

## ASIMILACIJA RAČUNSKOG MODELA DUNAVA OD NOVOG SADA DO HE „ĐERDAP 1“ U Približno realnom vremenu – Rezultati testiranja

Nikola ROSIĆ, Dušan PRODANOVIĆ  
Građevinski fakultet u Beogradu  
Boban STOJANOVIĆ  
Prirodno-Matematički fakultet u Kragujevcu  
Dragana OBRADOVIĆ  
Institut za Vodoprivredu „Jaroslav Černi“

### REZIME

U radu se predstavlja jedna od mogućih metoda asimilacije, korišćenja kontinualnih merenja nivoa vode duž Dunava za ažuriranje numeričkog modela tečenja Dunavom od Novog Sada do HE „Đerdap 1“, napravljenog za potrebe HIS „Đerdap“. Opisana metoda omogućava kontinualno, u realnom vremenu, usaglašavanje stanja računskog modela i stvarnog sistema, putem postepene korekcije nivoa promenom nepouzdatih dotoka u modelu. Korekcije se izračunavaju korišćenjem PI (eng. Proportional Integral) kontrolera koji su postavljeni na mestima gde postoje pouzdana merenja nivoa. U radu se prikazuju dobijeni rezultati testiranja primenjene metode za asimilaciju podataka pri različitim scenarijima promene protoka (odnosno, nepoznatog dotoka) na delu Dunava od Novog Sada do hidroelektrane „Đerdap“. Testiranja su sprovedena sa različitim brojem kontrolera, kako bi se jasno video njihov efekat, stabilnost i efikasnost asimilacije. Na kraju rada se daju preporuke za dalja poboljšanja metodologije.

**Ključne reči:** simulacioni model, model tečenja Dunavom, asimilacija podataka, HIS Đerdap

### 1. UVOD

Računski model tečenja, koji kombinuje hidrodinamički model otvorenih tokova Dunava sa pritokama od Novog Sada i hidroenergetski model hidrocentrala, razvijen za potrebe HIS „Đerdap“, služi kao alat za prognozu rada sistema, čime se pruža podrška planiranju rada hidroelektrana „Đerdap 1“, „Đerdap 2“ i „Gogoš“ [1]. Računski model je kalibrisan korišćenjem većeg broja

izabраних историјских временских серија, које су претходно билансиране (улази у систем, излаз и стање система) и поправљене од разних грешака у мерењима. Да би се тако калибрисан модел користио у реалном времену, за потребе прогнозе и избора оптималног рада хидроелектрана, неопходно је располагати са „тачним“ улазима у систем, излазима из система и нивоима дуж система. На жалост, од те три групе битних података, једино су излази релативно поуздани (док не дође до преливања брана). Мерења нивоа дуж Дунава су углавном поуздана, осим уколико не дође до кvara на мernим instrumentима или прекida преноса података и застоја у аквизицији. Најproblemатиčнији су подаци о dotocima јер ни на једном профилу Дунава, Tise, Save или Velike Morave не постоји стварно мерење протока већ је dotok резултат прерачунавања са криве протока. Како би прогноза рада хидроелектрана била validна, потребно је и у условима непouzdatих dotoka, а „pouzdanijih“ мерених нивоа и протока на излазу из система, располагати са računским моделом који верно oslikava trenutna stanja sistema. Procena stanja sistema korišćenjem postupka asimilacije podataka је proces kontinualnog usaglašavanja stanja računskog modela sa stvarnim sistemom, kontinualnim dovođenjem proračunskog modela u stanje koje верно reprodukuje rad sistema u bliskoj prošlosti pa sve do sadašnjeg trenutka. Pri tome се u postupku asimilacije vodi računa о neodređenosti modela [2] i мерења.

Asimilacija podataka predstavlja proces utvrđivanja „najverovatnijeg“ stanja sistema koje se predstavlja vektorom  $x_{asimilacija}$ , na osnovu procenjenih rezultata merenja  $x_{merenja}$ , sa svojim neizvesnostima, i modeliranja sistema  $x_{prognoza}$  [3]. Tako se, kombinujući ograničen broj merenja veličina koje definišu stanje sistema i rezultate modeliranja, dobijaju stanja  $x_{asimilacija}$  koja

imaju manju neizvesnost od stanja  $x_{merenja}$  i  $x_{prognoza}$  pojedinačno.

U naučnoj literaturi se u najpopularnije metode za asimilaciju podataka ubrajaju: postupci zasnovani na upotrebi Kalmanovog filtera, metode u kojima se koristi „čestični“ filter (eng. particle tracking) i varijaciona asimilacija podataka (Hutton i saradnici u svom radu daju opširan pregled metoda za asimilaciju i njihova poređenja [4]). Primena asimilacije podataka u upravljanju vodoprivrednim sistemima se pre svega vezuje za upotrebu prve dve metode, dok se treća metoda uglavnom primenjuje u predikciji vremenskih uslova.

Izvorni oblik Kalmanovog filtera podrazumeva upotrebu linearnih relacija koje opisuju promenu stanja sistema. Da bi se izvorni oblik Kalmanovog filtera primenio u analizi stanja vodoprivrednih sistema, koji se najčešće opisuju nelinearnim relacijama, model sistema se mora linearizovati. Na ovaj način se dobija tzv. prošireni Kalmanov filter (eKF). Upravo ovaj postupak je uspešno primenjen u asimilaciji podataka čiji su rezultati korišćeni u automatskoj regulaciji protoka i nivoa u sistemu za navodnjavanje [5]. Da bi se u ovom primeru iz literature upotrebio Kalmanov filter, neophodno je bilo linearizovati San Venanove jednačine strujanja.

Prošireni Kalmanov filter uspešno je primenjen i u slučaju vodoprivrednog sistema koji se sastoji iz niza hidroelektrana na reci Roni [6]. Pokazano je da se na osnovu linearizovanih San Venanovih jednačina i merenja nivoa duž razmatrane rečne deonice između dve hidroelektrane može na zadovoljavajući način predvideti stanje sistema u različitim realnim scenarijima. U primeru su razmatrani sledeći slučajevi:

- relativno velika neizvesnost u proceni početnog stanja sistema,
- otkaz senzora za merenje nivoa i
- nepoznavanje protoka na pritokama.

Na istom primeru vodoprivrednog sistema [6] primenjen je i metod za asimilaciju zasnovan na upotrebi čestičnog filtera. Za razliku od Kalmanovog filtera, upotrebene su „pune“ San Venanove jednačine strujanja (nelinearan model). U istim analiziranim scenarijima, čestični filter, čija upotreba podrazumeva primenu Monte Karlo simulacija za određivanje neizvesnosti modela, je upotrebljen kao referentni metod za poređenje sa proširenim Kalmanovim filterom. Međutim, u zavisnosti od načina generisanja „slučajnih“ scenarija,

metoda čestičnog filtera može da bude relativno spora jer je vreme potrebno za asimilaciju podataka značajno duže. To može da bude značajno ograničenje sa stanovišta upotrebe asimilacije u realnom vremenu, gde je neophodno kontinualno podešavanje modela.

U domaćoj praksi, upotreba proširenog Kalmanovog filtera je testirana na primeru hidrološkog modela sliva reke Drine [7]. S obzirom na nepouzdanu ulaznu podatke, sam hidrološki model je imao veliku neizvesnost. Kao ukupan rezultat, asimilacija podataka na primeru hidrološkog modela Drine je dala nestabilan model za predikciju.

Na osnovu iskustava koja su predstavljena u naučnoj literaturi, mogu se preporučiti dva pristupa u asimilaciji podataka [8]. Jedan pristup, zasnovan na primeni proširenog Kalmanovog filtera, u kojem se koristi linearizovan model za asimilaciju, i drugi, zasnovan na upotrebi „punog“ nelinearnog modela za predikciju i Monte Karlo simulacija za procenu neizvesnosti. Ukoliko bi se koristio linearizovani model, bilo bi potrebno napraviti uprošćeni model Dunava, sa manje segmenata (deset do dvadeset segmenata), i linearizovati ga u pojedinim rasponima dubina. Tako napravljene (nove) modele (tri do četiri modela) bi trebalo ponovo kalibrirati, svaki model posebno za različite uslove (protoke i dubine). Asimilacijom bi se korigovale samo dubine (zapremine) u pojedinim segmentima, dok bi se ulazni protoci zadržavali u okviru vrednosti koje su date zvaničnim podacima. Druga varijanta koja podrazumeva menjanje dotoka u sistem dok se ne postigne dobro poklapanje merenih i računatih stanja (nivoa), nije preporučljiva jer korišćenjem uprošćenog (segmentno - linearizovanog) modela nije moguća kvalitetna kontrola (odnosno „upravljanje“) stanja preko nepoznatog dotoka, pa postoji velika šansa da se asimilacijom dobije oscilovanje dotoka.

Osnovni nedostatak primene linearnog Kalmanovog filtera leži u neophodnoj linearizaciji složenog sistema, što generiše, kao što je prethodno objašnjeno, niz novih problema. Takođe, rezultate asimilacije na linearnom modelu je potrebno „prebaciti“ u nelinearan model koji se koristi u optimizaciji, čime se značajno koplikuje model za upravljanje radom hidroelektrana. S obzirom da se ne „asimiluju“ dotoci u sistem, već samo nivoi, potrebna je i naknadna obrada kojom se prati stepen korekcije zapremine u pojedinim segmentima. Tako je zapremine, u relativno dugom periodu, potrebno „dodavati“ ili „oduzimati“ pre korekcije dotoka u sistem.

Druga opcija je upotreba „punog“ (neuprošćenog), nelinearnog, simulacionog modela Dunava, od Novog Sada do HE „Đerdap 1“. To bi podrazumevalo korišćenje Monte Karlo simulacija (verovatno oko 1000 simulacija) za procenu osetljivosti i propagaciju neizvesnosti, u svakom vremenskom računskom koraku (na svakih par minuta računskog koraka). Prednosti su sledeće:

- koristi se isti računski model koji je već kalibrisan,
- jednostavno se kombinuju neodređenost modela i neodređenost merenih podataka, pri čemu se neodređenost merenih podataka može menjati iz koraka u korak,
- moguća asimilacija ili nivoa ili protoka,
- mereni podaci, koji se odnose na jedan računski profil, se posredno interpoluju na ceo sistem u odnosu na trenutno stanje sistema i njegovu osetljivost na promene nivoa.

Iako ima niz prednosti, ovakav postupak je računski izuzetno zahtevan pa je postupak asimilacije nepraktičan za svakodnevnu upotrebu u planiranju rada HE „Đerdap 1“ i HE „Đerdap 2“. Analizom dobrih strana obe navedene opcije, dolazi se do zaključka da je neophodno koristiti isti (nelinearni) model u asimilaciji i optimizaciji, te da je zbog ubrzanja proračuna neophodno „zaobići“ analizu osetljivosti modela po svakom preseku i u svakom vremenskom koraku.

