

## ANALIZA UTICAJA KOMPLEKSNOSTI 1D MODELA TEČENJA NA POSTUPAK ASIMILACIJE PODATAKA ZASNOVANE NA PRIMENI PID REGULATORA – PRELIMINARNI REZULTATI

Miloš MILAŠINOVIĆ, Budo ZINDOVIĆ, Nikola ROSIĆ, Dušan PRODANOVIĆ  
Građevinski fakultet u Beogradu

### REZIME

Upravljanje vodoprivrednim sistemima, posebno upravljanje rizicima od poplava, se zasniva na podacima koji su dobijeni različitim vrstama prognoza. Prognoziraju se promene nivoa na određenim rečnim deonicama, vrednosti oticaja sa slivova, dotoci u akumulacije, itd. Najčešće, ovakve prognoze zasnivaju se na hidrološko-hidrauličkim modelima, koji su prethodno kalibrisani koristeći izabrane vremenske serije iz prošlosti. Međutim, čak i tako kalibrisani modeli u kasnijim fazama eksploatacije ne mogu uvek predvideti pomenute veličine sa dovoljnom tačnošću. Razlozi za to su različiti, od nepoznavanja početnih i graničnih uslova do neodređenosti u ulaznim podacima. Stoga, prognoze bazirane na modelu se unapređuju uključivanjem i merenih podataka o stanju sistema kroz proces asimilacije. Cilj asimilacije je da rezultate dobijene prethodno kalibrisanim modelom koriguje i približi podacima koji su izmereni, uvažavajući neodređenosti i računatih i merenih podataka. Na taj način poboljšava se početna tačka od koje se vrše prognoze, tj. model se pokreće za neki kraći period u kome se raspolaže merenjima, koriguje se stanje dobijeno modelom i tako korigovano stanje se koristi kao početni uslov za kratkoročne prognoze u kojima model radi nezavisno. U ovom radu analizira se asimilaciona metoda za 1D modele tečenja u rekama, zasnovana na PID regulatoru kojim se stanje sistema (nivoi u rekama) ne podešava direktno već posredno, dodavanjem ili oduzimanjem fiktivnih protoka u čvorovima u kojima postoje merenja nivoa. Analizira se uticaj kompleksnosti hidrodinamičkog modela, poredeći modele tri nivoa kompleksnosti, na asimilaciju koja se zasniva na PID regulatoru.

**Ključne reči:** Prognoza, hidrološko-hidraulički model, asimilacija podataka, PID regulator

### UVOD

Upravljanje vodoprivrednim sistemima, posebno upravljanje rizicima od poplava zahteva različite vrste prognoza, od prognoza dotoka u razmatrani sistem, prognoze promene nivoa, prognoze meteoroloških uslova, itd. Proces prognoze može se vršiti na nekoliko načina. Tradicionalni postupak prognoze podrazumeva primenu odgovarajućih hidroloških i hidrodinamičkih modela kalibrisanih prema nekim izabranim vremenskim serijama iz prošlosti. Na taj način, parametri modela se podešavaju sa ciljem da se rezultati simulacija u određenoj meri poklope sa izmerenim vrednostima kontrolnih veličina, npr. protoka i nivoa. Tako kalibrisan model kasnije se koristi za simulaciju odgovora sistema na poremećaje koji nastaju nekim novim ulazom u sistem. Međutim, prognoze zasnovane samo na modelima često ne daju zadovoljavajuće rezultate u kasnijim fazama eksploatacije. Razlozi za to mogu se naći u nepouzdanosti podataka kojima se raspolaže i koji su korišćeni za kalibraciju, u nepouzdanosti graničnih i početnih uslova, promeni geometrije rečne deonice, itd. Konkretno, za kalibraciju linijskog modela tečenja potrebno je poznavati ulazne podatke, poznavati nivoe duž deonice za koju se formira model, kao i poznavanje graničnih i početnih uslova. Nažalost, od svih podataka jedino se podaci o merenim nivoima mogu uzeti sa nekom većom sigurnošću. Zbog toga, u cilju poboljšanja prognoze, često se koristi postupak asimilacije podataka, koja kombinuje rezultate simulacija dobijenih prethodno kalibrisanim modelom i merene podatke kontrolnih veličina. Na taj način, dajući određeno poverenje i merenim podacima i podacima iz modela, postupkom asimilacije, poboljšava se prognoza. Ovakva dva vida prognoze, zasnovana samo na modelu ili na kombinaciji model/mereni podaci spadaju u grupu prognostičkih metoda koje se baziraju na modelu (eng. *model-driven forecasting*). Za razliku od ovog pristupa, postoje metode koje se baziraju samo na merenim

podacima i uspostavljanju veštačkih, nelinearnih veza između merenih podataka (*data driven models*) koji u sebi nemaju nikakvu eksplicitnu fizičku povezanost između merenih podataka, za razliku od *model-driven* metoda.

