

Holistički pristup upravljanju HEPS Đerdap

Nikola Milivojević*, Dejan Divac*, Boban Stojanović**, Prvoslav Marjanović*, Brankica Majkić-Dursun*, Dragan Stanković***

* Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Beograd

** Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac

*** Akcionarsko društvo Elektroprivreda Srbije, Beograd

Rezime - Hidroenergetsko plovidbeni sistem Đerdap čine HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” koji imaju ne samo veliki uticaj na nivoe reke Dunav u dužini od preko 300 km već i na režime podzemnih voda u širokom području priobalja, zatim na funkcionisanje i promene ekosistema u zoni uspora, a istovremeno predstavljaju i zonu retenzije i akumulacije nanosa i raznih vrsta zagađenja sa svih uzvodnih delova sliva koje Dunav i pritoke transportuju na svom putu do Đerdapa. Izgradnjom HEPS „Đerdap 1” i „Đerdap 2” došlo je do trajne promene prirodnih uslova u akumulacijama i priobalju, sa određenim negativnim posledicama. To su: povišenje nivoa podzemnih voda u priobalju, koje ugrožavaju naseljena mesta, industrijske, komunalne i saobraćajne objekte i dovode do prevlađivanja poljoprivrednog zemljišta, povišenja nivoa vode usled taloženja nanosa, ugrožavanje stabilnosti odbrambenih nasipa i visokih obala, izmene u rečnoj biocenozi, itd. U radu se daju principi holističkog pristupa upravljanju kako bi se, pored energetske eksploatacije kao osnovne namene, dalo na značaju i upravljanju svim drugim aspektima: režimom podzemnih voda u priobalju, režimom nanosa, kako po pitanju količina tako i po pitanju kvaliteta i dr. Pristup upravljanju se definiše uzimajući u obzir sve postojeće tehničke sisteme koji su relevantni za datu problematiku. U skladu sa definisanim principima, u radu se daje i struktura softversko/hardverskog sistema za podršku upravljanju koja je bazirana na postojećim tehničkim sistemima koji obuhvataju veliki broj međusobno povezanih komponenti hardvera, softvera, mernih instrumenata i korisnika.

Ključne reči - upravljanje hidroenergetskim sistemima, holistički pristup, sistemi za podršku upravljanju

I UVOD

Na zajedničkom srpsko-rumunskom sektoru Dunava izgrađena su dva hidroenergetska i plovidbena sistema: HEPS „Đerdap 1” (km 943+000) i HEPS „Đerdap 2” (km 862+800). Ovi sistemi su najznačajniji sistemi za proizvodnju hidroenergije u Srbiji (pokrivaju preko 50% hidroenergetske proizvodnje, odnosno oko 18% ukupne proizvodnje električne energije). Sistemi HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” imaju ne samo veliki uticaj na nivoe reke Dunav u dužini od preko 300 km već i na funkcionisanje i promene ekosistema u zoni uspora, a istovremeno predstavljaju i zonu retenzije i akumulacije nanosa i raznih vrsta zagađenja sa svih uzvodnih delova sliva koje Dunav i pritoke transportuju na svom putu do Đerdapa. U cilju racionalnog korišćenja raspoloživog hidroenergetskog

potencijala Dunava, rad hidroelektrana sistema HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” i način evakuacije vode Dunava preko prelivnih brana je planiran i koordiniran između srpske i rumunske strane. Racionalno upravljanje složenim sistemima HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” podrazumeva zadovoljenje zahteva energetske Srbije i Rumunije, koji se razlikuju u pogledu snage i vremena, uz zadovoljenje niza ograničenja na kontrolnim profilima na Dunavu koja su definisana međudržavnim dokumentima.

Pored operativne komponente upravljanja, koja predstavlja najznačajniji aspekt korišćenja HEPS Đerdap, upravlja se, ili se u najmanju ruku vrši praćenje i niza drugih procesa koji na različite načine utiču na prirodno okruženje i društvo. Ove aktivnosti su se usled duge istorije razvoja sistema, uslova rada i upravljanja, promena u društvu i sl., razvijale različitim dinamikom i često su nedovoljno harmonizovane. Stoga je potrebno razmotriti holistički pristup upravljanju HEPS Đerdap koji naglašava važnost naprednog operativnog upravljanja HEPS kao osnovne komponente holističkog pristupa, ali takođe ističe i komponente holističkog pristupa koje su u funkciji održivosti životne sredine, bezbednosti i ublažavanja rizika, angažovanja zainteresovanih strana, finansijske odgovornosti i tehnoloških inovacija. Usklađivanjem ovih aspekata, hidroenergetske operacije mogu postići povećanu efikasnost i bezbednost, dok doprinose održivom razvoju energetike i dobrobiti zajednice. Strateški pristup izložen u ovom radu ima za cilj da osigura da objekti HEPS Đerdap ne samo da u kontinuitetu obezbeđuju značajnu obnovljivu energiju, već i da štite jedinstveni ekosistem reke i priobalja i da nastave da podstiču regionalni razvoj.

U dugoj istoriji eksploatacije HEPS Đerdap razvijen je niz tehničkih sistema za podršku upravljanju koji su u vreme uspostavljanja bili u skladu sa savremenim tehničkim rešenjima i primereni tadašnjim potrebama. Da bi se efikasno upravljalo ovako složenim sistemom neprestano je vršena integracija različitih tehničkih sistema u cilju dobijanja celovitih informacija. Hidroinformacioni sistem Đerdap, razvijen od strane Instituta Jaroslav Černi, predstavlja najobimniji tehnički sistem u upotrebi na HEPS Đerdap. Ovaj sistem integriše veliki broj raznorodnih podataka (eksploatacionih, meteoroloških, hidroloških, hidrogeoloških i dr.) i operativnih matematičkih modela (1D model neustaljenog tečenja, hidroenergetski model elektrane i dr.) koji se koriste na automatizovan način i čime je praktično formiran hidraulički digitalni blizanac akumulacije. Oslanjajući se na dosadašnji razvoj, dat je predlog odgovarajućeg tehničkog sistema koji u budućnosti treba u potpunosti formirati,

čime bi se stvorili uslovi za efikasno upravljanje bazirano na holističkom pristupu.