U ovom radu se daje prikaz rešenja za asimilaciju koje je upotrebljivo u približno realnom vremenu, koristi „puni“ simulacioni model i uzima u obzir da su ulazni dotoci nepouzdana veličine. Opisana metoda omogućava da se u približno realnom vremenu, na osnovu kontinualnih merenja nivoa duž Dunava, čime se praktično sa velikom pouzdanošću direktno „meri“ stanje sistema (modela), obavi postupak korekcij stanja modela. Metoda se oslanja na robusnost numeričkog modela tečenja preko kojeg se obavlja simulacija propagacije poremećaja u toku nastalih promenama stanja sistema. U radu se daje objašnjenje primenjnog postupka asimilacije kao i niz testova sprovedenih nad modelom.

## 2. METODA ASIMILACIJE MERENIH PODATAKA

Umesto primene stohastičkog pristupa u asimilaciji, za ažuriranje stanja numeričkog modela Dunava u okviru Hidroinformacionog sistema „Đerdap“ primenjen je heuristički postupak koji se zasniva na postepenom usaglašavanju nivoa u računskom modelu i kota nivoa izmerenih na stvarnom sistemu (Slika 1). S obzirom da su ulazni dotoci u Dunav veličine sa najvećom

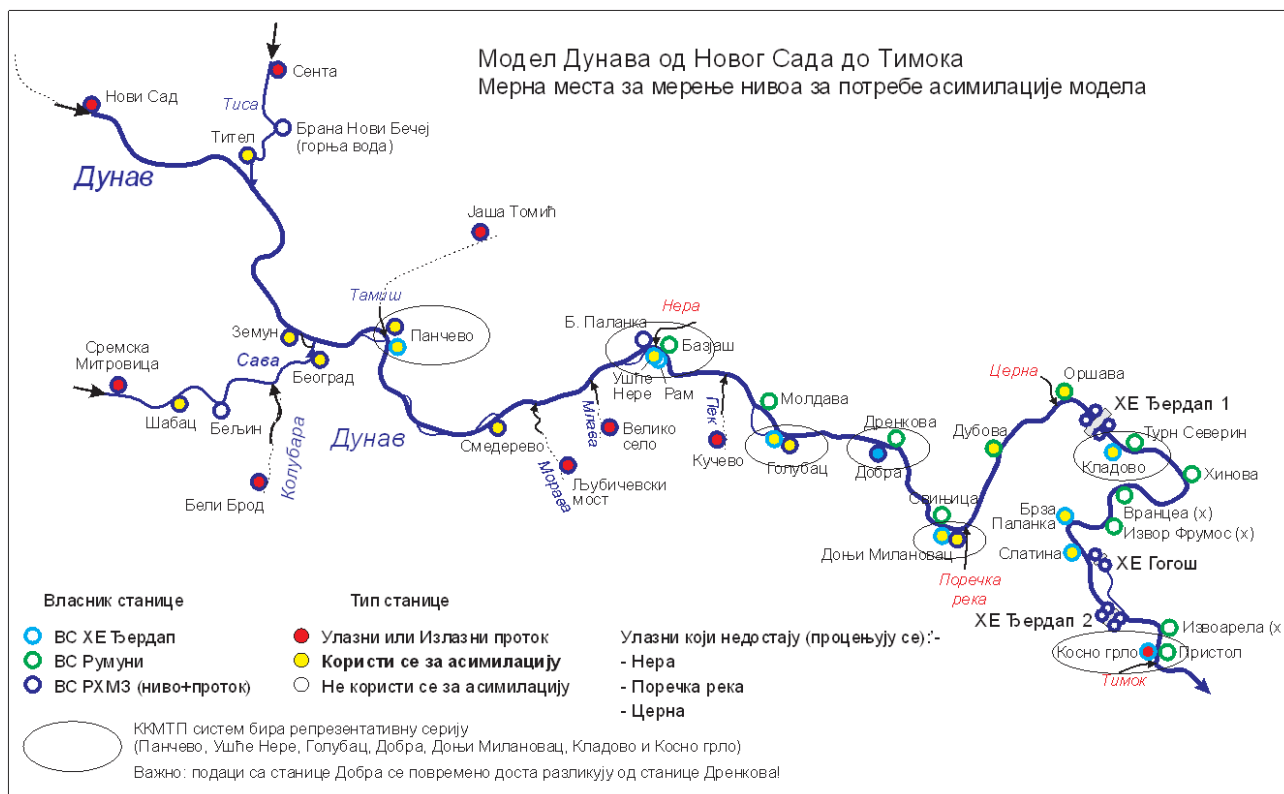
neizvesnošću, jer se protoci dobijaju isključivo kao rezultat merenja dubina i primene krivih protoka, ažuriranje modela se obavlja kroz postepenu promenu protoka (povećanjem ili smanjenjem) na mestima gde se u sistemu mere nivoi. Osnovni preduslov za korišćenje ovog postupka je da su izmerene kote sa velikom pouzdanošću. Međutim, potrebno je skrenuti pažnju da se, time što je korekcija postepena, računskom modelu „daje“ određeni stepen poverenja.