Postoje različite metode koje se koriste za asimilaciju podataka. Većina poznatih metoda asimilacije podataka zasniva se na primeni određenih statističkih operacija nad podacima dobijenim modelom i izmerenim podacima. Najrasprostranjenija metoda za asimilaciju podataka naziva se Ensemble Kalman filter (EnKF) koja vrši korekciju modela prema merenjima, ponderišući neodređenosti (eng. *uncertainty, error*) podatka dobijenog modelom i izmerenog podatka (Evensen 2003). Pomenuta metoda, sa različitim modifikacijama, često se koristi za potrebe prognoza u hidrotehničkim i vodoprivrednim analizama. Barthélémy i ostali, 2017, Habert i ostali, 2016 koriste EnKF metodu za potrebe predikcije poplava, kombinujući ovu metodu sa linijskim modelom neustaljenog tečenja MASCARET (Goutal i Maurel 2002). Primena MIKE 11 i MIKE 21 hidrauličkih modela asimilacije podataka za prognozu poplava razvijena je od strane (Madsen, Hartnack, i Sørensen 2006). Primena EnKF metode za korekciju stanja u linijskom hidrauličkom modelu u realnom vremenu bila je predmet istraživanja sprovedenog od strane (Jean-Baptiste i ostali 2011). Česta je primena i u asimilaciji hidroloških modela. (Clark i ostali 2008) koriste asimilaciju podataka za korekciju stanja dobijenih hidrološkim modelom na osnovu izmerenih vrednosti protoka. Asimilacija hidrološko-hidrauličkog modela na osnovu radarskih snimaka za prognozu protoka na Amazonu korišćena je u (Paiva i ostali 2013).

Asimilacione metode koje se zasnivaju na statističkoj obradi rezultata iz modela, dobijenih višestrukim ponavljanjem simulacija pomoću modela, često zahtevaju dosta vremena za proračun. Stoga, često se pribegava i alternativnim metodama asimilacije, kao što su primena različitih evolucionih optimizacionih algoritama ili primena PID regulatora u cilju redukovanja vremena potrebnog za proračune. Postupak primene PID regulatora kao asimilacione metode (Rosić, Jaćimović, i ostali 2017; Rosić, Prodanović, i ostali 2017) razvijena je za potrebe asimilacije izmerenih nivoa na vodomernim stanicama na Dunavu i hidrodinamičkog modela razvijenog u FEQ modelu (Franz i Melching 1997).

Ovaj rad analizira uticaj kompleksnosti linijskog modela tečenja na asimilacionu metodu zasnovanu na primeni

PID regulatora. Cilj je uporediti uticaj primene jednostavnog hidrodinamičkog modela zasnovanog na principu Cellular Automata, uticaj modela difuzionog talasa i uticaj punog modela dinamičkog talasa.

## METODOLOGIJA

### Primena PI(D) regulatora u procesu asimilacije podataka

PID (Proportional-Integral-Derivative controller) regulator predstavlja matematički aparat sa povratnom spregom (izlaz iz sistema utiče na naredne ulaze u sistem) koji se koristi u kontrolnoj teoriji dinamičkih sistema (Karl Astrom 2002). PID regulator kontinualno računa vrednost greške  $e$  (eng. *error*) kao razliku između trenutne, izmerene, vrednosti procesne promenljive (eng. *Process variable*) i neke referentne vrednosti koju bi trebalo dostići (setpoint). Svrha primene PID regulatora je da tokom vremena simulacije smanjuje grešku preko kontrolne promenljive  $u$  (eng. *Control variable*). Opšti oblik PID regulatora dat je jednačinom (1).

$$u(t) = P \cdot e(t) + I \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt + D \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

gde je  $P$  proporcionalni koeficijent,  $I$  integralni koeficijent i  $D$  derivativni koeficijent. Prvi element PID regulatora uzima u obzir samo trenutnu vrednost greške i vrednost kontrolne promenljive  $u$  prilagođava trenutnoj vrednosti greške. Korišćenje samo ovog elementa u kontrolnoj teoriji primenljivo je samo na neke izuzetno spore procese. Uglavnom je potrebno vrednost kontrolne promenljive prilagoditi i na prethodne vrednosti greške. Stoga se koristi drugi (integralni) element PID regulatora. U nekim slučajevima u kojima promene stanja izuzetno brzo nastupaju, uvodi se treći (derivativni) član PID regulatora koji zavisi od brzine promene greške. U zavisnosti od toga koji elementi PID kontrole se koriste, razlikuju se P (Proportional) regulator, PI (Proportional-Integrative) regulator, itd.

Primenjen na hidrodinamički model, PID regulator koristi samo proporcionalni i integrativni koeficijent (u nastavku PI regulator). Ideja je da se postupak asimilacije podataka PI kontrolerom obavlja uvođenjem unutrašnjeg graničnog uslova u hidrodinamički model. Taj unutrašnji granični uslov prikazan je u vidu fiktivnog dotoka koji se dodaje ili oduzima u čvorovima modela u kojima postoji merenje nivoa vode.

Generalno, ovakav postupak može se prikazati jednačinama (2) i (3).