II HOLISTIČKI PRISTUP UPRAVLJANJU KOMPLEKSNIH HIDROENERGETSKIM SISTEMIMA

Holistički pristup upravljanju velikim hidroenergetskim sistemima (HES) integriše više dimenzija – tehničke, ekološke, društvene i ekonomske – radi optimizacije efikasnosti i dugoročne održivosti. Za razliku od tradicionalnih strategija upravljanja koje se prvenstveno fokusiraju na proizvodnju energije, ovaj pristup nastoji da uravnoteži više, često konkurentnih prioriteta i procesa.

Holističko upravljanje velikim hidroenergetskim sistemima je neophodno zbog:

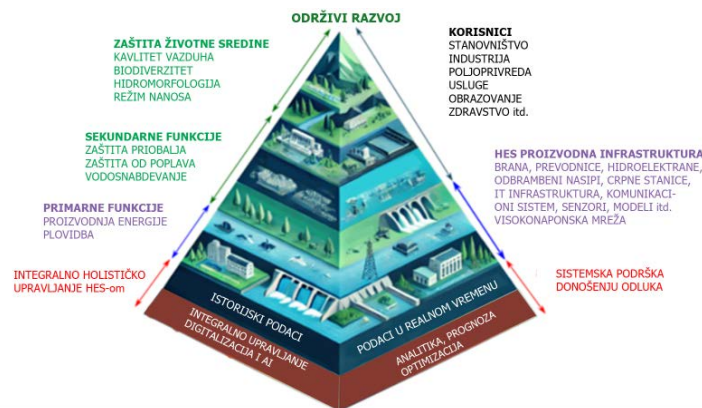
- sve veće potražnje za održivom energijom (optimizacije proizvodnog procesa, prilagođavanja klimatskim promenama, povećanje efikasnosti, optimizacije održavanja, minimizacije rizika po proizvodni proces, itd.);
- značaja ekonomske efikasnosti i dugoročne finansijske održivosti (energetskog tržišta, politike cena, uloge HES u optimizaciji proizvodnje energije iz drugih obnovljivih i neobnovljivih izvora – “hidro-baterije” i sl.)
- složenosti upravljanja sa više zainteresovanih strana, posebno u prekograničnim rečnim sistemima, širokog spektra i heterogene struktura zainteresovanih strana, međunarodnog pravno-političkog okvira u vidu sporazuma, konvencija, direktiva itd., povezanost sa drugim energetskim sistemima i interakcije, energetske zajednice i dr.
- zaštite životne sredine i rečnih ekosistema (upravljanje režimom voda – količinom i kvalitetom, upravljanje režimom nanosa – količinom i kvalitetom, unapređenja biodiverziteta – hidromorfologija, migratorne vrste, kontinuitet i sl., unapređenje i očuvanje ekosistemskih usluga).

Ovakav pristup osigurava da HES budu ne samo efikasni proizvođači energije, već i da doprinose zaštiti ekosistema, društvenom razvoju i finansijskoj stabilnosti.

Kompleksnost holističkog upravljanja HES, pre svega, zahteva postojanje i primenu izuzetno visokog stepena digitalizacije i digitalnih alata (hardversko-softverskih rešenja) za podršku donošenju pravovremenih i optimalnih upravljačkih odluka u realnom vremenu, ali i za podršku kratkoročnom i dugoročnom planiranju u svim domenima upravljanja sistemom (analitičke i prognostičke modele i sl.). U ovom kontekstu od posebnog značaja je postojanje digitalnih sistema koji omogućavaju dubinsku analizu istorijskih iskustava i podataka od značaja za prognozu budućih stanja sistema i blagovremeno planiranje u odnosu na optimizaciju budućeg rada sistema (Slika 1).

Razvoj pomenutih sistema u praksi je iterativan i dugotrajan i odvija se u fazama. Po pravilu, u početnim fazama razvoja prioritet se daje svim onim delovima sistema koji podržavaju optimizaciju proizvodnog procesa hidroenergije i drugih uobičajenih primarnih funkcijama HES-a (na primer plovidba i odbrana od poplava) a tek u kasnijim fazama razvoja posvećuje

se pažnja ostalim domenima upravljanja sistemom kao što je zaštita životne sredine (režim nanosa, kvalitet voda, i sl.).



Slika 1. Holističko upravljanje hidroenergetskim sistemima

Kod HES izgrađenih na međunarodnim vodotocima holističko upravljanje HES-ma postaje još kompleksnije i odvija se unutar međunarodnog pravnog okvira koji uključuje bilateralne/multilateralne sporazume i ugovore, međunarodne konvencije, zakone i propise i dr. Pored navedenog treba imati u vidu i činjenicu da su HES i upravljanje njima pod uticajem dodatnih pravila i ograničenja dinamičkog karaktera usled brojnih promena u nacionalnim i međunarodnom pravnom okviru (na primeru Đerdapa: promena društvenog uređenja u Republici Srbiji i Rumuniji, pristupanje Rumunije EU i kandidatura Srbije za članstvo u EU, stupanje na snagu više relevantnih Direktiva EU, promena vlasničke strukture Rumunskog investitora i mnogi drugi faktori) i novih suštinskih zahteva i pravila koja se moraju primenjivati u upravljanju HES.

III AKTUELNI PRISTUP UPRAVLJANJU HEPS ĐERDAP

U cilju racionalnog korišćenja raspoloživog hidroenergetskog potencijala Dunava, rad hidroelektrana sistema HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” i način evakuacije vode Dunava preko prelivnih brana je planiran i koordinisan između srpske i rumunske strane. Racionalno upravljanje složenim sistemima HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” podrazumeva zadovoljenje zahteva energetskih sistema R. Srbije i Rumunije, koji se razlikuju u pogledu snage i vremena, uz niz ograničenja na kontrolnim profilima na Dunavu, koja su definisana međudržavnim dokumentima.

Sporazumi, konvencije, protokoli i ugovori vezani prvo za HEPS „Đerdap 1”, a zatim za proširenje saradnje u korišćenju hidroenergetskog potencijala reke Dunav i izgradnju HEPS „Đerdap 2” potpisivani su konsekvntno počevši od druge polovine 50-tih XX veka [1]. Pojedina pitanja regulisana su ugovorima između srpskog i rumunskog investitora. Ratifikacijom dve Vlade ovi akti postali su pravno obavezujući. Svi ovi dokumenti moraju se posmatrati integralno. Ovaj složeni pravni okvir uvek je bio pod lupom šire međunarodne zajednice s obzirom na značaj Dunava kao međunarodne reke i međunarodnog plovog puta.

Sporazumom iz 1963. godine [2] i usvojenim Statutom formirana je Jugoslovensko-rumunska mešovita komisija za Đerdap (danas Srpsko-rumunska mešovita komisija za Đerdap). Mešovita

komisija kao mešoviti organ dveju vlada, u okviru svojih nadležnosti, obezbeđuje ostvarivanje stalne saradnje, koordinacije i primene odredaba navedenih sporazuma, konvencija, protokola kao i ugovora potpisanih između srpskog i rumunskog investitora u vezi sa HEPS „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“.

Aktuelna eksploatacija sistema HEPS „Đerdap 1“ i HEPS „Đerdap 2“ je regulisana Konvencijom iz 1998. [3], a detaljnije Pravilnikom o organizaciji i radu ZDSE (Pravilnik ZDSE) [4] i Pravilnikom o organizaciji i radu ZDSP (Pravilnik ZDSP) [5], odnosno Pravilnikom o organizaciji i načinu rada KZP (Pravilnik KZP) [6].

Eksploatacijom hidropotencijala, kao primarnom funkcijom HEPS „Đerdap“, upravlja se kroz kontinualni rad Zajedničke dispečerske službe za energetiku. Ovaj mešoviti organ je nadležan je da prati režim eksploatacije i podelu potencijala između srpske i rumunske strane. Zadaci Zajedničke dispečerske službe za energetiku (ZDSE) definisani su tako da je ovaj organ nadležan za: izradu prognoze dotoka vode u akumulaciono jezero „Đerdap 1“, određivanje raspoloživog hidropotencijala oba sistema „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“, definisanje dnevnih planova i režima rada hidroelektrana, koordinaciju rada hidroelektrana, evidenciju o osmotrenim relevantnim podacima i dr.

Obezbeđenjem uslova za plovidbu, kao druga primarna funkcija sistema, upravlja se kroz rad Zajedničke dispečerske službe za plovidbu (ZDSP). Ovaj mešoviti organ vrši operativno upravljanje plovidbom u sektoru između km D 936 i km D 949, kao i u sektoru između km D 858 i km D 868 u skladu sa Pravilnikom ZDSP i posebnim pravilima plovidbe na Dunavu.

Harmonizaciju upravljanja u cilju ispunjenja navedenih funkcija vrši Zajednički organ za koordinaciju (ZOK) čiji članovi su predstavnici srpske i rumunske energetske kompanije, predstavnici organa plovidbe i vodoprivrede obe zemlje. Suštinski ZOK koordinira između energetske proizvodnje i plovidbe, a kada se pojave vodoprivredna pitanja, u rad ZOK uključuju se i delegati vodoprivrede obe zemlje.

U vezi sekundarnih funkcija HEPS „Đerdap“, vrši se praćenje rada, efekata i uticaja sistema kroz rad Komisije za praćenje ponašanja Sistema Đerdap 1 i Đerdap 2 (KZP). KZP je ustanovljena radi praćenja ponašanja glavnih objekata i akumulacionih jezera oba sistema. Ovaj organ Mešovite komisije, na predlog dva investitora, utvrđuje Programe osmatranja i merenja od zajedničkog interesa koje treba sistematski da sprovede EPS AD i Hidroelectrica SA za: režim nanosa i morfoloških promena korita, za hemijske, biološke, termičke i radiološke promene voda Dunava na glavnim objektima, u zoni glavnih objekata, u akumulacionim jezerima i priobalnom području akumulacionih jezera. KZP ima zadatak i da prati i analizira sve pojave od uticaja na stabilnost i funkcionalnost glavnih objekata oba sistema, stabilnost obala, promene morfologije korita kao i kvalitet voda Dunava u akumulacionim jezerima ovih sistema, na osnovu dokumentacije koju joj investitori stave na raspolaganje. Pored navedenog zadatak KZP je da utvrđuje na predlog investitora, potrebna dopunska merenja na osnovu interpretaciji dobijenih rezultata,

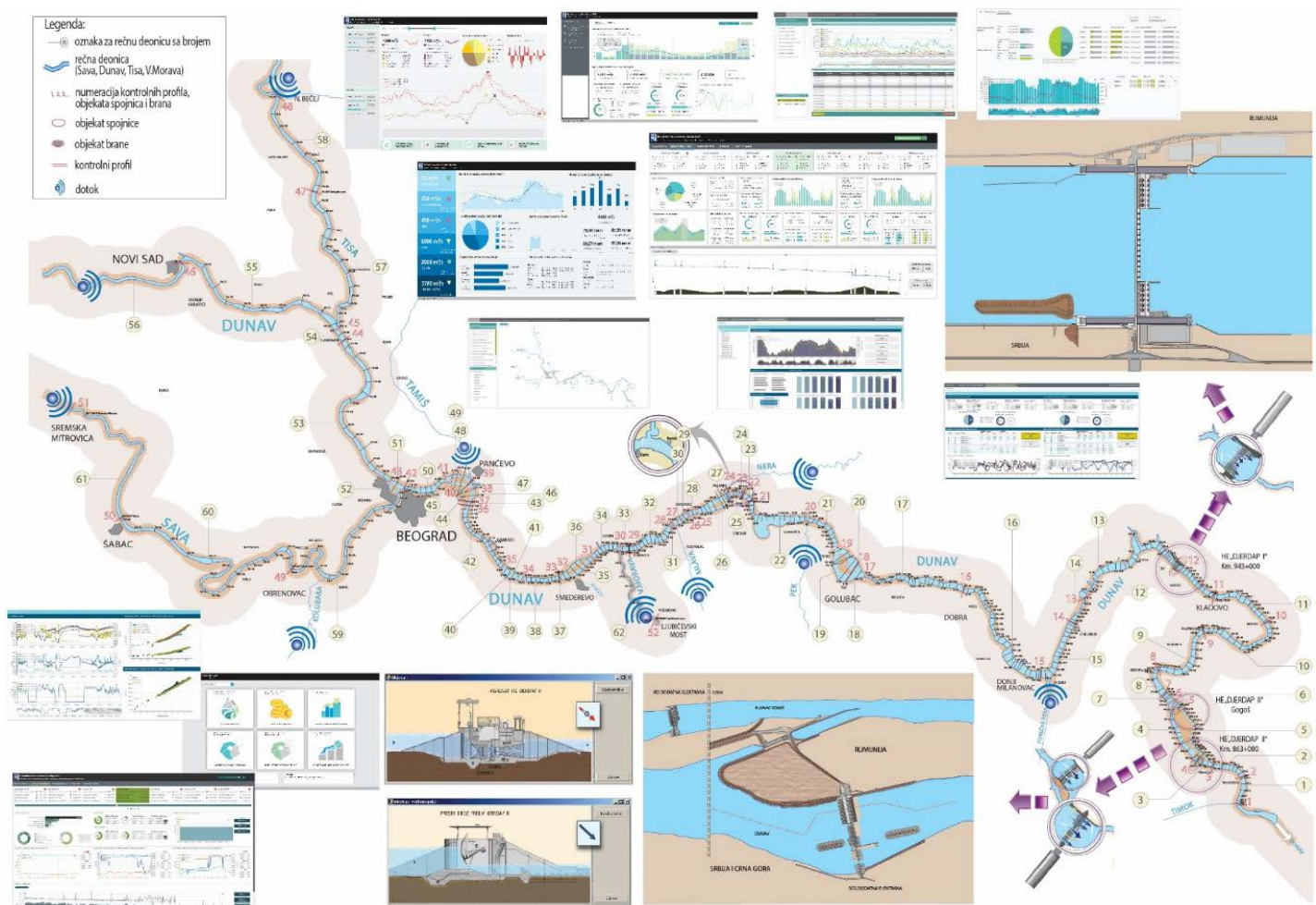
prilikom poplava, ledostaja, zemljotresa itd. Isti organ je zadužen i da utvrđuje, na predlog investitora, metodologiju osmatranja i merenja koja će obezbediti podatke za ocenu ponašanja HEPS Đerdap 1“ i HEPS „Đerdap 2“, te da razmatra dokumentaciju i izveštaje o interpretaciji rezultata merenja i osmatranja, koje podnose srpska i rumunska elektroenergetska kompanija i predlaže potrebne mere. Pravna sekcija i KRR se aktiviraju u slučaju potrebe.

Uspešna eksploatacija HEPS Đerdap podrazumeva potrebu za što preciznijim osmatranjem, pouzdanom procenom i prognozama velikog broja parametara: hidroloških (nivoi vode, protok, kvalitet), zatim režima nanosa (količine i kvalitet), eksploatacionih parametara vezanih za rad agregata i evakuacionih organa i dr. Stoga je srpska strana u obavezi da neprestano ulaže u merne sisteme i niz tehničkih sistema za podršku odlučivanju u različitim aspektima eksploatacije HEPS Đerdap.

Upravljanje hidroelektranama se zasniva na praćenju eksploatacionih podataka. Za tu svrhu veoma razvijen je složen tehnički sistem merenja i akvizicije u vidu SCADA sistema. U zoni objekata Đerdap 1, Đerdap 2 i brane Gogoš prikupljaju se eksploatacioni podaci o: nivoima vode u neposrednoj blizini agregata, protoku, aktivnim i reaktivnim snagama agregata i proizvodnji energije. Na srpskoj strani Đerdapa 1, prate se podaci sa prelivne brane (otvor ustava, protoci), hidroelektrane (6 agregata), kao i nivoi vode uzvodno i nizvodno od brane. Na srpskoj strani Đerdapa 2, slični podaci se prate za osnovnu i dodatnu hidroelektranu (8 i 2 agregata), kao i na meteorološkoj stanici. Na rumunskoj strani Đerdapa 1 i 2 prikupljaju se podaci sa prelivne brane, osnovne hidroelektrane, i profila brane. Slični podaci se prikupljaju na brani Gogoš za dodatnu hidroelektranu. Podaci iz SCADA sistema se koriste u planiranju proizvodnje, podeli potencijala i utvrđivanju „penala“ u slučaju narušavanja ograničenja definisanih Pravilnikom ZDSE.

Usled obaveza srpske strane koje slede iz Pravilnika ZDSE [4] i potreba operativnog upravljanja hidroelektranama Đerdap 1 i Đerdap 2, unutar Ogranka HE „Đerdap“ je razvijen namenski tehnički sistem za podršku upravljanju eksploatacijom hidropotencijala [7]. Kroz više faza razvoja formiran je moderan sistem za podršku upravljanju koji obuhvata veliki broj međusobno povezanih komponenti hardvera, softvera, mernih objekata i instrumenata i korisnika sistema (Slika 2). Ovaj tehnički sistem predstavlja kompleksnu hardversko/softversku platformu sa orijentacijom ka: korisniku (korisničke aplikacije), sistemskom izvršavanju u realnom vremenu (servisi), kao i specijalizovanom upravljanju sistemom (administratorski alati). Rad i korišćenje sistema se zasniva na hidrauličko-hidroenergetskom modelu HES „Đerdap“ koji omogućava proračune u realnom vremenu i dugoročne analize potrebne za odlučivanje.

U praksi sistem se koristi pri planiranju proizvodnje, obračunavanju podele potencijala i provere zadovoljenosti ograničenja u realizaciji planova. Pored toga, sistem omogućava i dugoročne hidroenergetske i hidrauličke proračune i analize koje su deo obaveza srpske strane u okviru rada KZP i ZDSE.



Slika 2. Tehnički sistem za podršku upravljanju hidropotencijalom – HIS Đerdap

IV HOLISTIČKI PRISTUP UPRAVLJANJU HEPS ĐERDAP

Kao odgovor na izazove klimatskih promena i globalnog zagrevanja u svetu i Evropskoj uniji, poslednjih decenija dešavaju se krupne promene u energetske sektoru koje se najčešće opisuju kao „energetska tranzicija” [8]. Donošenjem Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine [9], koja ima za cilj postizanje značajnog smanjenja negativnog antropogenog uticaja energetske sektora na prirodu i životnu sredinu, posebno u smislu smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte, država Srbija se obavezala da prati energetske tranziciju. Usklađenost sa zakonskim zahtevima, inicijative za obnovu i novi standardi održivosti pozicioniraju hidroenergiju kao ključnog igrača u tranziciji EU prema čistoj energiji, dok se suočavaju sa izazovima očuvanja biodiverziteta i životne sredine.

U navedenom kontekstu poseban izazov predstavljaju zahtevi za usklađenošću sa novim tehničkim standardima što podrazumeva da operateri hidroenergetskih sistema moraju da se pridržavaju tehničkih i ekoloških standarda, uključujući i zahteve za digitalno praćenje efekata svoga rada, odnosno implementaciju naprednih tehnologija monitoringa za merenje ekoloških i hidroloških uticaja. Republika Srbija kao zemlja kandidat za pristupanje EU, je svoje zakonodavstvo u velikoj meri uskladila sa pravnim

tekovinama EU ili je u završnoj fazi tog usklađivanja, pa se očekuje i nameće potreba da se i rad HEPS „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“ uskladi sa novim i reformisanim pravnim okvirom, kako u Srbiji tako i u Rumuniji.

Novi zakonodavni okviri i evropske direktive u oblasti voda, energetike i zaštite životne sredine, te prelazak sa klasično energetske na holističko upravljanje, postavljaju pred elektroenergetske kompanije nove zahteve, koji će neminovno zahtevati dalji razvoj postojeće platforme sa jedne strane i prikupljanje novih podataka sa druge.

Pored navedenog, moguća izgradnja RHE Đerdap 3 dodatno će usložiti upravljanje čitavim sistemom i doneti nove zahteve u vezi sa upravljanjem i izveštavanjem kao i u odnosu sa rumunskom stranom. Za očekivati je da se prošire i nadležnosti postojećih organa Mešovite komisije ili da se formiraju novi, kao i da se postojeći bilateralni akti reviduju i ažuriraju.

U kontekstu holističkog upravljanja hidroenergetskim sistemima, savremeni izazovi koji proizilaze iz velikog broja međusobno povezanih i često suprotstavljenih ciljeva zahtevaju integrisan i višeslojan pristup odlučivanju. Da bi donosioci odluka mogli efikasno upravljati ovim kompleksnim sistemima u realnom vremenu, neophodna je visoka automatizacija procesa kroz upotrebu naprednih softversko-hardverskih rešenja. Holistički

koncept upravljanja podrazumeva razvoj i primenu savremenih sistema podrške odlučivanju (DSS) koji integrišu podatke iz različitih domena — hidrometeoroloških, hidrogeoloških, hidroenergetskih i ekoloških — u jedinstvenu informacionu platformu. Ovakav DSS ne samo da obezbeđuje podatke i alate za analizu i optimizaciju upravljanja, već ima i ulogu u uspostavljanju koordinacije i saradnje među relevantnim akterima, edukaciji stručnog kadra i uključivanju javnosti u procese upravljanja i zaštite vodnih resursa.

U tom smislu, digitalni blizanci (Digital Twins) predstavljaju ključnu tehnologiju za implementaciju holističkog upravljanja. Oni funkcionišu kao dinamički, digitalni prikazi fizičkog sistema, zasnovani na kombinaciji realnih merenja (putem SCADA sistema, IoT senzora itd.), numeričkih simulacija i algoritama za analitiku i optimizaciju [10-11]. U hidroenergetskom sektoru, digitalni blizanci omogućavaju kontinuirano praćenje, predikciju ponašanja sistema i donošenje odluka koje su usklađene sa tehničkim, ekonomskim i ekološkim ograničenjima i standardima.

U zavisnosti od razvijenosti mernih sistema, modela i alata za obradu podataka, digitalni blizanci se razvijaju kroz različite nivoe „zrelosti“ — od osnovne digitalizacije procesa, preko interaktivnih modela sa dvosmernom komunikacijom između digitalnog i fizičkog domena (nivo 2), do naprednih autonomnih sistema koji su još uvek predmet istraživanja. Holistički pristup uvođenju digitalnih blizanaca podrazumeva transdisciplinarni razvoj koji povezuje tehničke, organizacione i društvene aspekte, sa ciljem ostvarivanja održivog, adaptivnog i transparentnog upravljanja hidroenergetskim resursima [12-16]:

- **Nivo 0 – Fizički sistem.** Predstavlja osnovu sistema bez ikakvog digitalnog modela. Upravljanje i nadzor su isključivo manuelni, lokalni i izolovani, bez podrške za integraciju ili širu optimizaciju.
- **Nivo 1 – Digitalni model.** Statički prikaz fizičkog sistema, često u vidu CAD ili BIM modela. Koristi se u fazama projektovanja, ali ne sadrži podatke u realnom vremenu. Podrška za holističko upravljanje je minimalna i neintegrovana.
- **Nivo 2 – Digitalna senka (Digital Shadow).** U ovom nivou uspostavlja se jednosmerna veza: podaci iz fizičkog sistema se prenose u digitalni model, ali bez povratne kontrole. Omogućava monitoring u realnom vremenu, ali bez automatskog reagovanja ili povezivanja sa drugim sektorima (npr. energija–životna sredina).
- **Nivo 3 – Digitalni blizanac (Digital Twin).** Karakteriše ga dvosmerna interakcija između fizičkog i digitalnog sveta. Sistem može da simulira, predviđa i optimizuje ponašanje fizičkog sistema, kao i da donosi preporuke ili upravlja izvršnim komponentama. Omogućava integraciju više domena, poput vode, energije i infrastrukture.
- **Nivo 4 – Kognitivni blizanac.** Predstavlja inteligentnog digitalnog blizanca sa sposobnostima učenja, adaptacije i donošenja odluka zasnovanih na veštačkoj inteligenciji i mašinskom učenju. U realnom vremenu optimizuje rad sistema uz balansiranje višestrukih ciljeva (proizvodnja, očuvanje resursa, zaštita životne sredine).
- **Nivo 5 – Sistemski blizanac (System-of-Systems Twin).**

Najnapredniji nivo zrelosti koji integriše više digitalnih blizanaca u jedan složen sistem. Omogućava višeslojno i višesektorsko upravljanje – npr. koordinaciju hidroenergetskih objekata u slivu, povezivanje sa distributivnim mrežama i integraciju sa politikama upravljanja resursima. Obezbeđuje potpunu sistemsku sinergiju i strateško planiranje.

Oslanjajući se na obimne tehničke sisteme koji se nalaze u upotrebi u HEPS Đerdap, sa jedne strane, kao i ranije pomenute potrebe integralnog pristupa upravljanju ovim sistemom, može se definisati struktura odgovarajućeg sistema za podršku u upravljanju HEPS Đerdap (Slika 3.).

Prvi element predstavlja fizički domen, odnosno prostor koji HEPS Đerdap obuhvata, priobalje na koje sistem direktno utiče kao i objekte brana i hidroelektrana. U tom sloju se nalaze i svi senzori, merni i akvizicioni sistemi, osmatračići i sl.

Drugi element čini sistem za upravljanje podacima, počevši od komunikacionog sloja u kome se realizuje prenos podataka iz fizičkog domena do softverskih komponenti koje upravljaju podacima i čine sloj sa podacima. Osim podataka o vremenskim serijama, u centralnoj bazi podataka se čuvaju i podaci o sistemu za osmatranje i prikupljanje podataka koji mogu biti od važnosti za tumačenje podataka vremenskih serija. Tako je, u maniru digitalnog blizanca, omogućeno skladištenje i održavanje podataka o mernim instrumentima, mernim mestima i mestima osmatranja, što omogućava potpunije sagledavanje prostornih odnosa i postupaka merenja u sistemu. Softverske komponente vrše koordinaciju, distribuciju, sinhronizaciju i skladištenje podataka, kao i upravljanja pristupom podacima i servisima.

U okviru holističkog upravljanja HEPS „Đerdap“, matematički modeli i proračunski servisi čine suštinski deo digitalnog blizanca — dinamičkog digitalnog modela fizičkog sistema koji omogućava sinhronizaciju realnih podataka, simulacija i odluka u realnom vremenu. Kao što je prikazano na slici 3, ovaj sloj funkcioniše kao središnji element između fizičkog domena i alata za operativno i strateško odlučivanje.

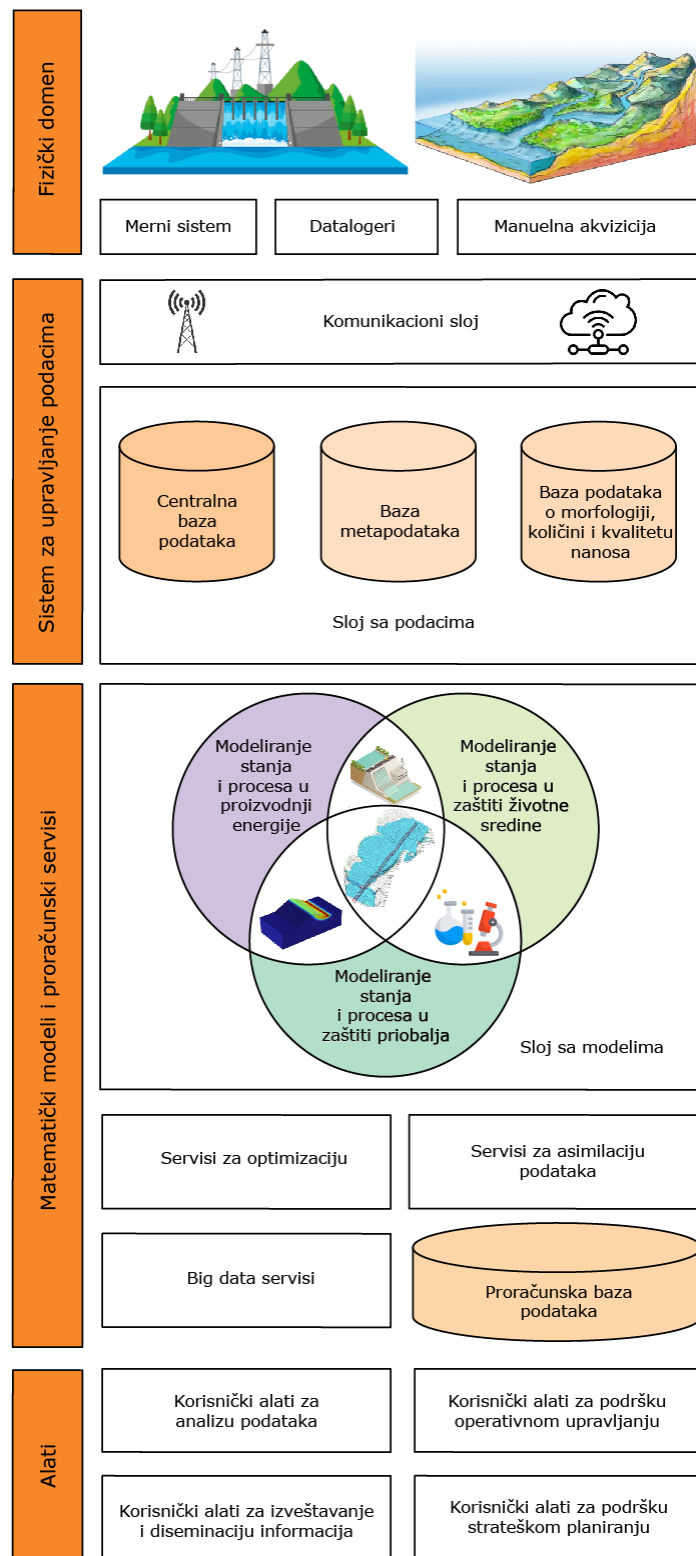
Matematičko-modelski deo je organizovan u vidu funkcionalnih podsistema koji pokrivaju različite aspekte modeliranja:

- proizvodnja energije,
- upravljanje nanosom i morfologijom akumulacije,
- zaštita životne sredine i
- modeliranje režima podzemnih voda u priobalju.

Upravo ova višedimenzionalna strukturisanost omogućava uspostavljanje holističkog pristupa, gde svi aspekti rada hidroenergetskog sistema — tehnički, ekološki i bezbednosni — bivaju razmatrani paralelno kroz međusobno povezana modelovanja i servise.

Hidrauličko-hidroenergetski model predstavlja centralni deo i omogućava simulaciju tokova vode i proizvodnje energije u realnom vremenu, uključujući spregnute proračune preko numeričkog solvera. Ovi proračuni koriste se ne samo za analizu trenutnog stanja, već i za generisanje optimalnih planova eksploatacije u skladu sa ograničenjima sistema i zahtevima elektroenergetskog tržišta. Pored toga, modeli transporta nanosa (1D, 2D i 3D), kvaliteta vode i zagađenja omogućavaju naprednu

analizu promena morfologije rečnog korita, sedimentacije i lokalnih efekata u zoni brane, dok hidrogeološki modeli omogućavaju procene infiltracije i dinamike podzemnih voda u priobalju.



Slika 3. Struktura sistema za podršku integralnom upravljanju

U okviru istog sloja, servisi za asimilaciju merenja omogućavaju automatsko ažuriranje modelskog stanja u realnom vremenu na

osnovu ulaznih podataka iz mernog sistema (SCADA, IoT, manualna akvizicija), dok servisi za optimizaciju obezbeđuju donošenje odluka uzimajući u obzir višekriterijumske ciljeve (npr. maksimizacija proizvodnje, minimizacija rizika, balansiranje zaliha). Ovi servisi direktno komuniciraju sa proračunskom bazom podataka i korisničkim alatima.

Konačno, korisnički alati omogućavaju interaktivnu analizu, operativno upravljanje, dugoročno planiranje i diseminaciju informacija — čineći tako digitalni blizanac ne samo tehničkim alatom, već i platformom za donošenje odluka u kontekstu održivog razvoja, zaštite vodnog okruženja i energetske tranzicije.

V ZAKLJUČAK

Savremeni pristup u upravljanju hidroenergetskim sistemima podrazumeva da njihovo korišćenje doprinosi društvenom razvoju uz dugoročno očuvanje prirodnih resursa. Primenom holističkog pristupa u upravljanju ovim sistemima kroz uvođenje sistema za podršku integralnom upravljanju može se obezbediti usaglašenost upravljačkih odluka sa društvenim i ekološkim ograničenjima na način kako to ranije nije bilo moguće bez integracije podataka, matematičkih modela i namenskih alata.

Postojeći sistem za podršku odlučivanju koji se nalazi u primenu na objektima HEPS Đerdap predstavljaju zaokruženo rešenje za upravljanje podacima koje omogućava korišćenje podataka u proračunima u uslovima bliskim realnom vremenu, dok se podaci mogu koristiti i za dugoročne analize i what-if scenarije. Zahvaljujući detaljnom hidrauličko-hidroenergetskom modelu i mehanizmima asimilacije podatka u modele može se reći da ovaj sistem odlikava ponašanje objekata HEPS „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“, pa se na taj način može klasifikovati kao digitalni blizanac pomenutih objekata u pogledu hidroenergetike.

Proširenjem obuhvata na osmatranja vezana za režim podzemnih voda u priobalju i količine i kvalitet nanosa i druge ekološke pokazatelje, kao i razvojem odgovarajućih matematičkih modela koji modeliraju relevantne procese, sistem se može približiti konceptu opšteg digitalnog blizanca koji može pružiti informacije potrebne za donošenje odluka u svim važnim aspektima upravljanja HEPS „Đerdap“.

Koristi razvoja i primene ovakvog sistema mogu biti višestruke, a posebno u pogledu usaglašenosti, pouzdanosti i ponovljivosti numeričkih proračuna na osnovu kojih se mogu donositi upravljačke odluke. Dodatno, u pogledu donošenja strateških odluka u pogledu razvoja sistema mogu se efikasno usaglašavati različita ograničenja i uzeti u obzir i promene u vodnim režimima i zahtevima tržišta, a sve u cilju obezbeđivanja zaštite ekosistema, održivog društvenog razvoja i finansijske stabilnosti.

LITERATURA

- [1] Rešenje o odobrenju Protokola o zaključcima Delegacija Jugoslavije i Rumunije o iskorišćavanju voda Dunava u Đerdapskom sektoru, Međunarodni ugovori FNRJ, Sveska br. 75, 1957. str. 65-66 (potpisanog u Oršavi 1956. godine). http://arhiviranisajt.msp.gov.rs/sr/images/stories/bilateral_ugovori/rumunija_vazeci.pdf [pristupljeno 12.02.2025]
- [2] Sporazum između SFR Jugoslavije i SR Rumunije o izgradnji i eksploataciji Hidroenergetskog i plovidbenog sistema Đerdap na reci Dunav, potpisanog 30. novembra 1963. godine, ratifikovanog dana 17. juna

1964. godine, koji je stupio na snagu 16.7.1964. godine, Dodatak Sl. lista br. 11/1964; Zbirka ugovora OUN, Sveska 512.
http://arhivisanisajt.msp.gov.rs/sr/images/stories/bilateral_a_ugovori/rumuniji_a_vazeci.pdf [pristupljeno 12.02.2025]
- [3] Zakon o potvrđivanju Konvencije između Savezne vlade Savezne Republike Jugoslavije i Vlade Rumunije o eksploataciji i održavanju hidroenergetskih i plovidbenih sistema Đerdap I i Đerdap II sa priložim., Sl. list SRJ - Međunarodni ugovori, br. 7/1998-19, od 16. maja 1998. godine.
http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2006_03/t03_0112.htm [pristupljeno 12.02.2025]
- [4] Pravilnik o organizaciji i radu ZDSE, 1998.
- [5] Pravilnik o organizaciji i radu ZDSP, 1988.
- [6] Pravilnik o organizaciji i načinu rada KZP, 1999.
- [7] Milivojević, N., Milivojević, V., Tripković, V., Prodanović, D., Marjanović, D. General platform for hydroinformatics systems – a review of concept, in Proc. *Contemporary Water Management: Challenges and Research Directions, International Scientific Conference in the Honour of 75 Years of the Jaroslav Černi Water Institute*, Belgrade, Serbia, October 19-20, pp. 249-267, 2022.
https://grafar.grf.bg.ac.rs/handle/123456789/2832?locale-attribute=sr_RS [pristupljeno 14.02.2025]
- [8] Kabeyi, M.J., Olanrewaju, O.A. Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply, *Frontiers in Energy Research*, Vol. 9, 743114 2022.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>
- [9] Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine. <https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/skupstina/strategija/2024/94/1> [pristupljeno 14.02.2025]
- [10] Tao, F., Qi, Q., Liu, A., Nee, A.Y.C.. Digital Twins and Cyber-Physical Systems Toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison, *Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 653-661, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- [11] Hydropower Digital Twins Solution Helps with Operator Challenges. <https://www.pnnl.gov/news-media/hydropower-digital-twins-solution-helps-operator-challenges> [pristupljeno 21.02.2025]
- [12] Grieves, M., Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., Alves, A. (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, Cham, pp. 85-113, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- [13] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 11, pp. 1016-1022, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- [14] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C. Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 108952-108971, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- [15] Boschert, S., Rosen, R. Digital Twin - The Simulation Aspect, in: Hehenberger, P., Bradley, D. (Eds.), *Mechatronic Futures*, Springer, Cham, pp. 59-74, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- [16] Madni, A.M., Madni, C.C., Lucero, S.D. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering, *Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 7, 2019. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>

AUTORI

dr Nikola Milivojević, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, nikola.milivojevic@jcerni.rs, ORCID [0000-0001-5330-1219](https://orcid.org/0000-0001-5330-1219)
prof. dr Dejan Divac, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, dejan.divac@jcerni.rs, ORCID [0000-0002-1578-1431](https://orcid.org/0000-0002-1578-1431)
prof. dr Boban Stojanović, Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Kragujevcu, boban.stojanovic@pmf.kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2901-0061](https://orcid.org/0000-0003-2901-0061)
prof. dr Prvoslav Marjanović, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, prvoslav.marjanovic@jcerni.rs, ORCID [0009-0002-2446-0418](https://orcid.org/0009-0002-2446-0418)
dr Brankica Majkić-Dursun, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, brankica.majkic-dursun@jcerni.rs, ORCID [0000-0003-1518-5557](https://orcid.org/0000-0003-1518-5557)
Dragan Stanković - Akcionarsko društvo Elektroprivreda Srbije, dragan.stankovic@eps.rs

A Holistic Approach to Managing the Iron Gate Hydropower and Navigation System

Abstract - The Iron Gate Hydropower and Navigation System (composed of HPP “Iron Gate 1” and HPP “Iron Gate 2”) not only greatly influences water levels along a more than 300 km stretch of the Danube River but also affects groundwater regimes in wide coastal areas and the functioning and changes of ecosystems in the impounded zone. At the same time, it acts as a retention area for sediment and various types of pollutants originating from upstream parts of the basin, transported by the Danube and its tributaries. The construction of the Iron Gate 1 and Iron Gate 2 hydropower and navigation systems permanently altered the natural conditions within the reservoirs and in the surrounding coastal areas, leading to certain negative consequences. These include increased groundwater levels in the coastal zone, threatening settlements, industrial, municipal, and transport infrastructure, and causing waterlogging of agricultural land; raised flood levels due to sediment deposition within the reservoir; threats to the stability of flood defence dikes and high banks; and changes in the river biocenosis, among others. From the outset, the highly complex task of managing these transboundary systems and their impact on the environment has required significant efforts to regulate interstate and international obligations, as well as to reconcile often conflicting interests. This paper presents the principles of a holistic management approach, which, in addition to the primary purpose of energy production, emphasizes handling all other relevant aspects: groundwater regimes in the riparian land, sediment management—both in terms of quantity and quality—and more. The management approach is defined by considering all existing technical systems relevant to these issues. In accordance with the defined principles, the paper also presents the structure of a software/hardware management support system based on existing technical systems that encompass a large number of interconnected hardware and software components, measuring instruments, and users.

Index terms - Hydropower system management, Holistic approach, Decision support systems