

NASTAVNO NAUČNOM VEĆU
GRAĐEVINSKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU

Predmet: Pokretanje postupka za verifikaciju tehničkog rešenja

Prema Pravilniku o sticanju istraživačkih i naučnih zvanja (Sl. Glasnik RS, br. 159/2020) i Priloga 2: Kriterijumi za određivanje kategorije naučnih publikacija, obraćamo se Nastavno-naučnom veću Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu sa molbom da pokrene postupak za verifikaciju tehničkog rešenja kategorije M82 pod nazivom:

CTDA: Control Theory based Data Assimilation – metoda za brzu asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova

M82 – tehničko rešenje (metoda) koje zadovoljava kriterijum otvorenog izvora publikovanog u časopisu kategorije **M22**

Autori rešenja:

doc. dr Miloš Milašinović, mast. inž. građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet
prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet
doc. dr Budo Zindović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet
prof. dr Boban Stojanović, dipl. maš. inž., Univerzitet u Kragujevcu – Prirodno-matematički fakultet
dr Nikola Milivojević, dipl. maš. inž., Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi

Podnosioci zahteva

doc. dr Miloš Milašinović, mast. inž. građ.

prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž.

doc. dr Budo Zindović, dipl. građ. inž.

prof. dr Boban Stojanović, dipl. maš. inž.

dr Nikola Milivojević, dipl. maš. inž.

TEHNIČKO REŠENJE

M82 – Novo tehničko rešenje (metoda) primenjeno na nacionalnom nivou koje zadovoljava kriterijum otvorenog izvora publikovanog u časopisu kategorije **M22**

CTDA: Control Theory based Data Assimilation - metoda za brzu asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova

Autori rešenja:

doc. dr Miloš Milašinović, mast. inž. građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

doc. dr Budo Zindović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

prof. dr Boban Stojanović, dipl. maš. inž., Univerzitet u Kragujevcu – Prirodno-matematički fakultet, Radoja Domanovića 12, 34000 Kragujevac

dr Nikola Milivojević, dipl. maš. inž., Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava, Beograd

Beograd, septembar 2021.

Sadržaj

1. Opšti podaci.....	4
1.1. Autori tehničkog rešenja	4
1.2. Naziv tehničkog rešenja	4
1.3. Kategorija tehničkog rešenja.....	4
1.4. Ključne reči	4
1.5. Za koga je rešenje rađeno.....	4
1.6. Godina kada je rešenje kompletirano	4
1.7. Godina kada je rešenje počelo da se primenjuje	4
1.8. Oblast i naučna disciplina na koju se tehničko rešenje odnosi	5
2. Problem koji se tehničkim rešenjem rešava	5
3. Stanje rešenosti tog problema u svetu	5
4. Opis tehničkog rešenja.....	6
4.1. Opis metode za asimilaciju podataka	6
4.2. Rezultati i validacija primene metode	10
5. Zaključak	16
6. Literatura	17
7. Prilog	19

1. Opšti podaci

1.1. Autori tehničkog rešenja

doc. dr Miloš Milašinović, mast. inž. građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

doc. dr Budo Zindović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

prof. dr Boban Stojanović, dipl. maš. inž., Univerzitet u Kragujevcu – Prirodno-matematički fakultet, Radoja Domanovića 12, 34000 Kragujevac

dr Nikola Milivojević, dipl. maš. inž., Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava, Beograd

1.2. Naziv tehničkog rešenja

CTDA: Control Theory based Data Assimilation - metoda za brzu asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova

1.3. Kategorija tehničkog rešenja

Novo tehničko rešenje (metoda) primenjeno na nacionalnom nivou koje zadovoljava kriterijum otvorenog izvora publikovanog u časopisu kategorije M22

1.4. Ključne reči

Asimilacija podataka, teorija upravljanja, modeli otvorenih tokova

1.5. Za koga je rešenje rađeno

Tehničko rešenje je softversko rešenje koje zadovoljava kriterijum otvorenog izvora, te se umesto ugovora o prodaji podnosi dokaz o publikovanju u časopisu kategorije M22:

M. Milašinović, D. Prodanović, B. Zindović, B. Stojanović, N. Milivojević (2021): *Control theory-based data assimilation for hydraulic models as a decision support tool for hydropower systems: sequential, multi-metric tuning of the controllers*. Journal of Hydroinformatics. 23 (3) DOI: 10.2166/hydro.2021.078. (kopija data u prilogu).

Tehničko rešenje je rađeno u sklopu projekta “Hidroinformacioni sistem – HE Đerdap 1”, zavodni broj kod naručioca 31/19/17/07 од 21.03.2019. године, који је Institut „Jaroslav Černi“ ugovorio sa PD Hidroelektrane Đerdap. U okviru projekta Građevinski fakultet je sa Institutom Jaroslav Černi sklopio ugovor br. 431214/19 o saradnji, čija se kopija nalazi u prilogu.

1.6. Godina kada je rešenje kompletirano

2021. godina.

1.7. Godina kada je rešenje počelo da se primenjuje

2021. godina.

1.8. Oblast i naučna disciplina na koju se tehničko rešenje odnosi

Građevinarstvo, uže naučne oblasti: 1) Hidroinformatika i 2) Mehanika nestišljivih fluida i hidraulika

2. Problem koji se tehničkim rešenjem rešava

Upravljanje vodnim resursima (vodosnabdevanje, odbrana od poplava, hidroenergetika) zahteva prognoze dostupne količine vode kao pomoć u donošenju upravljačkih odluka. Najčešće se te prognoze zasnivaju na upotrebi različitih fizički zasnovanih modela. Tako dobijeni rezultati su često veoma nepouzdati zbog prisustva različitih tipova neodređenosti. Kod primene linijskih (1D) modela tečenja u otvorenim tokovima neki od dominantnijih izvora neodređenosti su nedovoljno dobro poznavanje graničnih uslova (hidrogrami dotoka, krive protoka) i nepouzdati početni uslovi koji su osnova od koje se započinje prognoza. Kontinulana merenja na sistemu (npr. merenja nivoa na reci) predstavljaju relativno pouzdan reprezent njegovog stanja, ali pokrivaju samo jedan mali deo domena koji se razmatra. Zbog toga se pribegava postupku asimilacije podataka kojom se usaglašavaju rezultati modela i merenja. Na kraju asimilacionog perioda model bolje oslikava trenutno stanje na celom domenu i može se iskoristiti za prognozu.

Metoda Ensemble Kalman Filter – EnKF (Evensen 2003, 1994), jedna je od najčešće korišćenih metoda asimilacije podataka u oblasti hidrološko-hidrauličkog modeliranja za potrebe upravljanja rizicima od poplava ili upravljanja vodnim resursima za potrebe hidroenergetike ili vodosnabdevanja. Mana ove metode, kao standardne, je zahtevnost u pogledu računarskih resursa. U realnim problemima (stvarni sistemi), u kojima je potrebno simulacije ponavljati više puta za različite scenarije, ovakve metode pokazuju loše rezultate sa stanovišta utroška računarskog vremena. Pored toga, relativno složeni matematički aparat, dovodi do toga da se asimilacija podataka zaobilazi od strane inženjera u praksi. Zbog dinamičnosti sistema kojima se upravlja, često se postavlja zahtev da asimilacija podataka daje rezultate u realnom ili približno realnom vremenu na prosečnim računarskim sistemima (ne superračunarima). Ovo zahteva brze proračune, za šta standardne metode asimilacije podataka nisu upotrebljive ako postoji ograničenje po pitanju računarskih resursa.

Ovo tehničko rešenje predlaže novu metodu indirektno (posredno) asimilacije podataka u modelima tečenja u rekama, zasnovane na teoriji upravljanja. Ova metoda omogućava značajno ubrzanje procesa asimilacije.

3. Stanje rešenosti tog problema u svetu

Pošto postoji konstantna potreba za relativno brzim i jednostavnim alatima, problemi kod standardnih asimilacionih metoda su sve više pod lupom istraživača, koji teže da razviju pojednostavljene asimilacione metode, prilagođene specijalizovanoj oblasti upotrebe, ali rešavaju problem utroška vremena. Jedno od prvih istraživanja na ovu temu (Madsen i Skotner 2005) prikazuje vremenski efikasnu metodu za modele tečenja u rekama. U ovoj metodi koristi se generalni postupak koji se nalazi iza metode EnKF. Ušteda računarskog vremena omogućena je tako što se preskače postupak procene neodređenosti modela, koji u standardnim metodama odnosi najviše vremena. Ovde se usvaja unapred procenjena neodređenost modela i takva koristi za ceo proračun. Dobija se značajna ušteda u vremenu, ali glavna mana je u tome što je potrebna detaljna faza pretprocesiranja kako bi se procenila neodređenost modela. Ovo istraživanje, koje pokazuje ubrzanje proračuna, i ostala istraživanja koja koriste standardne

metode za asimilaciju podataka, koriste tzv. direktan pristup usaglašavanja rezultata modela i merenja. To znači da se u svakom vremenskom koraku, sračunate vrednosti iz modela (npr. nivoi vode dobijeni Sen-Venanovim jednačinama) direktno menjaju prema izmerenim vrednostima. Ovakav direktan postupak često narušava zakon održanja mase u jednačinama modela tečenja i može da izazove „šokove“ u modelima koji često dovode do nestabilnosti proračuna.

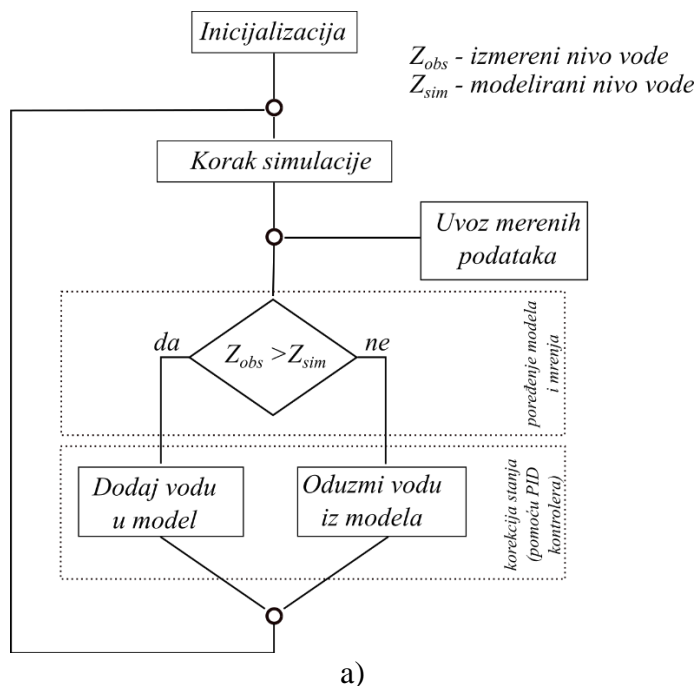
Kako bi se rešio ovaj problem, pojedini istraživači su primenili tzv. indirektni pristup usaglašavanja rezultata modela i merenja. To znači da se rezultati iz modela (nivo vode) koriguje prema merenim podacima menjajući neku drugu veličinu. U slučajevima kada je neodređenost modela dominantno posledica nepouzdanosti parametara modela (hrapavost, lokalni gubici energije, itd) mogu se, u postupku asimilacije, korigovati ti parametri (Cooper i ostali 2018; Lei i ostali 2019; Ziliani i ostali 2019). Međutim, ovde je ponovo potrebno koristiti standardne metode asimilacije što vraća problem utroška računarskog vremena.

Kada su ulazni podaci, odnosno granični uslovi (hidrogrami, nivogrami, bočni dotoci) glavni izvor neodređenosti modela, moguće je koristiti/razviti brze asimilacione metode uz indirektni, fizički zasnovan pristup ažuriranju rezultata modela. Asimilacija nivoa dobijenih hidrološkim modelom korekcijom ulaznih protoka u sistem koji se modelira prikazana je u istraživanju Fava i ostali (2018) i (2020). Za razliku od ovog rada Hansen i ostali (2014) su razvili metodologiju za asimilaciju podataka u modele sistema za odvodnjavanje u urbanim sredinama koja takođe koristi indirektni pristup. Ovde ulazi u model nisu koncentrisani samo na jednom mestu, pa se postupak indirektno asimilacije sprovodi tako što se na pojedinim lokacijama gde postoje merenja nivoa (npr. šahtovi) dodaje ili oduzima određena količina vode dobijena na osnovu razlike između izmerenog nivoa vode i onog dobijenog modelom. Ovaj vrlo praktični metod primenjiv je samo u sistemima za urbano odvodnjavanje, ali princip indirektno asimilacije podataka primenjen u ovom istraživanju poslužio je kao osnova za razvoj nove CTDA (Control Theory based Data Assimilation).

4. Opis tehničkog rešenja

4.1. Opis metode za asimilaciju podataka

Metodologija za brzu asimilaciju podataka, kojom se problem neodređenosti graničnih i početnih uslova može rešiti, koristi fizički zasnovani pristup. U ovoj metodologiji, problem razlike između modeliranih vrednosti nivoa vode i izmerenih podataka predstavljen je kao nedostatak ili višak vode u modelu. Prema tome, procedura za usaglašavanje rezultata modela sa merenjima zasniva se na dodavanju/oduzimanju određene količine vode koja zavisi od razlike izmerenog nivoa i nivoa dobijenog po modelu, na lokacijama gde postoje merenja. Kada je izmereni nivo vode veći od onog dobijenog modelom, smatra se da u modelu nedostaje određena količina vode, te se ona dodaje. Suprotan proces (uklanjanje određene količine vode) se sprovodi kada je izmereni nivo manji od onog dobijenog modelom (Slika 1). Količina vode koja se dodaje ili oduzima iz modela nazvana je korektivni protok (korektivni dotok) i za računanje te veličine koristi se jednačina koja opisuje PID kontroler. U nastavku je detaljno opisan matematički aparat iza metodologije za brzu asimilaciju podataka i način kako se PID kontroleri implementiraju u jednačine hidrauličkog modela tečenja.



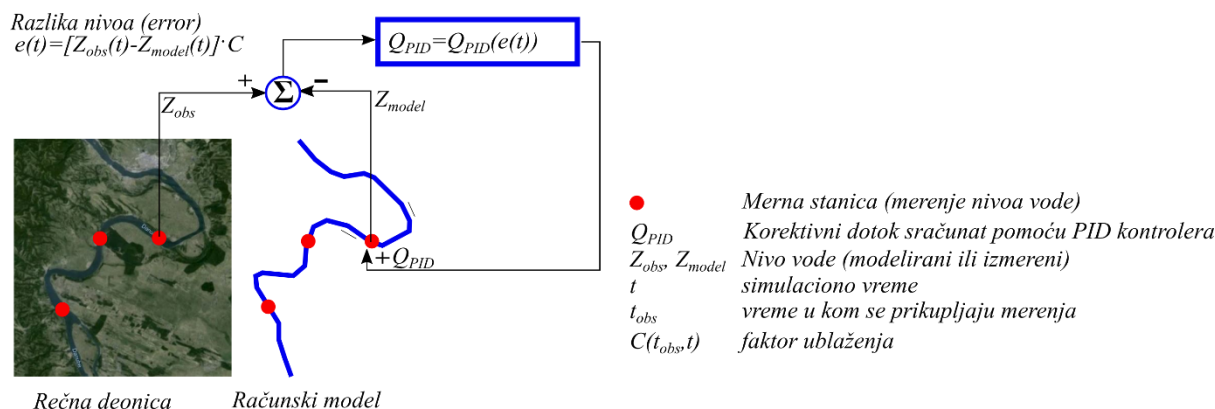
```

while vreme < kraj_simulacije:
    pokreni_jedan_korak_simulacije
    if izmereni_nivo >= modelirani_nivo:
        dodaj_vodu_u_model
    else:
        oduzmi_vodu_iz_modela
  
```

Slika 1. Opšti princip usaglašavanja rezultata modela i merenja primenom teorije upravljanja: a) algoritam, b) pseudokod

Sušтина svih asimilacionih metoda je usaglašavanje stanja modela u skladu sa merenjima nivoa, tj., promena zapremine vode koja se nalazi u modelu kako bi bolje odgovarala stvarnom stanju. U standardnim asimilacionim metodama to usaglašavanje je statistički zasnovano pri čemu se neretko može desiti da dobijeni rezultati nemaju fizičku potporu (npr. nagle promene nivoa, prevelike brzine propagacije poremećaja itd.), što dovodi do nestabilnosti modela. Asimilacija podataka u modelima otvorenih tokova pomoću korektivnih dotoka koristi indirektni, fizički zasnovani princip asimilacije za razliku od standardnih metoda. Uvođenjem korektivnih dotoka na lokacijama u modelu koje se poklapaju sa mernim mestima omogućava se postepeno, kontinualno usaglašavanje modela sa merenjima čime se smanjuje mogućnost za pojavu nestabilnosti modela. Dodatno, nova, fizički zasnovana metoda eksplicitno daje korektivne protoke pa se oni mogu iskoristiti i za dodatne analize, za razliku od standardnih metoda u kojima se „intervencija“ u modelu ne može eksplicitno kvantifikovati.

Proračun korektivnog dotoka obavlja se koristeći teoriju Proporcionalno-Integrativno-Derivativnih (PID) kontrolera. PID kontroleri su mehanizam sa povratnom spregom, gde je izlaz iz prethodnog koraka ulaz u naredni korak (Karl Astrom 2002), čime je moguće formirati sistem sa negativnom povratnom spregom. On omogućava smanjenje greške kroz vreme. Ovaj mehanizam se često koristi u procesu automatskog upravljanja hidrauličkim objektima: objektima u sistemima za urbano odvodnjavanje (Campisano i Modica 2002; Schütze i ostali 2004), objektima na sistemima za navodnjavanje (Litrico i ostali 2003; Bonet i ostali 2019), upravljanju vodnim resursima u realnom vremenu (Schwanenberg i ostali 2015), upravljanju sistemima za transport i prečišćavanje otpadne vode (Wahab i ostali 2007; Tzoneva 2007), ili upravljanju vodovodnim sistemima (Fiorelli i ostali 2013; Caroline i ostali 2016; Giustolisi i ostali 2017). U ovoj metodologiji za brzu asimilaciju podataka, teorija PID kontrolera koristi se za kontrolu razlika između rezultata modela i izmerenih nivoa sa težnjom da te razlike smanji.



Slika 2. Usaglašavanje nivoa u modelu i merenja dodavanjem korektivnog dotoka na mestu gde postoji merenje nivoa (Milašinović i ostali 2020)

Ulazna veličina za PID kontrolere koji se koriste kao alat za asimilaciju podataka je označena kao greška (*error*), i jednaka je razlici vrednosti procesne varijable (*process variable*) i tražene vrednosti (*setpoint*). U slučaju primene na hidraulički model tečenja, *error* je razlika između izmerenog nivoa vode (*setpoint*) i nivoa vode dobijenog modelom (*process variable*). Veličina kojom se vrši kontrola (*control variable*), tj. usaglašavanje, u ovom slučaju je korektivni dotok koji se računa sledećim jednačinama:

$$Q_{PID}(t) = Q_{PID}^t = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

$$e(t) = Z_{obs}(t) - Z_{model}(t) \quad (2)$$

pri čemu se integral u jednačini (1) računa trapeznim pravilom numeričke integracije, a izvod konačnim razlikama.

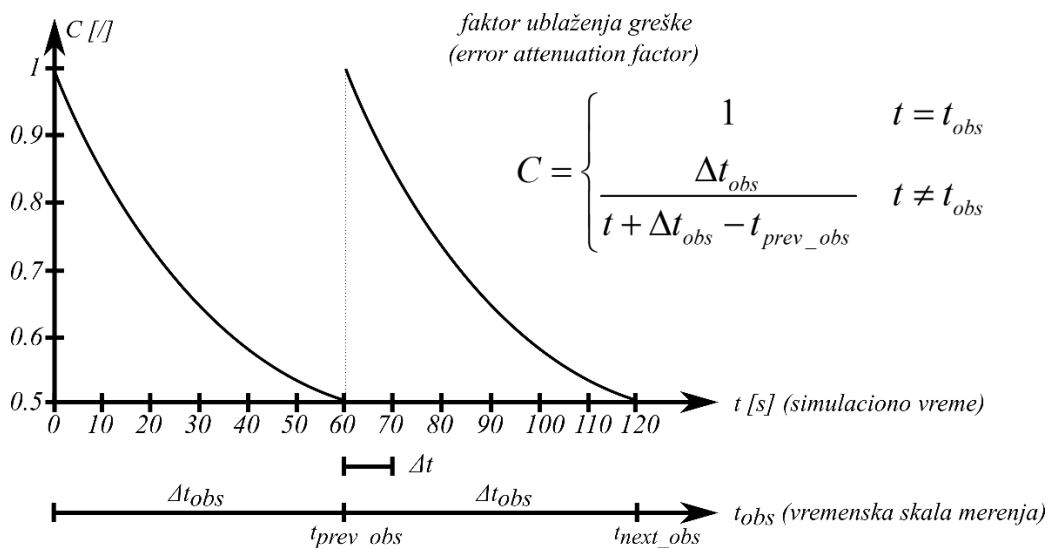
Parametri PID kontrolera su: K_p – proporcionalni koeficijent koji množi tekuću vrednost greške (*error*), K_i – integrativni koeficijent koji množi integral greške i čiji je cilj da korektivni dotok prilagodi i prethodnim vrednostima greške i K_d – derivativni koeficijent koji za cilj ima da prilagodi korektivni dotok prema procenjenom trendu greške. Cilj primene PID kontrolera je da se sistem koji se kontroliše (u ovom slučaju hidraulički model tečenja) dovede do željenog stanja – setpoint-a (u ovom slučaju da se nivoi po modelu dovedu do izmerenih vrednosti nivoa) za relativno kratko vreme. Proporcionalni član jednačine, $K_p \cdot e(t)$, računa vrednost promenljive, kojom se utiče na stanje u modelu, samo na osnovu trenutne vrednosti greške. Velike vrednosti ovog koeficijenta mogu da izazovu preterani odgovor kontrolera koji, gotovo sigurno, dovodi do ekstremnih oscilacija i nestabilnosti sistema. U slučaju primene PID kontrolera kao asimilacione metode za modele tečenja, ovaj problem izaziva prevelike oscilacije nivoa i dolazi do pojave fizički nemogućih vrednosti nivoa i na kraju nestabilnosti modela koja se ogleda u nemogućnosti da se obavi proračun. Sa druge strane, niskim vrednostima proporcionalnog elementa može se smanjiti potencijal za pojavu nestabilnosti modela. Međutim, korišćenje samo ovog dela PID kontrolera najčešće ne može da da zadovoljavajuće rezultate. Zbog toga se koristi i integrativni član, $K_i \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt$. Ovaj deo kontrolera prikuplja podatke o prethodnim greškama i pokušava da ih smanji tokom vremena. Korišćenje ovog dela omogućava sistemu (modelu) kontrolisanom PID kontrolerom da dostigne zadato stanje (izmereni nivo). U nekim slučajevima, kada se PID kontrolerima reguliše rad nekog izuzetno dinamičnog sistema, neophodno je koristiti i procenu trenda greške kako bi se sistem brže prilagodio zahtevanom, dinamičnom stanju. Tada se koristi i derivativni deo PID kontrolera, $K_d de/dt$.

Originalni oblik računanja greške u procesu (razlika izmerenih i modeliranih nivoa vode na mernoj lokaciji), koji je dat jednačinom (2) zasnovan je na pretpostavci da vremenski korak simulacije Δt i vremenski korak sa kojim su prikupljena merenja Δt_{obs} imaju istu vrednost. Ova pretpostavka u najvećem broju slučajeva u praksi nije zadovoljena. Najčešće je vremenski korak modela (simulacije) znatno manji od vremenskog koraka kojim se prikupljaju mereni podaci. Ovo znači da u periodu između dva prikupljena merena podatka, nema merenja, a model radi. Ovo ne odgovara radu PID kontrolera, pošto se tu zahteva kontinualno poznavanje zadatog stanja, kome kontroler teži da dovede model. Kako bi se omogućilo da postoje „mereni“ podaci (*setpoint*) i između dva uzorkovanja, dodaju se linearno intepolovane vrednosti nivoa. To je zadato stanje (*setpoint*) između dva stvarno obavljena merenja. Pošto se može pretpostaviti da pouzdanost interpolovanog podatka opada sa udaljenjem od poslednjeg izmerenog podatka, potrebno je uvesti i faktor ublažavanja (eng. *attenuation factor*) C (jednačina (4) i Slika 3). Njime se PID kontroleri postepeno gase u periodima kada nema pouzdanih (izmerenih) podataka. Prema tome, proračun greške se modifikuje prema sledećim jednačinama:

$$e(t) = [Z_{obs}^*(t) - Z_{model}(t)] \cdot C \quad (3)$$

$$C = \begin{cases} 1 & t = t_{obs} \\ \frac{\Delta t_{obs}}{t + \Delta t_{obs} - t_{prev_obs}} & t \neq t_{obs} \end{cases} \quad (4)$$

U jednačinama (3) i (4) Z_{obs}^* predstavlja „izmerene“ nivoe vode (*setpoint*) dobijene linearnom interpolacijom, Z_{model} predstavlja vrednost nivoa vode dobijenu modelom, C je faktor ublaženja greške, t_{prev_obs} je vremenski trenutak prethodno dostupnog merenja, t je tekuće vreme simulacije, t_{obs} je tekuće vreme prikupljanja merenja a Δt_{obs} je vremenski korak uzorkovanja stvarno izmerenih podataka.



Slika 3. Faktor ublažavanja greške (error attenuation factor). Periodična, diskontinualna funkcija kao mera neodređenosti merenih podataka (minimalna vrednost ovog faktora zavisi od konkretnih vrednosti vremenskog koraka modela i uzorkovanja merenih podataka)

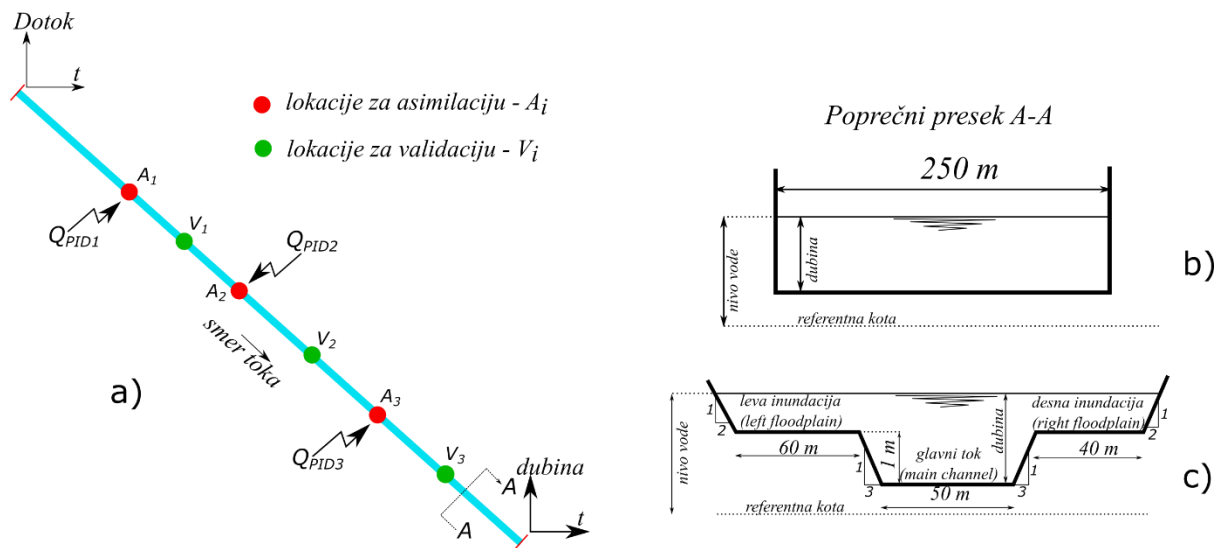
Faktor ublažavanja C u jednačini (3) će dovesti do postepenog gašenja PID kontrolera u periodu između dva merenja. Ovo znači da kako model napreduje u vremenu, u periodu bez

izmerenih podataka, manja težina se daje interpolovanim vrednostima nivoa (interpolacija merenih podataka).

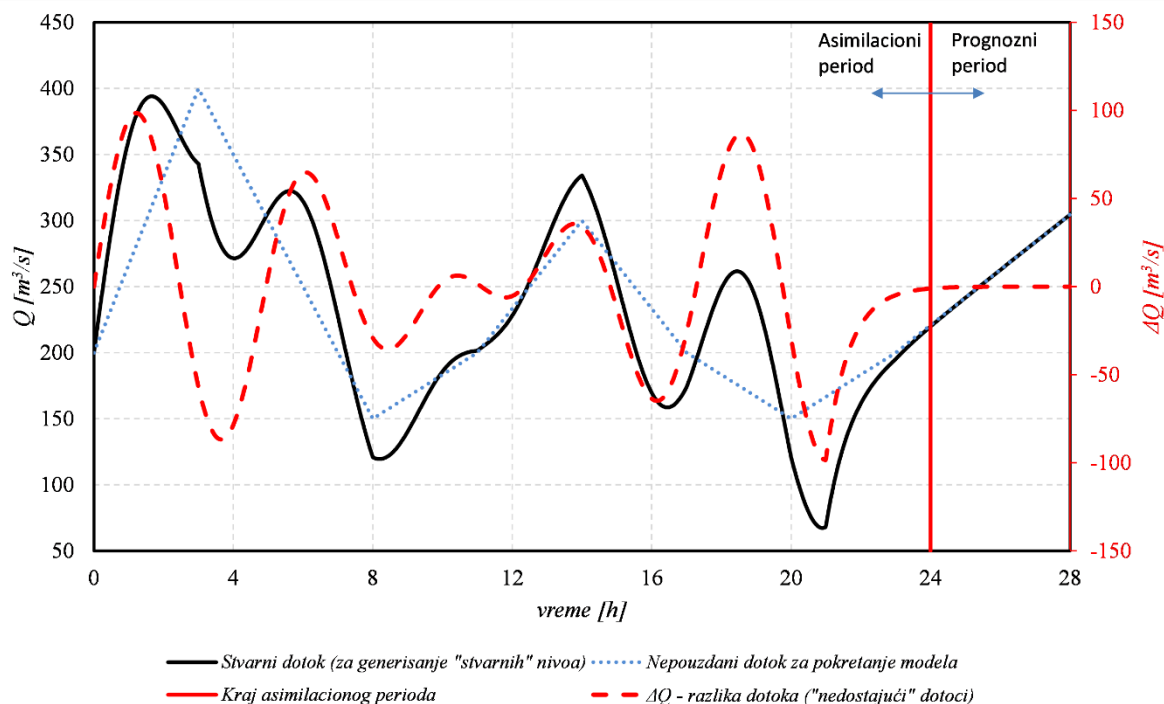
4.2. Rezultati i validacija primene metode

Metoda za asimilaciju podataka zasnovana na teoriji upravljanja testirana je na dva primera: 1) sintetičkom test primeru sa jednostavnom i složenom geometrijom i 2) hidrauličkom modelu Dunava 170 km uzvodno od Hidroelektrane Đerdap 1.

Predložena metodologija za brzu asimilaciju podataka poredi se sa standardnom asimilacionom metodom EnKF na hipotetičkom testu sa različitim složnošću geometrije poprečnog preseka (Slika 4). Prvi slučaj je sa jednostavnom, pravougaonom, geometrijom korita (Slika 4b), a drugi slučaj je sa složenim, dvogubim oblikom preseka (Slika 4c). Analizira se slučaj kada je prisutna razlika nivoa između merenja i modela zbog loše procenjenog dotoka na rečnu deonicu. Prava stanja, odnosno stvarni („mereni“) nivoi na nekoliko mernih lokacija su dobijeni kada se model tečenja pokrene sa stvarnim ulaznim hidrogramom (Slika 5). Nakon toga ulazni hidrogram se promeni i model se pokreće sa izmenjenim ulaznim hidrogramom. Rezultati tako pokrenutog modela se koriguju koristeći standardnu (EnKF) i brzu metodu asimilacije podataka (CTDA). Benchmark podrazumeva poređenje i analizu performansi ove dve asimilacione metode na osnovu indikatora kvaliteta asimilacije podataka: koren srednjeg kvadratnog odstupanja – *RMSE*, maksimalna apsolutna greška – *maxError*, odnos vremena asimilacije i simulacionog perioda – Assimilation Time Ratio (AssimTRatio), ukupna korektivna zapremina – *CorrVol* (primenjuje samo za metodu CTDA) i ubrzanja proračuna - *SpeedUp*.



Slika 4. Benchmark test primeri za poređenje EnKF i metode CTDA: a) rečna deonica sa 6 mernih lokacija, b) pravougaoni poprečni presek c) složeni poprečni presek



Slika 5. Ulazni podaci za primere na kojima se porede metode CTDA i EnKF

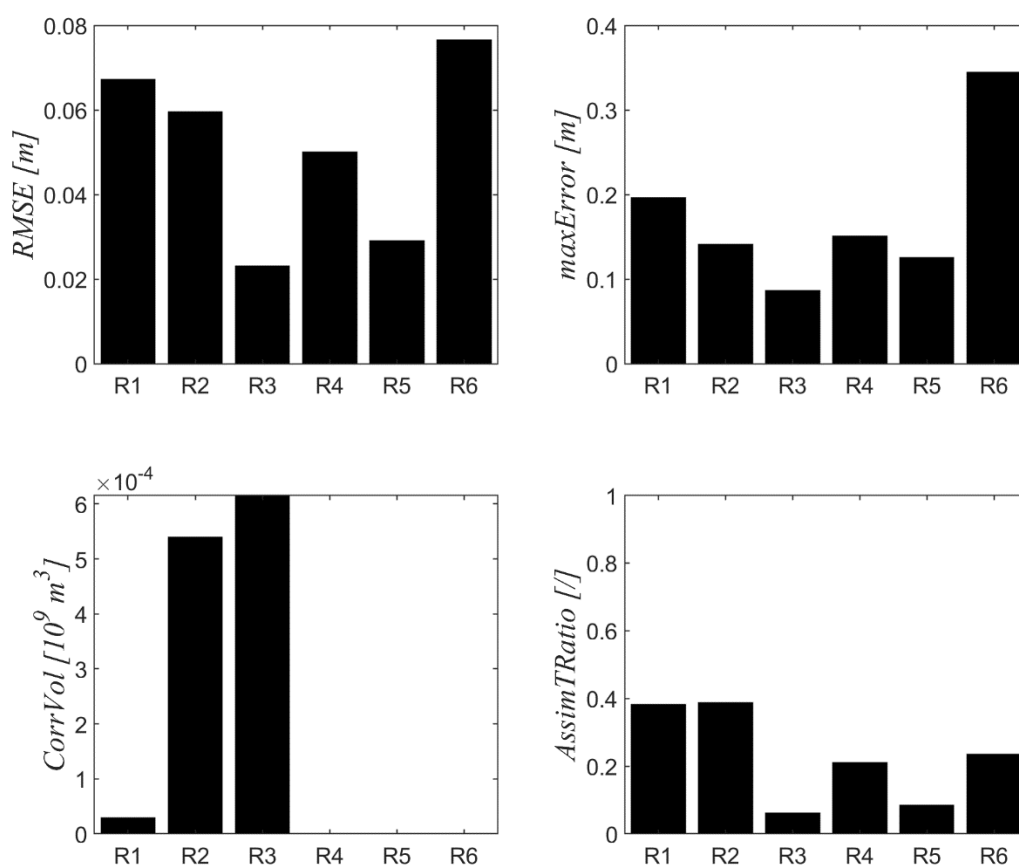
Tabela 1. Slučajevi koji se analiziraju u okviru benchmarkinga EnKF i asimilacione metode zasnovane na PID kontrolerima – CTDA (u svim slučajevima derivatni faktor je usključen, tj. $D=0$)

Slučaj		Asimilaciona metoda	P	I	Veličina ansambla
Pravougaono korito (Rectangular)	Složeno korito (Compound)				
$R1$	$C1$	CTDA	10	0	/
$R2$	$C2$	CTDA	10	0,1	/
$R3$	$C3$	CTDA	10	1	/
$R4$	$C4$	EnKF	/	/	50
$R5$	$C5$	EnKF	/	/	100
$R6$	$C6$	EnKF	/	/	200

*R – oznaka da je korišćen primer sa pravougaonim (eng. *Rectangular*) poprečnim presekom

*C – oznaka da je korišćen primer sa složenim (eng. *Compound*) poprečnim presekom

Poređenje između dve asimilacione metode (CTDA i EnKF) izvršeno je za nekoliko vrednosti parametara koji utiču na rezultate dobjene po svakoj od metoda. Za CTDA metodu su menjane vrednosti proporcionalnog i integrativnog faktora. Cilj je pokazati da je dobrim podešavanjem moguće doći do dobrog kvaliteta asimilacije CTDA metodom bez povećanja utroška računarskog vremena. Kod EnKF metode, kvalitet asimilacije se povećava povećanjem veličine ansambla, ali se značajno povećava i utrošak računarskog vremena.

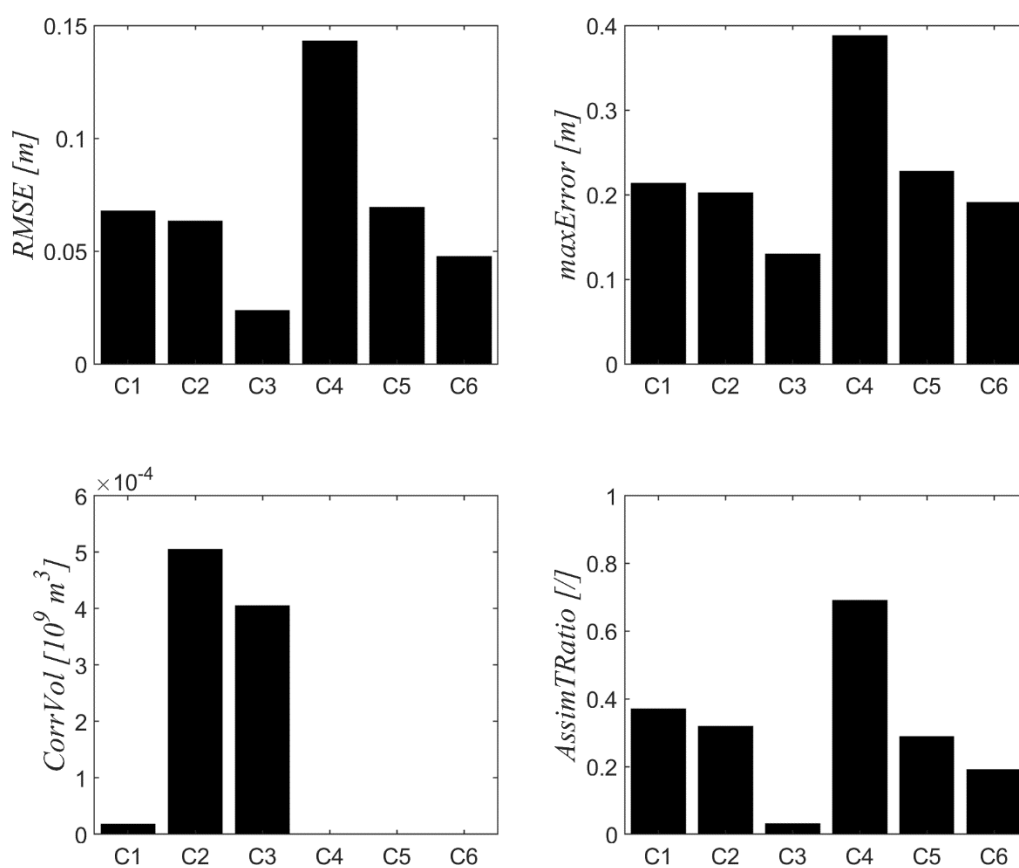


Slika 6. Indikatori performansi asimilacije podataka za test primer sa pravougaonim poprečnim presekom

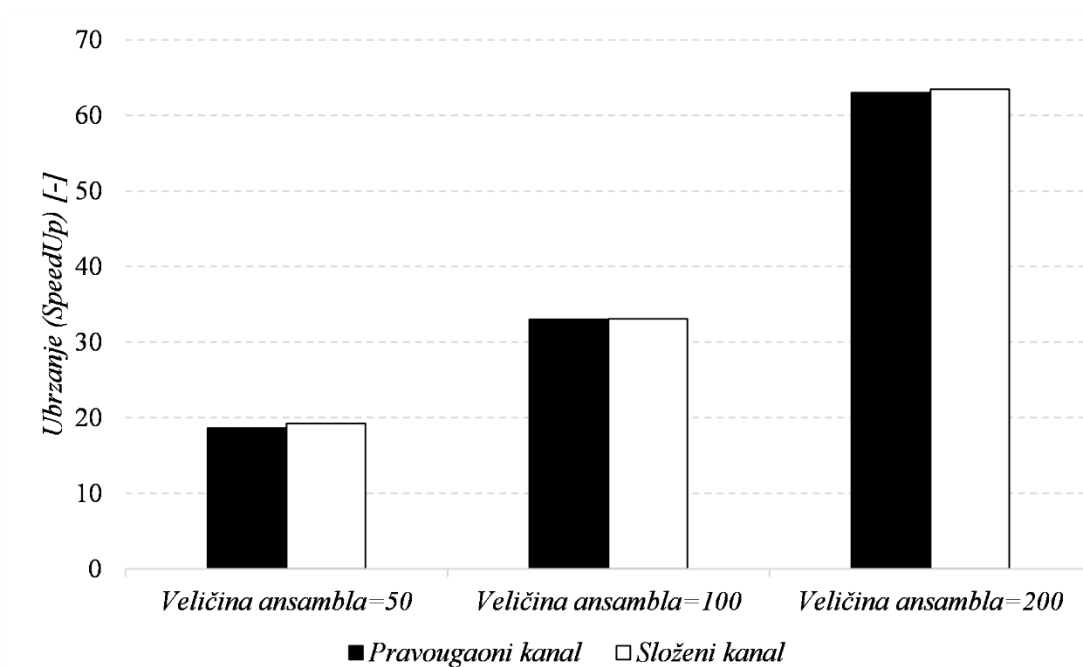
Adekvatno podešeni PID kontroleri kao alat za asimilaciju podataka u metodi CTDA (slučajevi R3 i C3 iz Tabele 1 i sa Slika 6 i 7) pokazuju bolji kvalitet asimilacije podataka u odnosu na EnKF metodu (slučajevi R4, R5, R6, C4, C5 i C6) po svim parametrima po kojima je moguće izvršiti poređenje: *RMSE*, *maxError* i *AssimTRatio*. Takođe, vidi se da podešavanje kontrolera u CTDA metodi ne utiče na vreme proračuna, čime se pokazuje značajna prednost u odnosu na metodu EnKF (Slika 8).

Parametar *CorrVol* pokazuje intenzitet intervencije asimilacione metode u model, tačnije količinu vode dodate/oduzete iz modela usled nepouzdanosti graničnih uslova. Ovaj indikator, razložen po asimilacionim lokacijama (parametar *CorrVol* sračunat za svaku asimilacionu lokaciju posebno, ne kao integralna suma svih korektivnih zapremina) može pomoći u detekciji dominantnog izvora nepouzdanosti modela. Tačnije, može pokazati da li je nepouzdanost modela dominantno uslovljena uzvodnim, nizvodnim ili nekim unutrašnjim graničnim uslovom i time pomoći u popravci modela. Ovaj parametar nije moguće direktno proceniti za metodu za EnKF jer je on posledica rada metode CTDA. Prema tome, sama mogućnost procene ove veličine na osnovu rada metode CTDA pokazuje njenu interpretativnu moć i prednost u odnosu na standardnu metodu asimilacije.

Dobro podešeni kontroleri omogućavaju bolju asimilaciju podataka i kada se CTDA metoda primeni na realnom primeru hidrosistema Dunav (Slike 9 i 10) sa ekstremnim hipotetičkim scenarijom (Slika 11). Na slikama 12 i 13 vidi se razlika u nivoima na vodomernim stanicama dobijenih hidrauličkim modelom sa i bez metode CTDA.

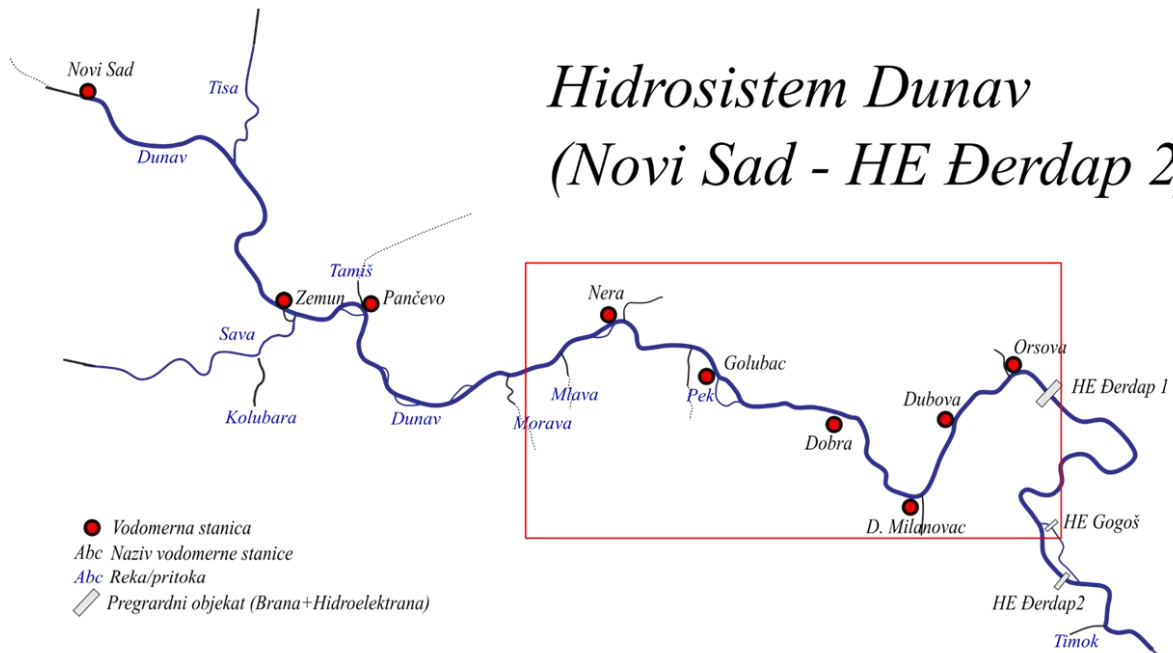


Slika 7. Indikatori performansi asimilacije podataka za test primer sa složenim poprečnim presekom



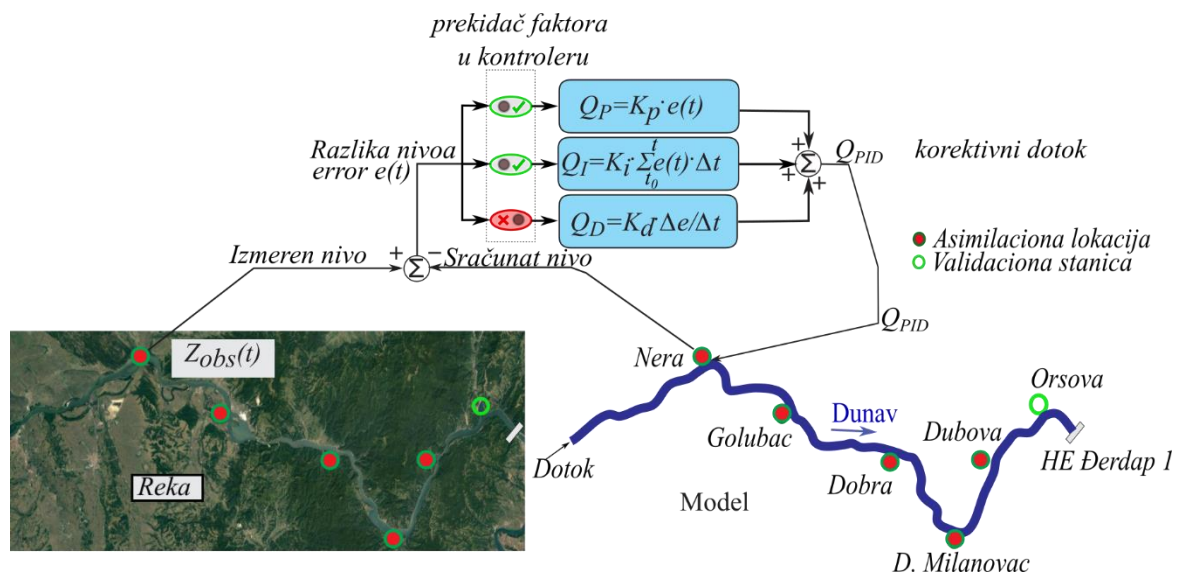
Slika 8. Prosečno ubrzanje (utrošak računarskog vremena) primenom CTDA asimilacione metode u odnosu na metodu EnKF

Metodologija za brzu asimilaciju podataka pomoću PID kontrolera razvijena je kao alat za podršku u prognozi pri upravljanju Hidroenergetskim sistemom Đerdap na Dunavu.

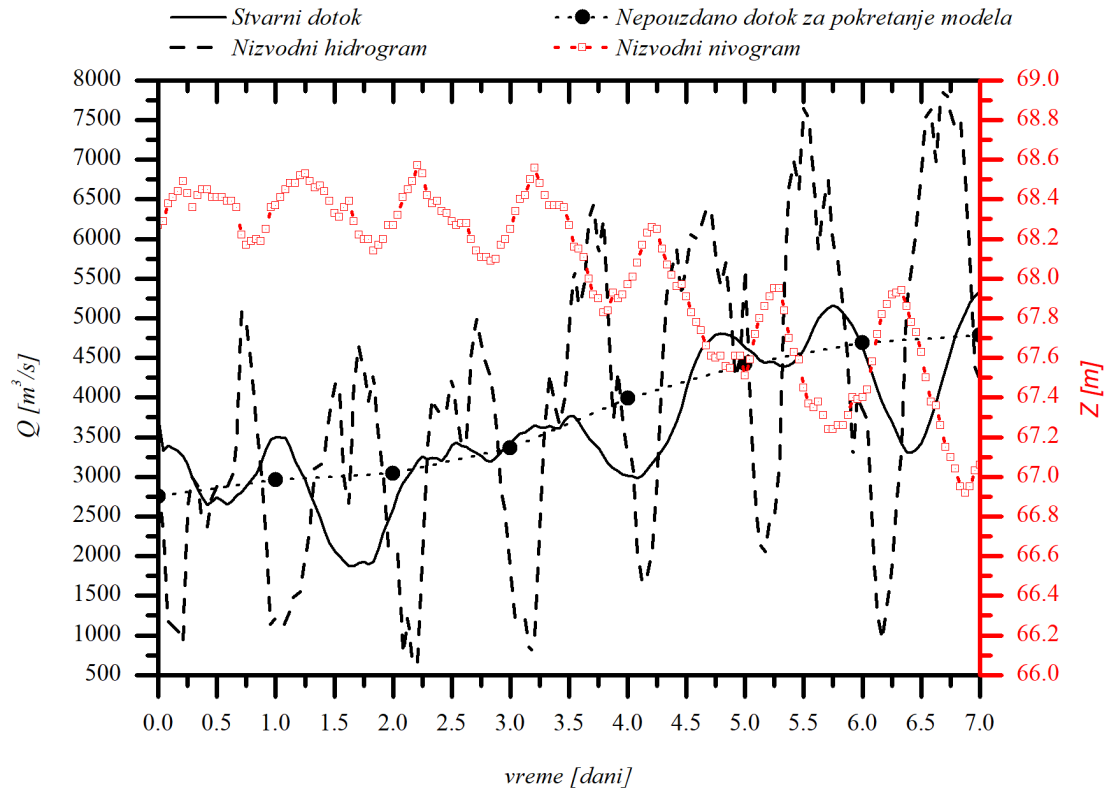


Hidrosistem Dunav (Novi Sad - HE Đerdap 2)

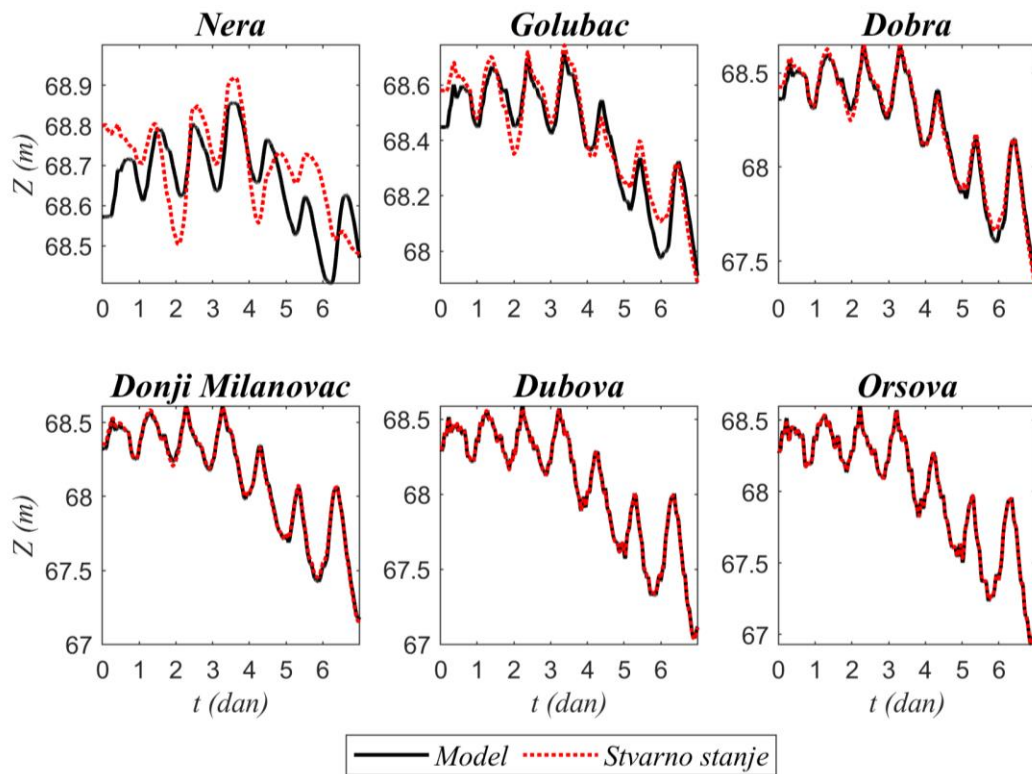
Slika 9. Hidrosistem Dunava sa označenim delom koji se analizira (Slika 10)



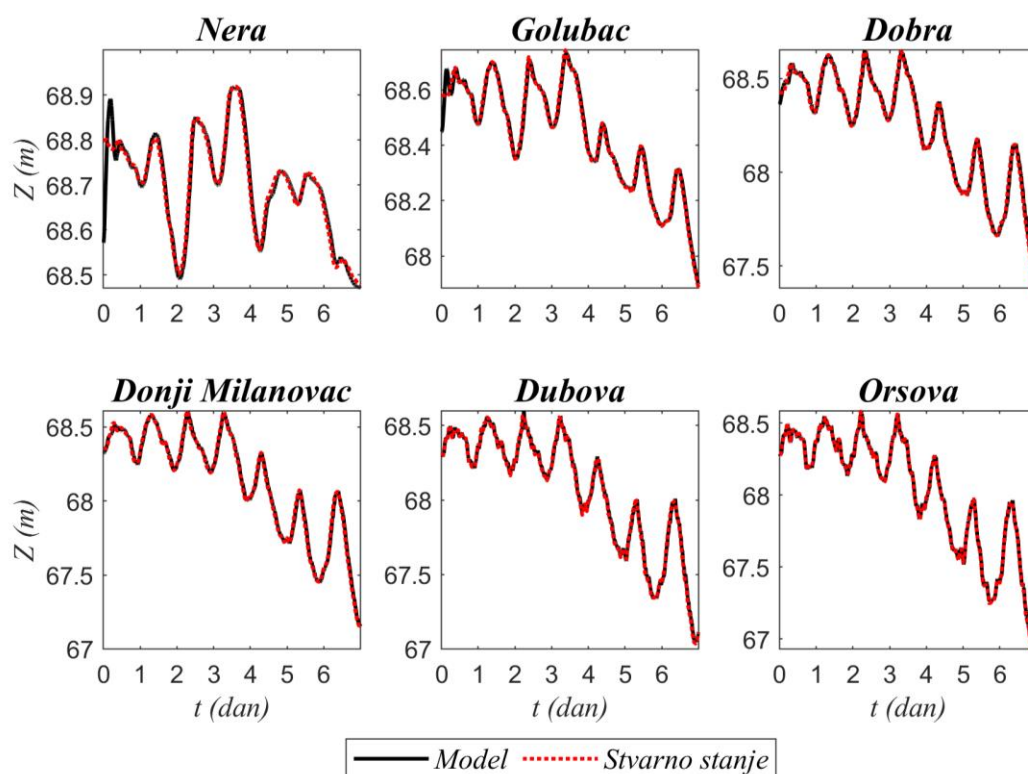
Slika 10. Deo hidroenergetskog sistema Đerdap koji se analizira: deonica duga 170km uzvodno od brane i HE Đerdap 1 sa 6 mernih lokacija



Slika 11. Granični uslovi za test primer na deonici Dunava: stvarni hidrogram dotoka (za generisanje stvarnog stanja), procenjeni hidrogram dotoka kojim se pokreće model, nizvodni hidrogram isticanja i nizvodni nivogram



Slika 12. Nivoi dobijeni modelom (bez asimilacije podataka) na mernim stanicama Hidroenergetskog Sistema Đerdap za hipotetički scenario



Slika 13. Nivoi na mernim stanicama Hidroenergetskog Sistema Đerdap za hipotetički scenario nakon primenjene asimilacije metodom CTDA

Detaljan pregled rezultata primene nove metode za asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova zasnovane na teoriji Proporcionalno-Integrativno-Derivativnih kontrolera može se pogledati u radovima (Milašinović i ostali 2020, 2021).

5. Zaključak

CTDA je nova metoda za asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova koja omogućava pouzdaniju procenu početnih uslova u hidrauličkim modelima, a u cilju boljih prognoza za upravljanje vodnim resursima. Pokazalo se da tačnost asimilacije podataka primenom CTDA metode nije manja u odnosu na tačnost asimilacije primenom EnKF metode. Naprotiv, u mnogim slučajevima performanse nove metode za asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova prevazilaze performanse metode EnKF. Najveći benefit primene CTDA metode je značajno ubrzanje proračuna i jednostavniji matematički aparat, što omogućava lakšu primenu na realnim sistemima i upravljanje istim u (približno) realnom vremenu. Konkretno prednosti CTDA metode u odnosu na EnKF metodu, u oblasti modeliranja otvorenih tokova su:

1. CTDA ima jednostavniji matematički aparat pogodan za laku i brzu implementaciju u model tečenja u otvorenom toku
2. U poređenju sa EnKF metodom, ne smanjuju se kvalitet asimilacije podataka, štaviše, često se i poboljšava.
3. CTDA metoda omogućava značajno smanjenje utroška računarskog vremena
4. CTDA metoda je intuitivno jasnija i ima interpretativnu moć jer govori koliko vode u modelu nedostaje usled nepouzdatih graničnih uslova

6. Literatura

- Bonet, Enrique, Manuel Gómez, M. T. Yubero, и J. Fernández-Francos. 2019. „GoRoSoBo simplified: an accurate feedback control algorithm in real time for irrigation canals“. *Journal of Hydroinformatics* 21 (6): 945–61. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.159>.
- Campisano, A., и C. Modica. 2002. „PID and PLC units for the real-time control of sewer systems“. *Water Science and Technology* 45 (7): 95–104. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0121>.
- Caroline, Anne, Linhares Monteiro, Heber Pimentel Gomes, Saulo De Tarso, и Marques Bezerra. 2016. „PID Controller applied in a water distribution network supplied by pumping direct“ 26: 91–97. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1059>.
- Cooper, E. S., S. L. Dance, J. Garcia-Pintado, N. K. Nichols, и P. J. Smith. 2018. „Observation impact, domain length and parameter estimation in data assimilation for flood forecasting“. *Environmental Modelling and Software* 104: 199–214. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.013>.
- Evensen, Geir. 1994. „Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics“. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/94JC00572>.
- Evensen, Geir 2003. „The Ensemble Kalman Filter: Theoretical formulation and practical implementation“. *Ocean Dynamics* 53 (4): 343–67. <https://doi.org/10.1007/s10236-003-0036-9>.
- Fava, Maria Clara, Maurizio Mazzoleni, Narumi Abe, Eduardo Mario Mendiondo, и Dimitri P. Solomatine. 2020. „Improving flood forecasting using an input correction method in urban models in poorly gauged areas“. *Hydrological Sciences Journal* 0 (0). <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1729984>.
- Fava, Maria Clara, Maurizio Mazzoleni, Narumi Abe, Eduardo Mario Mendiondo, и Dimitri Solomatine. 2018. „An Approach for Urban Catchment Model Updating“ 3: 692–685. <https://doi.org/10.29007/nqzt>.
- Fiorelli, David, Georges Schutz, Nataliya Metla, и Joel Meyers. 2013. „Application of an optimal predictive controller for a small water distribution network in Luxembourg“. *Journal of Hydroinformatics* 15 (3): 625–33. <https://doi.org/10.2166/hydro.2012.117>.
- Giustolisi, Orazio, Rita M. Ugarelli, Luigi Berardi, Daniele B. Laucelli, и Antonietta Simone. 2017. „Strategies for the electric regulation of pressure control valves“. *Journal of Hydroinformatics* 19 (5): 621–39. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.101>.
- Hansen, Lisbet Snefrup, Morten Borup, Arne Møller, и Peter Steen Mikkelsen. 2014. „Flow forecasting using deterministic updating of water levels in distributed hydrodynamic urban drainage models“. *Water (Switzerland)* 6 (8): 2195–2211. <https://doi.org/10.3390/w6082195>.
- Karl Astrom, Johan. 2002. „PID Control“. *Control System Design*. <https://doi.org/10.1007/1-84628-148-2>.
- Lei, Xiaohui, Yu Tian, Zhao Zhang, Lingling Wang, Xiaohua Xiang, и Hao Wang. 2019. „Correction of pumping station parameters in a one-dimensional hydrodynamic model using the Ensemble Kalman filter“. *Journal of Hydrology* 568 (August 2018): 108–18.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.062>.

- Litrico, X., V. Fromion, J.-P. Baume, и M. Rijo. 2003. „Modelling and PI control of an irrigation canal“. *Proceedings of the European Control Conference*, изд. May: 1–6.
- Madsen, Henrik, и Claus Skotner. 2005. „Adaptive state updating in real-time river flow forecasting - A combined filtering and error forecasting procedure“. *Journal of Hydrology* 308 (1–4): 302–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.030>.
- Milašinović, Miloš, Dušan Prodanović, Budo Zindović, Nikola Rosić, и Nikola Milivojević. 2020. „Fast data assimilation for open channel hydrodynamic models using control theory approach“. *Journal of Hydrology* 584 (May 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124661>.
- Milašinović, Miloš, Dušan Prodanović, Budo Zindović, Boban Stojanović, и Nikola Milivojević. 2021. „Control theory-based data assimilation for hydraulic models as a decision support tool for hydropower systems: sequential, multi-metric tuning of the controllers“. *Journal of Hydroinformatics* 23 (3): 500–516. <https://doi.org/10.2166/hydro.2021.078>.
- Schütze, Manfred, Alberto Campisano, Hubert Colas, Wolfgang Schilling, и Peter A. Vanrolleghem. 2004. „Real time control of urban wastewater systems - Where do we stand today?“. *Journal of Hydrology* 299 (3–4): 335–48. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.010>.
- Schwanenberg, D., B. P. J. Becker, и M. Xu. 2015. „The open real-time control (RTC)-Tools software framework for modeling RTC in water resources systems“. *Journal of Hydroinformatics* 17 (1): 130–48. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.046>.
- Tzoneva, Raynitchka. 2007. „Optimal PID control of the dissolved oxygen concentration in the wastewater treatment plant“. *IEEE AFRICON Conference*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2007.4401608>.
- Wahab, N. A., M. R. Katebi, и J. Balderud. 2007. „Multivariable PID control design for wastewater systems“. *2007 Mediterranean Conference on Control and Automation, MED*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MED.2007.4433897>.
- Ziliani, Matteo G., Rabih Ghostine, Boujemaa Ait-El-Fquih, Matthew F. McCabe, и Ibrahim Hoteit. 2019. „Enhanced flood forecasting through ensemble data assimilation and joint state-parameter estimation“. *Journal of Hydrology* 577 (July): 123924. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123924>.

7. Prilog

Kopija rada:

M. Milašinović, D. Prodanović, B. Zindović, B. Stojanović, N. Milivojević (2021): *Control theory-based data assimilation for hydraulic models as a decision support tool for hydropower systems: sequential, multi-metric tuning of the controllers*. Journal of Hydroinformatics. 23 (3)
DOI: 10.2166/hydro.2021.078.