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

$$Q_{PI} = P \cdot e(t) + I \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (3)$$

gde je  $Z_{mer}(t)$  izmerena vrednost nivoa u trenutku  $t$ ,  $Z_{model}(t)$  vrednost nivoa dobijena modelom u trenutku  $t$  a  $Q_{PI}$  vrednost protoka koji se u zavisnosti od vrednosti greške  $e(t)$  oduzima ili dodaje u čvoru u kom postoji merenje nivoa.

Oblik jednačina (2) i (3) podrazumeva da je vremenski interval sa kojim se vrši merenje nivoa vode jednak vremenskom koraku koji se koristi u modelu, tj. u svakom vremenskom trenutku u kom se pomoću modela računaju nivoi vode postoje i izmereni podaci. U praksi, to najčešće nije slučaj, već se merenja vrše na većem vremenskom intervalu nego što je vremenska diskretizacija u modelu. Stoga je potrebno korigovati jednačinu 2. Korigovani oblik predstavljen je jednačinama (5) i (5).

$$e(t) = [Z_{obs}(t_{obs}) - Z_{model}(t)] \cdot C \quad (4)$$

$$C = \begin{cases} 1 & t = t_{obs} \\ \frac{t - t_{obs}^{prev}}{t_{obs}^{next} - t_{obs}^{prev}} & t \neq t_{obs} \end{cases} \quad (5)$$

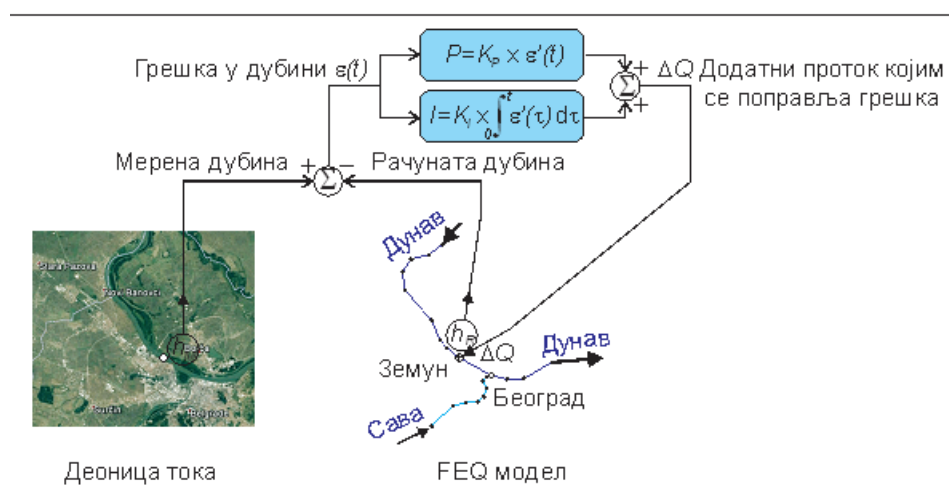
$C$  predstavlja koeficijent korekcije kojim se greška između merenih nivoa i nivoa dobijenih modelom koriguje u zavisnosti od toga koliko je vremena prošlo od poslednjeg merenja.  $t$  predstavlja trenutno vreme u simulaciji,  $t_{obs}^{prev}$  prethodni vremenski trenutak u kom postoji merenje nivoa a  $t_{obs}^{next}$  naredni trenutak u kom postoji merenje nivoa.

Svrha dodavanja fiktivnog dotoka u numerički model linijskog neustaljenog tečenja je korekcija stanja (nivoa) koji bi se dobio primenom modela nezavisno od merenih podataka. Na taj način, prethodno kalibrisani model se “doteruje” do stanja (pod stanjem se podrazumeva nivo) koje se u određenoj meri poklapa sa izmerenim podacima I omogućava se bolja polazna osnova za prognoze pomoću modela kada nema merenih podataka.

Korekcijom stanja dobijenog hidrodinamičkim modelom postavlja se pitanje kolika je kompleksnost modela neophodna. Stoga, ovaj rad analizira tri modela, različitog nivoa kompleksnosti u kombinaciji sa asimilacijom podataka zasnovanoj na prethodno opisanom algoritmu PI regulatora.

#### Cellular Automata 1D model tečenja

Jedan od najjednostavnijih modela tečenja zasniva se na primeni Cellular Automata (CA) principa (Wolfram 1998). CA princip zasniva se na podeli računskog prostora na ćelije, pri čemu svaku ćeliju definišu tri svojstva: stanje, susedstvo i pravila interakcije sa susedstvom. Stanje se definiše izabranom promenljivom



Slika 1. Shematski prikaz asimilacije merenja i rezultata modela neustaljenog tečenja primenom PI regulatora (preuzeto iz Rosić i saradnici, 2017)

(npr. nivo). Susedstvo predstavlja ćelije sa kojima svaka ćelija vrši interakciju preko pravila interakcije (razmena protoka). Kao produkt interakcije ćelija menja se stanje svake ćelije. Koristeći opisani postupak, