cetina river basin, are also presented.

**Key words:** optimization, short-term planning, river basin

## 1. UVOD

Efikasnije i ekonomičnije korištenje postojećih elektroenergetskih objekata trebao bi biti jedan od glavnih zadataka svih subjekata elektroenergetskog sustava. Kad se radi o problemu efikasnosti i ekonomičnosti upotrebe proizvodnih objekata, veliki efekti mogu se postići unapređenjem procesa planiranja i vođenja istih, kako na nivou sustava kao cjeline, tako i na nivou određenih grupa objekata kao što su npr. slivovi sa više elektrana i bazena u nizu. Za sliv rijeke Cetine, koji je, prema godišnjoj proizvodnji energije, te raspoloživoj snazi i odgovarajućim regulacijskim mogućnostima na svim vremenskim razdobljima, daleko najznačajniji i tehno-ekonomski najbitniji sliv u Hrvatskoj, model planiranja još uvijek je na vrlo zastarjelom nivou. Pomake prema kvalitetnijem sustavu planiranja i vođenja sliva zasigurno će donijeti skori procesi restrukturiranja i otvaranja tržištu elektroenergetskog sektora, unutar kojega će biti jasno definirane cijene energije, snage, regulacije, rezerve itd, čime će se osigurati potrebni motiv za kontinuirano podizanje kvalitete i funkcionalnosti sustava planiranja i vođenja, sa ciljem povećanja profita.

U ovom radu biti će riječi o modelima za kratkoročno planiranje rada sliva Cetine, te mogućnosti njihove praktične implementacije s obzirom na postojeća tehnička ograničenja i nepouzdanost određenih parametara. Osim toga, modele kratkoročnog planiranja rada sliva Cetine potrebno je promatrati i sa šireg aspekta, tj. u kombinaciji sa ukupnim sustavom planiranja rada EES-a Hrvatske, budući da hidroelektrane na Cetini predstavljaju glavni oslonac u pokrivanju varijabilnog dijela dnevnog dijagrama potrošnje, te sekundarnoj i tercijarnoj regulaciji radne snage.

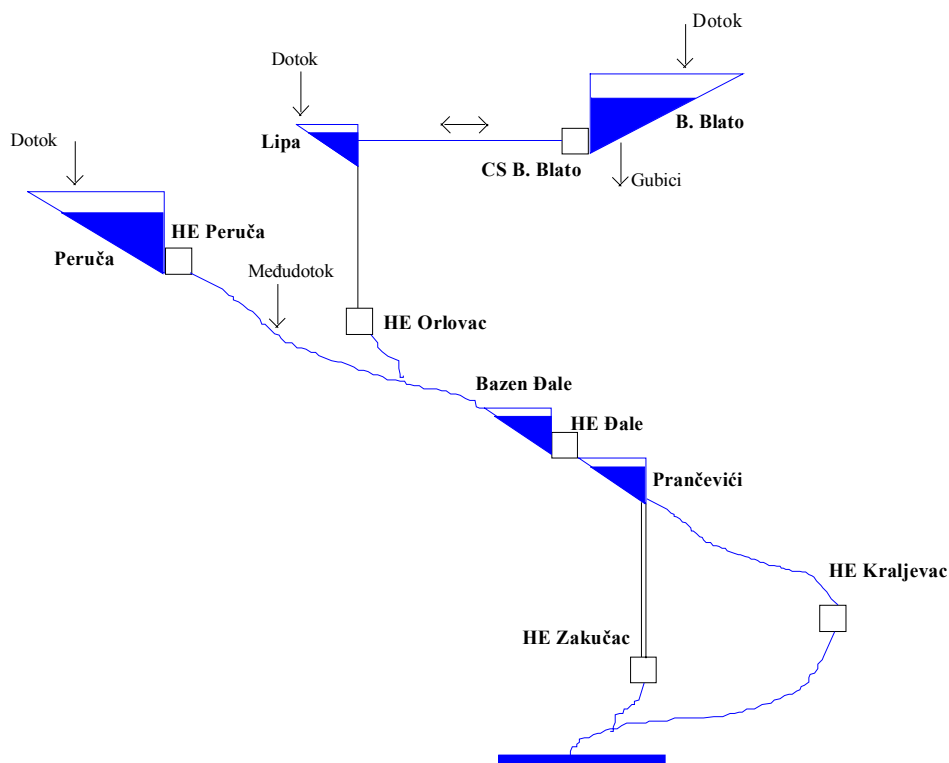
## 2. PRIKAZ SADAŠNJEG NAČINA PLANIRANJA RADA HE NA CETINI