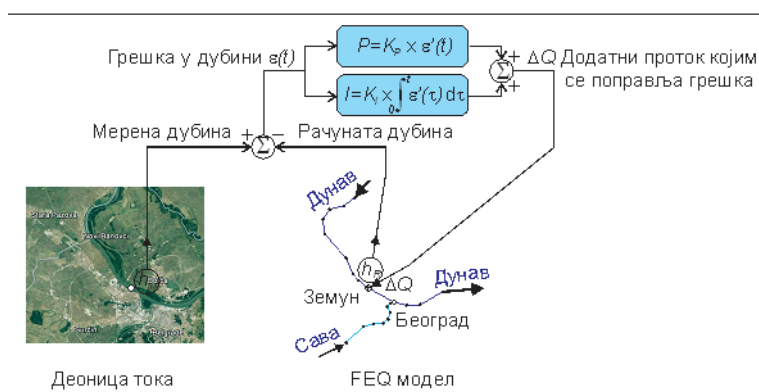
Slika 1. Nivo Dunava kod Golubca – meren nivo i nivo koji je rezultat modela sa postepenom asimilacijom

Na Slici 1 je prikazan primer postepenog ažuriranja modela Dunava, sa ciljem da se na kraju perioda „zaletanja“ modela, minimiziraju razlike u „stanju“ sistema koje se predstavljaju razlikama kota nivoa, koje, što je od praktičnog značaja, određuju raspoložive zapremine vode za rad HE Đerdap. Kada se pokrene prethodno kalibrisan model, zbog nepouzdanosti podataka o trenutnim dotocima, kao i zbog sezonske i prostorne varijabilnosti vrednosti hidrauličkih parametara modela, neizbežno je određeno odstupanje u računskim dubinama (na Slici 1, datum 06-01-2010). Primenom asimilacije, te razlike se postepeno smanjuju (do 16-01-2010), da bi po isteku perioda kontinualne asimilacije, odnosno, do „sadašnjeg trenutka“ (21-01-2010) imali model koji sa minimalnom greškom stanja reprezentuje naš sistem. Od tog trenutka, ulazi se u period prognoze rada sistema (buduće stanje, sa prognoziranim dotocima, ne postoje merenja nivoa) sa početnim stanjem modela koje je pouzdanije u odnosu na stanje koje bi se procenilo bez upotrebe asimilacije.

Računski model tečenja Dunavom se zasniva na programskom kodu FEQ (Franz, Melching, 1997) u okviru kojeg se rešavaju „pune“ (nelinearne) jednačine linijskog tečenja. Model je dopunjen hidro-energetskim modelom rada hidroelektrana i preliva, kao unutrašnjim graničnim uslovom. Na Slici 2 je prikazana skica modela, sa lokacijama dotoka u sistem i mestima gde se obavljaju merenja nivoa vode.



Slika 2. Granice matematičkog modela sa dotocima i podacima o nivoima



Slika 3. Primenjeni PI kontroler sa korekcijom protoka preko fiktivne čvorne veze

Korigovanje merenog nivoa se u FEQ modelu radi kroz uvođenje posebnog unutrašnjeg graničnog uslova (Slika 3). Preko ovog unutrašnjeg graničnog uslova (dodatnog čvora) posredno se menjaju kote nivoa tako što se u izabranom čvoru dodaje (ili oduzima) fiktivni protok  $\Delta Q$ .

Uobičajeno je da se u implementaciji kontrole realnih fizičkih sistema koristi PID (eng. Proportional Integral

Derivative) kontroler, koji stepen korekcije postepeno menja prilagođavajući finalnoj potrebnoj vrednosti uz istovremenu mogućnost „bržeg“ rada ako su razlike u očekivanom i računskom stanju prevelike. U oblastima gde postoji velika verovatnoća da se pojave smetnje (šum) u merenim stanjima (šum u merenim podacima o nivoima reke), uglavnom se ne koristi deo kontrolera čiji izlaz zavisi od brzine promene greške (nagiba, odnosno, prvog izvoda), tako da se u ažuriranju stanja

modela Dunava primenjuje PI (eng. Proportional Integral) kontroler:

$$\Delta Q(t) = K_P \cdot \varepsilon'(t) + K_I \int_0^t \varepsilon'(\tau) d\tau$$

U izrazu za PI kontroler,  $\varepsilon$  predstavlja odstupanje nivoa dobijenog primenom računskog modela od izmerenog nivoa, dok su  $K_P$  i  $K_I$  konstante koje se određuju u fazi kalibracije sistema (Slika 3). Veće vrednosti znače da kontroler „brže“ dodaje veće količine vode u sistem ukoliko su računski nivoi manji od merenih, i obrnuto. Prva procena za model Đerdapa je da je proporcionalni član u opsegu  $250 < K_P < 1500$  a integrativni član  $0,5 < K_I < 1,5$ . U slučaju kada su merenja nižeg kvaliteta može se smanjiti efektivna „brzina“ odziva kontrolera.

### 3. TESTIRANJE ALGORITMA ASIMILACIJE MERENIH PODATAKA

Opisani postupak asimilacije, gde se korišćenjem PI kontrolera u izabranom preseku dodaje ili oduzima protok u skladu sa razlikom u nivoima, predstavlja složeni dinamički sistem. U ovom radu se daju rezultati prvih testiranja modela, kroz pojedine faze, da bi se sagledao uticaj kontrolera na stanje ukupnog sistema kao i međusobni uticaj kontrolera.

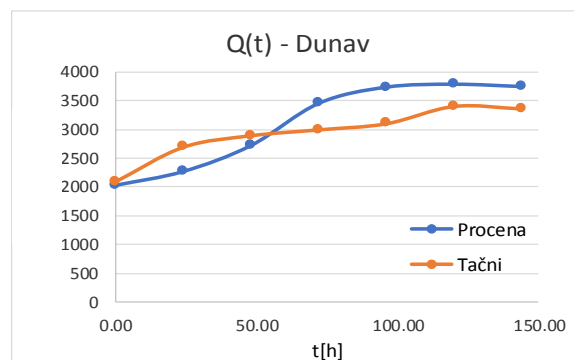
Za test se koristi kompletan, neuprošćen model Dunava od Novog Sada do HE „Đerdap 1“ i model Save od Sremske Mitrovice do Beograda. Testiranje se obavlja koristeći kalibracionu epizodu sa „srednjim“ i „stabilnim“ protocima (period 25.8.2014. – 28.8.2014.). Nivoi koji su dobijeni primenom FEQ modela Dunava za taj period, se nazivaju „tačnim“ odnosno „merenim“ dubinama. Zatim se ulazni protoci (Slike 4, 5 i 6) namerno „kvare“, unosi se neizvesnost u te protoke (na slikama se nazivaju „Procenjeni protoci“), da bi se analizirala asimilacija u uslovima kada su ulazni podaci dobijeni od RHMZ-a za trenutne protoke pogrešni.

Testirani su sledeći slučajevi:

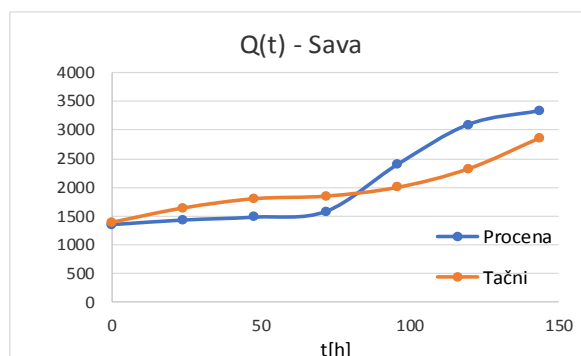
A. Asimilacija kompletnog modela Dunava koristeći samo jedan kontroler na profilu Zemun. Dotok Dunavom kod Novog Sada kao i dotok Savom kod Sremske Mitrovice su u prvom periodu potcenjeni, a u drugom periodu simulacije precenjeni (plava linija na Slikama 4 i 5). Na Velikoj Moravi se koristi konstantan dotok, bez talasa (Slika 6, plava linija je i tačna vrednost i procenjena vrednost). Pretpostavka je da su eventualne neodređenosti u dotoku

Dunavom i Savom po apsolutnoj vrednosti najveće i da će samo jedan kontroler uspevati da značajno popravi stanje modela.

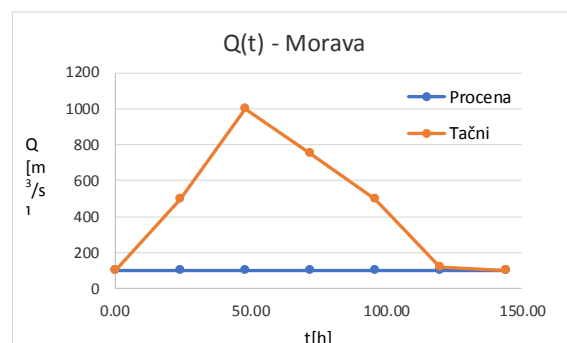
B. Istovremena korekcija na tri lokacije (profili: Zemun, Pančevo i ušće Nere). Dotok Dunavom i Savom je kao u slučaju A (Slike 4 i 5), a dotok Velikom Moravom simulira postojanje poplavnog



Slika 4. Promena ulaznog protoka Dunava kod Novog Sada ( $-\Delta Q = 420 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $+\Delta Q = 633 \text{ m}^3/\text{s}$ )



Slika 5. Promena ulaznog protoka Save kod Sremske Mitrovice ( $-\Delta Q = 323 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $+\Delta Q = 772 \text{ m}^3/\text{s}$ )



Slika 6. Promena ulaznog protoka Save kod Sremske Mitrovice (simuliran veliki poplavni talas)

talasa koji se stvarno dogodio, a podaci koji stižu od RHMZ-a pokazuju kao da je bio konstantan protok (Slika 6). Sva tri kontrolera su nezavisna, nema „razmene informacija“ između njih. Cilj testa je da se vidi da li nizvodni kontroleri dobro reaguju na njihove uzvodne poremećaje, kao i to da li je sprega više nezavisnih kontrolera stabilna.

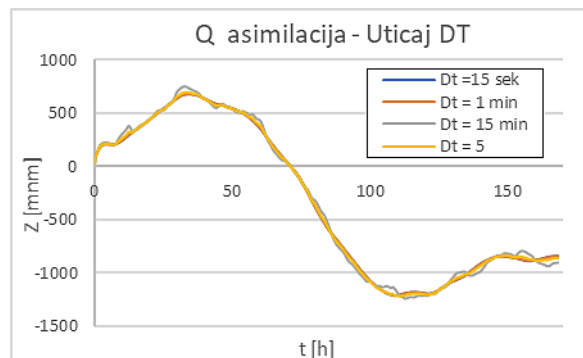
- C. Svi dotoci su sa „greškama“ kao u slučaju B, ali je i podatak o protoku na HE „Đerdap 1“ pogrešan: umesto da HE radi u redovnom dnevnom režimu, model dobija podatke kao da je protok konstantan i jednak 3000 m<sup>3</sup>/s. Ovo je najoštiji test, sa veštački zadatom „greškom“ u protoku na izlaznom profilu u rasponu od -70% do +170% (tačan protok koji je bio u opsegu od 1000 m<sup>3</sup>/s do 8000 m<sup>3</sup>/s je zamenjen „pogrešnim“ konstantnim protokom od 3000 m<sup>3</sup>/s).

### 3.1. Test A

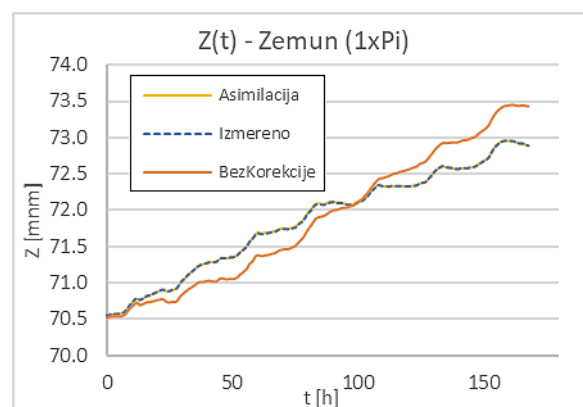
Korišćeni ulazni hidrogrami (Slike 4 i 5) u jednom periodu su sa potcenjenim protokom a u drugom sa precenjenim. Trenutak prelaska iz potcenjenog u precenjeni protok je različit, na Dunavu u 54-tom satu a na Savi u 83-ćem satu.

U testu su parametri PI kontrolera:  $K_p = 1000$  i  $K_I = 1,0$ . S obzirom da se metoda asimilacije oslanja na numeričku metodu i njenu sposobnost da propagira poremećaje, prvo je analiziran uticaj vremenskog koraka asimilacije. Rezultati analize su prikazani na Slici 7. Prikazane krive koje se odnose na proračun sa računskim korakom od 15 sekundi prate izmerene vrednosti. Nešto veća odstupanja od izmerenih vrednosti se dobijaju za slučaj kada se koristi vremenski korak od 15 minuta. Na osnovu prikazanih rezultata za dalje analize je usvojen vremenski računski korak asimilacije od 5 minuta. Ista vrednost je korišćena i kao vremenski korak numeričke simulacije tečenja.

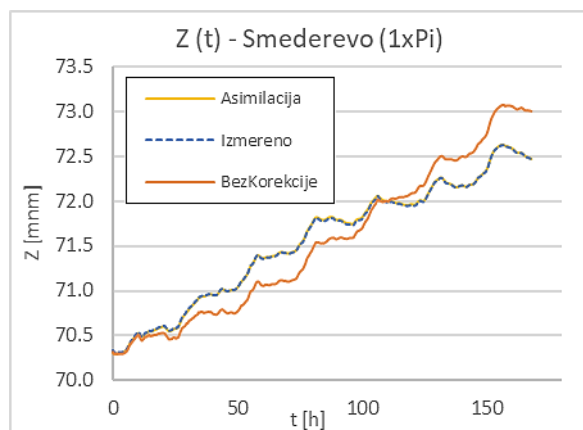
Na profilu stanice Zemun, kod jedinog kontrolera u sistemu, kote dobijene asimilacijom su gotovo identične sa izmerenim (Slika 8). Manja odstupanja kote dobijenih asimilacijom od izmerenih kote se mogu zapaziti u nizvodnim profilima (prikazani su nivoi kod Smedereva, Slika 9). Na Slici 10 su prikazani i protoci kod Smedereva. Očekivano, protoci nizvodno od mesta gde se vrši korekcija kote (dodaju ili oduzimaju protoci) se posle asimilacije poklapaju sa „tačnim“ vrednostima, odnosno, uneta „greška“ u ulaznim protocima se otklanja. Na Slici 10 se vidi i jasan uticaj rada HE „Đerdap 1“, pri čemu dnevna varijabilnost ne utiče na rad asimilacije.



Slika 7. Uticaj vremenskog koraka u asimilaciji na protok kod Zemuna

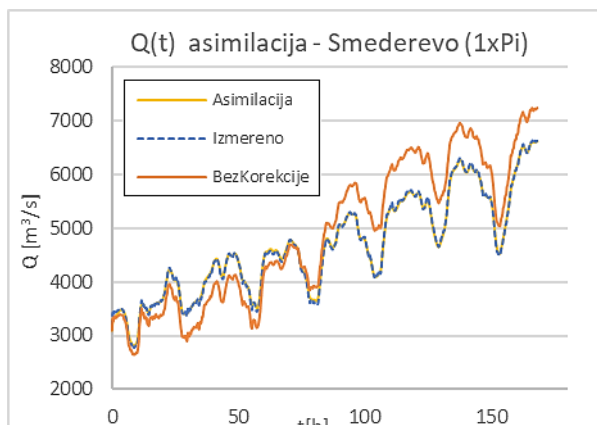


Slika 8. Nivoi kod Zemuna bez asimilacije i sa asimilacijom



Slika 9. Nivoi na Dunavu kod Smedereva tokom asimilacije kod Zemuna

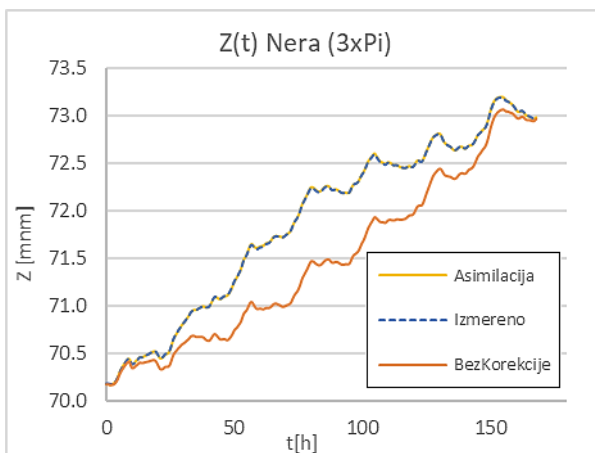




Slika 10. Protok Dunavom kod Smedereva tokom asimilacije kod Zemuna

### 3.2. Test B

Pored kontrolera na profilu Zemun, aktivirana su još dva kontrolera, kod Pančeva i na ušću Nere. Zadržani su „pogrešni“ dotoci Dunavom i Savom, dok je testiran odgovor sistema na mogući poplavni talas koji nailazi Velikom Moravom a za koji se ne dobijaju korektni podaci od RHMZ-a. Formiran je veštački talas (Slika 6, narandžasta linija) i urađena je simulacija tečenja Dunavom (i na ulazima u Dunav i Savu se koriste „tačni“ protoci, narandžaste linije na Slikama 4 i 5). Dobijeni nivoi su proglašeni tačnim nivoima, a zatim se u asimilaciju ulazi sa „pogrešnim“ protocima, plave linije na Slikama 4, 5 i 6.



Slika 11. Nivoi kod ušća Nere sa i bez asimilacije (asimilacija kod Zemuna, Pančeva i Nere)

Dobijeni rezultati pokazuju da postupak asimilacije radi stabilno. Kontroler nizvodno od ušća Velike Morave (na ušću Nere, Slika 11) u potpunosti koriguje „grešku“ u ulaznom dotoku Velike Morave, i na taj način tačno rekonstruiše poplavni talas.

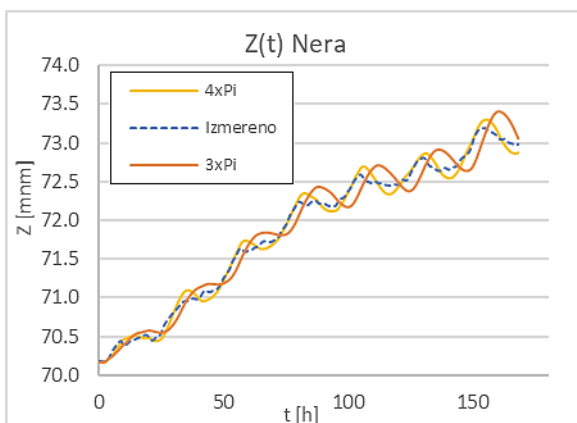
### 3.3. Test C

Poslednji test proverava odgovor sistema na nepoznat nizvodni granični uslov. Dosadašnje pretpostavke (prva dva testa) su bile da je nizvodni protok na HE „Đerdap 1“ poznat sa velikom dozom sigurnosti, dok su ulazni dotoci znatno nesigurniji. U trećem testu je pretpostavka da su i izlazni protoci nesigurni. U ovom testu se razmatra situacija kada se „pogrešno“ zada da je protok na HE „Đerdap 1“ konstantan i iznosi  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ , dok su u tom periodu mereni nivoi duž Dunava, prema kojima se radi asimilacija, za slučaj realnog, redovnog režima rada elektrane sa varijabilnim protokom od  $3000$  do čak  $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

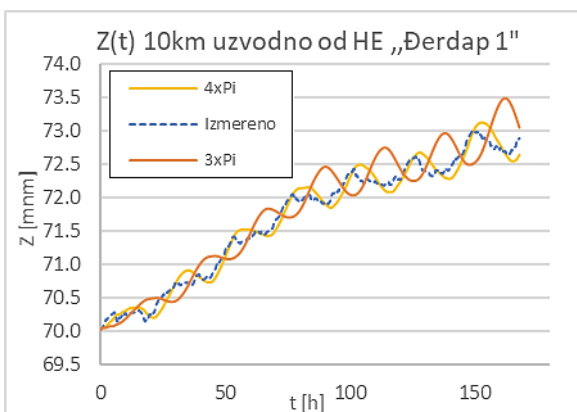
Parametri svih kontrolera su:  $K_P = 500$  i  $K_I = 1,0$ . Prva testiranja sa tri kontrolera (Slika 12) su pokazala da asimilacija ne uspeva da održi nivo u odnosu na merene nivo, posebno u zoni od ušća Nere do HE „Đerdap 1“. Zbog toga je aktiviran i četvrti kontroler, približno  $10 \text{ km}$  uzvodno od HE „Đerdap 1“. Pri tome, sva četiri kontrolera su nezavisna, bez međusobnih sprega (feed forward ili feed backward tipa).

Na Slikama 12 i 13 su prikazani nivoi kod ušća Nere i na  $10 \text{ km}$  uzvodno od HE „Đerdap 1“. Isprekidanom linijom su predstavljeni mereni nivoi, narandžastom linijom računski nivoi za slučaj kada rade 3 kontrolera (Zemun, Pančevo i ušće Nere), a žutom linijom nivoi za slučaj kada je dodat i kontroler uzvodno od HE „Đerdap 1“. Sa Slika 12 i 13 se vidi da 3 kontrolera ne uspevaju ispratiti dinamiku promena protoka na HE „Đerdap 1“ ali da se dodavanjem 4-tog kontrolera pomaže asimilaciji da nadomesti nepoznate protoke na brani.