Na Cetini je u pogonu 5 hidroelektrana koje koriste vodu iz dvije velike akumulacije (Peruča i Buško Blato), te 3 kompenzacijska bazena (Lipa, Đale i Prančevići). HE Peruča je pribranska hidroelektrana, a koristi vodu iz akumulacije Peruča, koja nakon prosječno 7 sati dođe do kompenzacijskog bazena Đale da bi se zatim iskoristila u HE Đale i HE Zakučac. HE Orlovac je derivacijska hidroelektrana koja vodu dobiva iz kompenzacijskog bazena Lipa, povezanog reverzibilnim kanalom s akumulacijom Buško Blato. Voda propuštena kroz HE Orlovac također završava, nakon prosječno 2 sata kašnjenja, u kompenzacijskom bazenu Đale. HE Đale je pribranska protočna hidroelektrana koja iskorištava vodu pristiglu iz HE Peruča, HE Orlovac, te međudotoka Cetine. Voda koju preradi HE Đale ispušta se u kompenzacijski bazen Prančevići. Iz Prančevića, u normalnoj situaciji, veći dio vode se ispušta u derivacijsku HE Zakučac, dok se jedan dio (oko  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ispušta dalje u Cetinu radi održavanja biološkog minimuma. Taj dio vode kasnije preradi HE Kraljevac s agregatom biološkog minimuma. U slučaju velikih dotoka, kad HE Zakučac ne može primiti svu vodu koja pristigne u Prančeviće, višak se ispušta prema HE Kraljevac.

Osnovni problemi koji se rješavaju prilikom kratkoročnog (dnevnog) planiranju rada sliva su:

- ⇒ Prognoza dotoka i međudotoka; najproblematičnija je prognoza međudotoka Cetine, s obzirom da dotoci u akumulacije Peruča i Buško Blato vrlo malo utječu na dnevni plan rada.
- ⇒ Raspodjela proizvodnje među elektranama po satima koja će zadovoljiti ukupne tražene potrebe, te osigurati normalan rad sliva, tj. održavanje kota kompenzacijskih bazena u željenim granicama.
- ⇒ Da bi udovoljio gornjem zahtijevu, dispečer mora prvo odrediti koliko vode treba ispustiti iz akumulacije Peruča i/ili Buško Blato da bi, zajedno s iskorištenjem vode iz međudotoka Cetine, uz uvažavanje vremenskog kašnjenja, elektrane imale dovoljnu količinu i prihvatljivu dinamiku dotoka vode u kompenzacijske bazene Đale i Prančeviće za traženu proizvodnju energije po satima.

Za izvršenje opisanog postupka mogu se koristiti razni simulacijski modeli kojima se može riješiti osnovni problem raspodjele snaga među elektranama po satima, uz kontrolu stanja svih bazena. Simulacijski model ne osigurava nikakvu optimizaciju, već samo uvid u stanje cijelog sustava. Opisani postupak može se obaviti i korištenjem nekog optimizacijskog modela koji će isto izvršiti raspodjelu snaga među elektranama po satima, ali uz optimiranje željene veličine (npr. zadovoljenje planiranog voznog reda uz minimalni potrošak vode iz akumulacija).



Slika 1: Sliv rijeke Cetine

Planiranje rada hidroelektrana na slivu rijeke Cetine provodi Nacionalni dispečerski centar (NDC) i Dispečerski centar Split. Na nivou NDC-a provodi se kompletan postupak godišnjeg planiranja rada sliva i to u sklopu godišnje elektroenergetske bilance koja se trenutno radi na osnovu 70%-tne vjerojatnosti dotoka, te daje okvirni plan rada elektrana po mjesecima i poželjna stanja akumulacijskih bazena. S obzirom na ostvarene dotoke i konkretna stanja u akumulacijama, te eventualne bitnije promjene prilika u EES-u, godišnji se plan revidira po potrebi, a prema odluci NDC-a. Na osnovu godišnjeg plana (eventualno revidiranog), predviđenih dotoka i konkretnog stanja EES-a, u NDC-u se pripremaju odgovarajući tjedni planovi rada sliva Cetine u sklopu tjednih planova rada cijelog sustava. Tjednim se planom rada određuje okvirna dinamika korištenja akumulacijskih bazena Peruča i Buško Blato odnosno ukupni energetske doprinosi pojedinih elektrana u slivu po danima.

Kratkoročno planiranje rada HE na Cetini, tj. izrada voznog reda, radi se svakodnevno u DC Split u koordinaciji sa NDC-om. Voznim redom definira se proizvodnja svake HE na slivu po satima na slijedeći način:

- dispečer – planer iz NDC-a postavlja zahtjev za ukupnom potrebnom energijom koju treba dobiti iz sliva Cetine za slijedeći dan, te potrebnu snagu po satima koju treba dobiti iz sliva s obzirom na potrebe sustava
- na osnovu takvog zahtjeva i raspoloživih dotoka i međudotoka, u DC Split se radi raspored snaga po elektranama u slivu; za takav raspored rada vrši se i hidrološka simulacija, tj. računaju se i dnevne promjene kota kompenzacijskih bazena, protoci, eventualni preljevi i sl.; ukoliko je tako isplanirani vozni red ostvariv u okviru mogućnosti sliva, rezultat se šalje u NDC, te se kao takav uklapa u ukupni vozni red EES-a Hrvatske; ako se iz bilo kojih razloga ne može udovoljiti traženom zahtjevu, DC Split traži od NDC-a korekciju globalnog plana u smislu smanjenja/povećanja ukupne snage u problematičnim satima

Za izvršenje opisanog procesa u DC-u Split koristi se nekoliko jednostavnih simulacijskih modela koji omogućavaju varijantno planiranje rada sliva, bez mogućnosti optimizacije u bilo kojem smislu. Jedini optimizacijski doprinos je u stvari velika mogućnost prilagođenja proizvodnje sliva Cetine na nivou EES-a Hrvatske kao cjeline, tj. osigurano je da HE sa Cetine daju veliki doprinos pokrivanju varijabilnog dijela dijagrama opterećenja na način da svoju ukupnu proizvodnju maksimalno prilagođavaju potrebama sustava.

### 3. MOGUĆNOSTI OPTIMIZACIJE RADA SLIVA CETINE

Optimizacija rada određenog sliva u okviru EES-a obično obuhvaća tri aspekta, s obzirom na vremenski period:

- ⇒ optimizacija na godišnjem nivou kojom se određuju poželjna stanja i dinamika korištenja akumulacijskih bazena
- ⇒ kratkoročna optimizacija (1-7 dana) kojom se definira plan proizvodnje svake elektrane na slivu po zadanom vremenskom intervalu na osnovu predviđenih dotoka i plana proizvodnje
- ⇒ optimizacija u realnom ili proširenom realnom vremenu kojom se osigurava upravljanje proizvodnjom elektrana na osnovu mjerenih dotoka, kota bazena i traženih promjena ukupne proizvodnje elektrana na slivu, a prema potrebama sustava

U daljnjem tekstu biti će riječi isključivo o mogućnostima i varijantama kratkoročne optimizacije i to na dnevnom nivou koja se može izvršavati u okviru redovitog operativnog planiranja rada sliva Cetine.

#### 3.1 Općenito o kratkoročnoj optimizaciji rada hidroenergetskog sustava sliva

Cilj optimiranja rada sustava sliva ovisi o konkretnoj situaciji i praktičnim mogućnostima realizacije koji ovise kako o karakteristikama sliva, tako i o položaju i ulozi konkretnog sliva u EES-u. Za funkciju cilja, tj. kriterij po kojemu se vrši optimizacija rada sliva mogu se uzeti slijedeće varijante:

1. kriterij minimalnih troškova termoelektrana kojim se osigurava forsiranje proizvodnje elektrana na slivu u periodima kad su sistemski granični troškovi proizvodnje termoelektrana najveći
2. kriterijem minimalnih težinskih troškova s obzirom na dnevni dijagram potrošnje osigurava se maksimalni angažman hidroelektrana u periodima većih dnevnih opterećenja; ovaj kriterij se najčešće svodi na prvi kriterij, samo ga je jednostavnije formulirati (definira se preko dnevnog dijagrama potrošnje umjesto preko krivulja graničnih troškova termoelektrana)
3. kriterij minimalnog utroška vode podrazumijeva da je ukupna proizvodnja elektrana na slivu po satima zadana, a cilj optimiranja je raspodjela snage među elektranama uz minimalni utrošak vode

Svaki od gornjih kriterija podrazumijeva i uvažavanje svih općih i specifičnih ograničavajućih faktora sliva.

Osnovni parametri elemenata sliva (hidroelektrane i bazeni) koji se koriste pri optimizaciji rada sliva su:

- ⇒ energetska karakteristika hidroelektrane koja definira ovisnost proizvodnje (P) o protoku (q), padu (h) i broju agregata (n):

$$P=f(q,h,n) \quad (1)$$

- ⇒ karakteristika bazena (akumulacijskog, kompenzacijskog) koja definira ovisnost kote bazena (h) o volumenu akumulirane vode (V) i dotoku (d) koji se najčešće zanemaruje, tj. pretpostavlja se statičko ponašanje bazena:

$$h=f(V,d) \quad (2)$$

Za proračun vodne bilance, tj. promjene stanja bazena za promatrani vremenski interval koristi se jednadžba vodne bilance:

$$V_j^{k+1} = V_j^k + d_j^k + \sum_{i \in U_j} (q_i^{k-\tau_{ij}} + s_i^{k-\tau_{ij}}) - \sum_{i \in N_j} q_i^k - s_j^k - g_j^k \quad (3)$$

$i, j$  - indeksi koji određuju bazen ili elektranu

$k$  - indeks koji određuje vremenski interval

$U_j$  - skup bazena uzvodno od j-tog bazena

$V_j^k$  - volumen vode j-tog bazena u k-tom vremenskom intervalu

$d_j^k$  - prirodni dotok vode j-tog bazena u k-tom vremenskom intervalu

$N_j$  - skup HE koje dobijaju vodu iz j-tog bazena

$q_i^k$  - protok kroz turbinu i-te hidroelektrane u k-tom vremenskom intervalu

$s_i^k$  - ispuštanje + preljev iz i-tog bazena u k-tom vremenskom intervalu, tj. ukupna količina vode koja se ispusti iz bazena, a ne prođe kroz turbinu pripadne HE

$g_j^k$  - gubici j-tog bazena u k-tom vremenskom intervalu

$\tau_{ij}$  - vremensko kašnjenje vode na putu od i-tog do j-tog bazena

Osnovna ograničenja (fizikalna ili operativna/dispečerska) koje je potrebno uzeti u obzir su slijedeća:

⇒ ograničenje volumena bazena

$$V_{\min} \leq V^k \leq V_{\max}, \text{ gdje je} \quad (4)$$

$V_{\min}$ ,  $V_{\max}$  – minimalni odnosno maksimalni volumen bazena  
 $V^k$  – volumen bazena u k-tom vremenskom intervalu

⇒ ograničenje snage hidroelektrana

$$P_{\min} \leq P^k \leq P_{\max}, \text{ gdje je} \quad (5)$$

$P_{\min}$ ,  $P_{\max}$  – minimalna odnosno maksimalna snaga hidroelektrane  
 $P^k$  – snaga hidroelektrane u k-tom vremenskom intervalu

⇒ ostala ograničenja vezana za minimalne i maksimalno zahtijevane protoke, ograničenja koja diktiraju ostali korisnici sliva i sl.

Rješavanje problema optimalnog planiranja rada sliva, te konkretna operativna primjena vrlo je kompleksan problem koji uvjetuju slijedeći faktori:

- ⇒ za optimalno planiranje rada sliva, potrebno je imati rješen i odgovarajući sustav planiranja na višem nivou (planiranje EES-a u cjelini) koji će osigurati da zahtijevi koji se postavljaju pred sliv stvarno budu optimalni s obzirom na potrebe EES-a u cjelini
- ⇒ za ispravno modeliranje cijelog sustava potrebno je imati točne parametre svih elemenata sustava, što često nije slučaj
- ⇒ jednadžba koja definira energetska karakteristiku hidroelektrane je općenito nelinearna, nederivabilna i nekonveksna (derivabilna je i konveksna po djelovima)
- ⇒ nepouzdanost dotoka u kompenzacijske bazene i manje akumulacije (dotoci u velike akumulacije nisu bitni za kratkoročnu optimizaciju)
- ⇒ ukoliko se na slivu nalazi i hidroelektrana koja sudjeluje u sekundarnoj regulaciji radne snage, rezultati optimalnog plana rada hidroelektrana se moraju dodatno ispitivati s obzirom na moguće promjene radne snage regulacijske hidroelektrane unutar planiranog regulacijskog opsega

### 3.2 Optimizacija rada hidroelektrana na slivu Cetine

Prvi uvjet koji je potrebno osigurati da bi se moglo raditi na optimalnom planiranju rada sliva Cetine je kvalitetno planiranje rada EES-a na nivou Nacionalnog dispečerskog centra (NDC). Na nivou NDC-a potrebno je osigurati funkcioniranje odgovarajućeg modela kojim bi se omogućila simulacija mogućnosti doprinosa sliva Cetine u optimalnom radu EES-a Hrvatske, te odgovarajući simulacijski model koji bi omogućio provjeru da li se planirani rad hidroelektrana na Cetini ( na nivou NDC-a) može konkretno i realizirati s obzirom na planirane dotoke, karakteristike sustava, i pripadna ograničenja. Ovaj nivo planiranja rada hidroelektrana na slivu Cetine predstavljao bi prvi optimizacijski korak (koji bi u stvari bio i odlučujući po svom ekonomsko – energetska doprinosu), budući da bi se na opisani način optimalno iskoristili resursi sliva s obzirom na potrebe sustava.

Ukoliko se osigura ovakav nivo planiranja na razini NDC-a, optimalno planiranje rada sliva Cetine na lokalnom nivou svodi se na optimizaciju rada unutar točno zadanih granica koje definira sustav, tj. na proračun takve raspodjele snage među elektranama koja će rezultirati minimalnim utroškom vode uz zadovoljenje svih zadanih ograničenja. Za kratkoročno planiranje rada sliva Cetine problem pouzdanosti prognoze dotoka je daleko manji u odnosu na godišnji nivo. S druge strane, HE Zakučac kao regulacijska elektrana nužno mora odstupati od planirane proizvodnje u iznosu koji nije unaprijed poznat, tako da se planirani optimalni vožni red ne može smatrati fiksnim. Jedan od mogućih načina rješavanja optimizacije sliva Cetine je slijedeći:

- ⇒ u prvom optimizacijskom koraku, koji će koristiti linearizirane energetske karakteristike elektrana, određuje se proizvodnja svake elektrane (i broj agregata u pogonu) tako da se realizira unaprijed zadana ukupna proizvodnja, uz održavanje maksimalnih kota svih kompenzacijskih bazena

- ⇒ slijedeći korak ima kao fiksne parametre broj agregata u pogonu po satima, tako da se mogu uzeti neprekidni konveksni dijelovi energetske karakteristike elektrane koji odgovaraju radu elektrana sa zadanim brojem agregata u pogonu, a optimalni plan proizvodnje svake elektrane računa se s obzirom na funkciju cilja kojom će se minimizirati ukupan potrošak vode tijekom dana, uz zadovoljenje ograničenja sliva
- ⇒ s obzirom da opisani koraci optimizacije uzimaju prognozu međudotoka Cetine, te ukupnu proizvodnju elektrana na slivu (koja se mijenja zbog HE Zakučac koja je redovito regulacijka elektrana) za fiksne parametre, prilikom realizacije izračunate raspodjele snaga među elektranama sigurno dolazi do određenih promjena u odnosu na pretpostavljene vrijednosti; određeno poboljšanje rezultata optimizacije može se dobiti primjenom fuzzy logic metoda optimizacije koje će uzeti u obzir nedeterminističke parametre, dok se stvarni optimum može dobiti jedino optimizacijom u realnom ( ili proširenom realnom) vremenu, jasno, uz pretpostavku dobro izvedene off line optimizacije opisane u gornja dva stavka

Bitni preduvjeti za provođenje optimalnog planiranja rada elektrana na slivu Cetine, osim odgovarajuće softverske podrške i stručnjaka koji bi taj proces efikasno provodili, su:

- ⇒ osiguranje mjerenja svih relevantnih električkih i hidroloških veličina, te njihovo dovođenje i prikaz u NDC i DC Split
- ⇒ treba osigurati što točnije tehničke parametre objekata sliva
- ⇒ realizacija daljinskog upravljanja elektranama nije nužna za proces optimalnog planiranja rada elektrana, ali bi bila vrlo korisna u procesu realizacije plana

### 3.3 Optimizacija rada hidroelektrana na slivu Cetine s lineariziranim energetskim krivuljama hidroelektrana

U ovom potpoglavlju dan je opis jednog od matematičkog modela, zajedno s odgovarajućim rezultatima, kojim je moguće praktično realizirati prvi optimizacijski korak ukratko opisan u prethodnom potpoglavlju. Model uzima slijedeće pretpostavke:

- ⇒ energetske karakteristike hidroelektrana (ovisnost protoka i snage) su linearizirane (  $P=k*q$  )
- ⇒ uzima se konstantan pad ( $h=konst$ )
- ⇒ nema preljeva, osim unaprijed zadanog ispuštanja vode iz Prančevića za održavanje biološkog minimuma Cetine
- ⇒ ukupna željena proizvodnja HE Orlovac se zadaje, a kota kompenzacijskog bazena Lipa se uzima fiksna budući da se ona može točno regulirati doziranjem iz akumulacije Buško Blato
- ⇒ zadane su početne kote (odnosno volumeni) kompenzacijskih bazena Đale i Prančevići
- ⇒ zadan je međudotok Cetine po satima
- ⇒ proizvodnja HE Kraljevac se ne računa, tj. pretpostavlja se da nema preljeva iz Prančevića osim ispuštanja biološkog minimuma, tako da se proizvodnja HE Kraljevac može računati posebno

Funkcija cilja formirana je na način da se traži takav vozni red elektrana po satima koji će rezultirati minimalnim odstupanjem kota (volumena) kompenzacijskih bazena Đale i Prančevići od unaprijed zadane referentne vrijednosti. Drugim riječima, funkcija cilja je minimum sume kvadrata odstupanja kote (volumena) bazena Đale i Prančevići od željene vrijednosti:

$$\min \left( k1 * \sum_{k=1,24} (V_{Prančevići}^k - V_{Prančevići}^{ref})^2 + k2 * \sum_{k=1,24} (V_{Đale}^k - V_{Đale}^{ref})^2 \right) \quad (6)$$

gdje je:

- $V_{Prančevići}^{ref}$  - referentna (željena) kota bazena Prančevići
- $V_{Đale}^{ref}$  - referentna (željena) kota bazena Đale
- $V_{Prančevići}^k$  - kota bazena Prančevići u k-tom satu
- $V_{Đale}^k$  - kota bazena Đale u k-tom satu
- $k1, k2$  - težinski faktori dodijeljeni bazenima Prančevići odnosno Đale

Ograničenja u obliku linearnih jednadžbi i nejednadžbi su slijedeća:

⇒ jednadžbe stanja akumulacijskih bazena Đale i Prančevići za 24 sata:

$$V_{\text{Đale}}^{k+1} = V_{\text{Đale}}^k + d_{\text{Cetina}}^k + q_{\text{Peruća}}^{k-7} + s_{\text{Peruća}}^{k-7} + q_{\text{Orlovac}}^{k-2} + s_{\text{Orlovac}}^{k-2} - q_{\text{Đale}}^k - s_{\text{Đale}}^k \quad (7a)$$

$$V_{\text{Prančevići}}^{k+1} = V_{\text{Prančevići}}^k + q_{\text{Đale}}^k + s_{\text{Đale}}^k - q_{\text{Zakućac}}^k - s_{\text{Prančevići}}^k, \quad (7b)$$

uz pretpostavku da su početni volumeni zadani, te da je zadana proizvodnja Peruče zadnjih 7 sati prethodnog dana odnosno Orlovca zadnja 2 sata prethodnog dana, kao i potrebno ispuštanje iz Prančevića po satima za potrebe biološkog minimuma Cetine

⇒ zbroj proizvodnje HE Orlovac po satima mora biti numerički jednak zadanoj ukupnoj energiji koju mora proizvesti HE Orlovac tijekom dana:

$$\sum_{k=1,24} P_{\text{Orlovac}}^k = W_{\text{Orlovac}} \quad (8)$$

⇒ zbroj snaga svih elektrana za svaki sat mora biti jednak unaprijed zadanoj snazi koja se od elektrana sa sliva traži:

$$P_{\text{Peruća}}^k + P_{\text{Đale}}^k + P_{\text{Orlovac}}^k + P_{\text{Zakućac}}^k = P_{\text{traženo}}^k \quad (9)$$

⇒ volumeni bazena Đale i Prančevići moraju biti unutar zadanih granica:

$$V_{\text{Đale}}^{\min} \leq V_{\text{Đale}}^k \leq V_{\text{Đale}}^{\max} \quad (10a)$$

$$V_{\text{Prančevići}}^{\min} \leq V_{\text{Prančevići}}^k \leq V_{\text{Prančevići}}^{\max} \quad (10b)$$

⇒ snaga svake elektrane mora biti unutar zadanih granica:

$$P_{\text{Peruća}}^{\min} \leq P_{\text{Peruća}}^k \leq P_{\text{Peruća}}^{\max} \quad (11a)$$

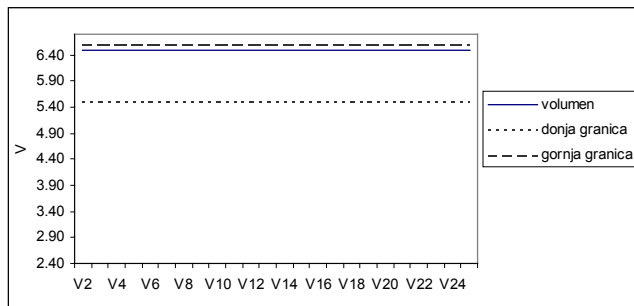
$$P_{\text{Đale}}^{\min} \leq P_{\text{Đale}}^k \leq P_{\text{Đale}}^{\max} \quad (11b)$$

$$P_{\text{Orlovac}}^{\min} \leq P_{\text{Orlovac}}^k \leq P_{\text{Orlovac}}^{\max} \quad (11c)$$

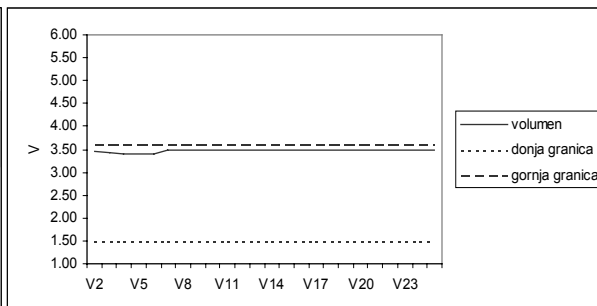
$$P_{\text{Zakućac}}^{\min} \leq P_{\text{Zakućac}}^k \leq P_{\text{Zakućac}}^{\max} \quad (11d)$$

Budući da je funkcija cilja predstavlja kvadratnu formu (bez linearnog člana) za rješavanje modela korištena je standardna metoda kvadratnog programiranja s linearnim ograničenjima.

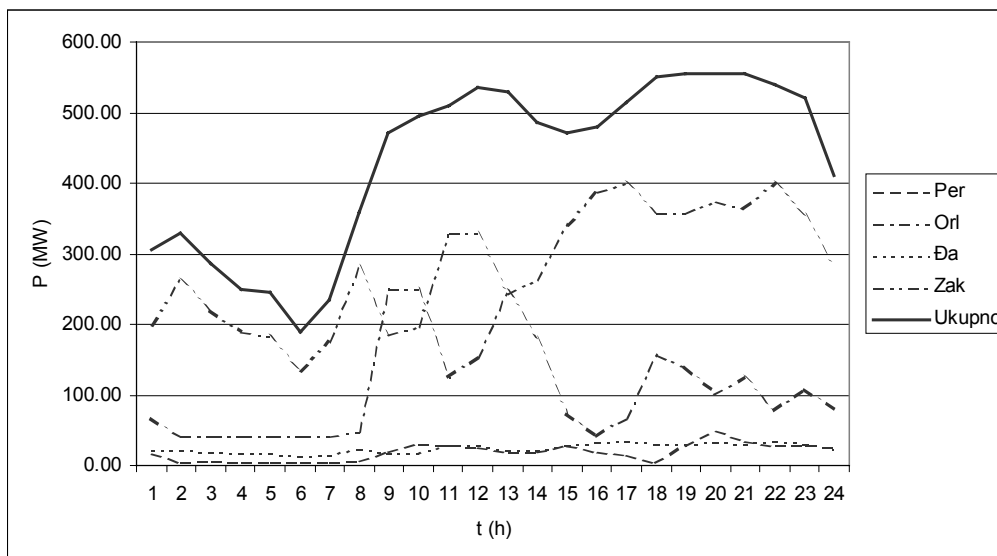
Rezultati proračuna su proizvodnje svih elektrana po satima, te kote (volumeni) kompenzacijskih bazena Đale i Prančevići. Za sve testirane varijante dobiju se optimalna rješenja. Rješenja su u gotovo svim slučajevima takva da odstupanja kote od zadane referentne vrijednosti ne odstupaju više od 5%. Na donjim slikama dani su grafički rezultati jednog proračuna: volumeni kompenzacijskih bazena Đale i Prančevići, te proizvodnja elektrana.



Slika 2a: Volumen bazena Prančevići

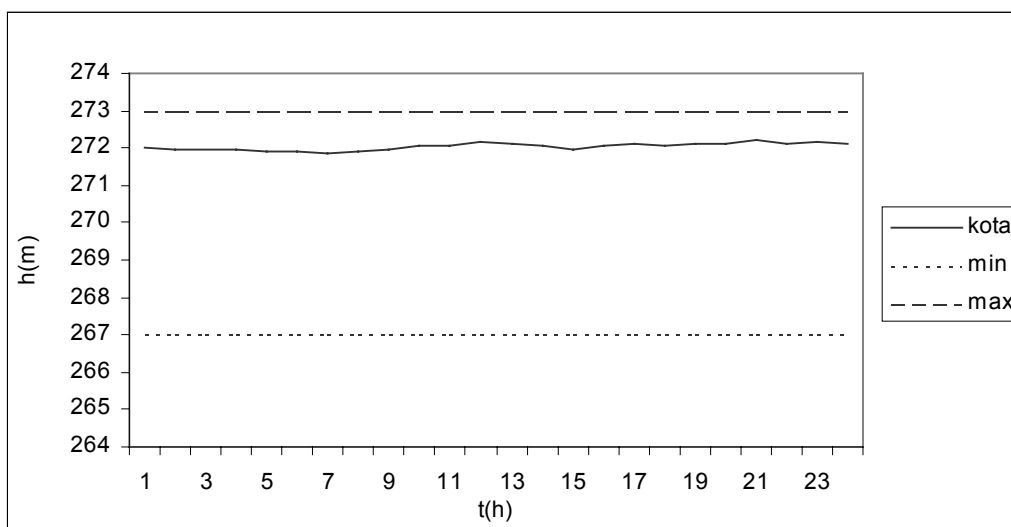


Slika 2b: Volumen bazena Đale



Slika 3: Proizvodnja elektrana po satima

Za okvirni uvid u osjetljivost rezultata proračuna na međudotok Cetine i promjene snage HE Zakučac (budući da ona sudjeluje u regulaciji radne snage u EES-u Hrvatske), napravljene su dodatne analize na način da je simuliran rad sliva na osnovu rezultata proračuna, ali uz promjene navedenih parametara tijekom dana. Na donjoj slici prikazana je promjena kote kompenzacijskog bazena Prančevići uz pretpostavku da se snaga HE Zakučac slučajnim odabirom mijenja u granicama od +/- 30 MW noću i +/- 60 MW danju u odnosu na izračunate vrijednosti.



Slika 4: Promjena kote Prančevića u odnosu na plan uz pretpostavku rada HE Zakučac u regulaciji

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu dan je kratki pregled sadašnjeg stanja i mogućnosti unapređenja procesa planiranja rada hidroenergetskog sustava sliva rijeke Cetine i to prvenstveno u domeni kratkoročnog planiranja. Najveće mogućnosti poboljšanja postojeće prakse u planiranju rada elektrana na Cetini leže u efikasnijem korištenju elektrana na nivou EES-a Hrvatske u cjelini, tj. optimalnije upotrebe elektrana na Cetini u pokrivanju varijabilnog dijela dnevnog dijagrama opterećenja. Osim toga, postoje i značajne mogućnosti lokalnog optimiranja rada elektrana na slivu unutar granica zadanih sa višeg planerskog nivoa na način da se optimira raspodjela snaga među elektranama uz minimalni utrošak vode. U radu je dan i opis jednog od mogućih matematičkih modela, zajedno s nekim rezultatima, koji bi mogao poslužiti kao prvi

optimizacijski korak u opisanom dvoetapnom optimizacijskom modelu. Rezultati proračuna, a i svjetska iskustva i praksa na ovom području, nedvojbeno pokazuju mogućnosti i korisnost primjene optimizacije rada sliva Cetine, ali i brojne poteškoće koje će se ispriječiti u praktičnoj realizaciji prvenstveno iz tehničkih razloga, te nepouzdanosti određenih ulaznih parametara.

#### LITERATURA:

- [1] R. Goić: Objektno orijentirano modeliranje elektroenergetskog podsustava, magistarski rad, FESB, veljača 1997.
- [2] R. Goić i dr.: Objektno orijentirani dizajn kratkoročne simulacije rada i dispečinga radne snage u elektroenergetskom sustavu s pretežitim udjelom hidroelektrana, III savjetovanje HK CIGRE, Cavtat 1997.
- [3] Programski sustav DPLAN - Upute za rad, Fractal d.o.o., Split, srpanj 1998.
- [4] Ralph A. Wurbs: Modeling and Analysis of Reservoir System Operations; Prentice Hall, USA, 1996
- [5] E. B. Hreinsson: Optimal Short Term Operation of a Purely Hydroelectric System; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 3, August 1988
- [6] C. Lyra, L.R.M. Ferreira: A Multiobjective Approach to the Short-term Scheduling of a Hydroelectric Power System; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, November 1995
- [7] S. Rajagopal, P.G. Sigari, J.E. Allen, M. Assadian: Water System modeling for Dispatcher Training Simulators; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993
- [8] M.R. Piekutowski, T. Litwinowicz, R.J. Frowd: Optimal Short-Term Scheduling for a Large-Scale Cascaded Hydro System; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 9, May 1994

#### PITANJA ZA DISKUSIJU:

- Dosadašnja iskustva i analize, te mogućnosti daljnjeg unapređenja iskorištavanja sliva Cetine unutar EES-a Hrvatske
- Praktična ograničenja za realizaciju kratkoročnog optimalnog planiranja rada sliva Cetine
- Utjecaj predviđanja dotoka na simulaciju rada sliva Cetine
- Mogućnosti primjene metoda neizravne logike (fuzzy logic) u optimizaciji rada hidroenergetskih sustava s obzirom na nepouzdanost ulaznih parametara