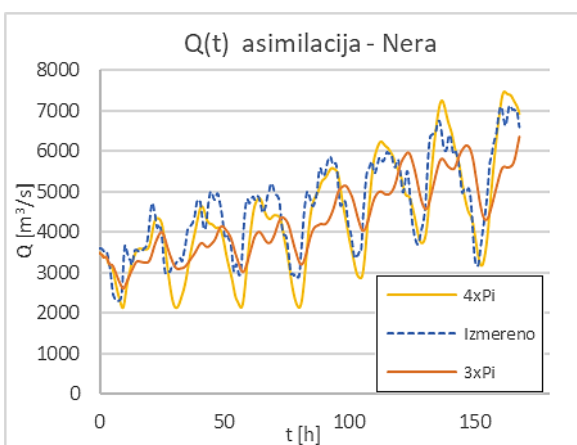
Ako se pogledaju protoci Dunavom na profilu ušća Nere (Slika 14), vidi se da je asimilacijom sa 4 kontrolera u potpunosti rekonstruisan „pogrešan“ protok Dunavom.



Slika 12. Tačni nivoi (isprekidana linija) kod ušća Nere i nivoi dobijeni asimilacijom pomoću 3 i 4 kontrolera



Slika 13. Tačni nivoi (isprekidana linija) uzvodno od HE „Đerdap 1“ i nivoi dobijeni asimilacijom pomoću 3 i 4 kontrolera



Slika 14. Protok Dunavom kod ušća Nere

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih testova asimilacije, zaključuje se da upotreba opisanog postupka omogućava stabilno funkcionisanje računskog modela pri različitim graničnim scenarijima rada razmatranog sistema. Pri tome nije potrebno uvoditi funkcionalne veze između PI kontrolera, i uz to, mogu se koristiti iste vrednosti parametara PI kontrole. U svim primerima su korišćene sledeće vrednosti parametara kontrole:  $K_p = 500$  i  $K_I = 1,0$ .

U nastavku testiranja je neophodno proveriti rad sistema u realnim uslovima, sa realnim vremenskim serijama. U toku je istraživanje koje ima za cilj da se u postupak asimilacije uključi i neodređenost merenja nivoa, posebno na lokacijama koje su značajne za sistem, pa postoji više od jednog mernog uređaja. Takođe, neophodno je dodati i mogućnost „uključivanja“ i „isključivanja“ asimilacije na pojedinim lokacijama, u zavisnosti od toga da li su u toku rada modela pristigli podaci o merenim nivoima .

#### LITERATURA

- [1] Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, 2017: Хидроинформациони систем „Ђердап“ 2016 (књига 20: Извештај о теоријским основама, алгоритмима и нумеричким модулима за оптимизацију и асимилацију мрежа)
- [2] Branislavjević N., D. Prodanović, M. Jovanović, (2009), Propagacija neodređenosti kod linijskih modela otvorenih tokova. *Vodoprivreda*, 240-242, str. 109-116.
- [3] Asch, M., Bocquet, M. and Nodet, M., (2016), Data assimilation: methods, algorithms, and applications, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [4] Hutton, C.J., Vamvakeridou-Lyroudia, L.S., Kapelan, Z., and Savic, D.A., (2011), Real-time modelling and Data Assimilation techniques for improving the accuracy of model predictions. Scientific report.
- [5] Malaterre, P.O., (1998), PILOTE: Linear quadratic optimal controller for irrigation canals. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 124(4), pp.187-194.
- [6] Jean-Baptiste, N., Malaterre, P.O., Dorée, C. and Sau, J., (2011) Data assimilation for real-time estimation of hydraulic states and unmeasured perturbations in a 1D hydrodynamic model.



- Mathematics and Computers in Simulation, 81(10), pp.2201-2214.
- [7] Stanić M, D. Prodanović, (2010), Uklapanje podataka merenja u hidrološke modele -Teorijske osnove (radni materijal)
- [8] Rosić N., N. Jaćimović, D. Prodanović, B. Stojanović, (2017), Data Assimilation for Operational Reservoir Management on the Danube River, Proceedings of the 7th International Conference on Information Society and Technology, ICIST 2017, Kopaonik, vol.1, pp. 210-213.
- [9] D.D. Franz and C.S. Melching, (1997), Full equations (FEQ) model for the solution of the full, dynamic equations of motion for one-dimensional unsteady flow in open channels and through control structures, US Department of the Interior, US Geological Survey.
- [10] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, (2017), Hidroinformacioni sistem „Đerdap“ 2016 (knjiga 20: Izveštaj o teorijskim osnovama, algoritmima i numeričkim modulima za optimizaciju i asimilaciju merenja).

## NEAR REAL TIME DATA ASSIMILATION OF NUMERICAL SIMULATION MODEL FOR DANUBE RIVER FROM NOVI SAD TO IRON GATE I, TEST RESULTS

by

Nikola ROSIĆ, Dušan PRODANOVIĆ

Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Boban STOJANOVIĆ

Faculty of Science, Kragujevac

Dragana OBRADOVIĆ

Institute for the development of water resources „Jaroslav Černi“, Belgrade

### Summary

In this paper, a novel data assimilation method for operational reservoir management on the Danube river section between Novi Sad and Iron Gate I is presented. The proposed data assimilation method allows discharges of river flow simulation model to be updated in near real time according to results of continuous water surface levels measurements. The model discharges are adjusted according to difference between measured and calculated water surface elevations using

so-called PI controllers at locations where water levels measurements take place. The effect of different number of PI controllers on method effectiveness and stability are studied for different scenarios. The recommendations for method improvement are given at the end of the paper.

Key words: simulation model, Danube model, data assimilation, Iron Gate

Redigovano 27.10.2017.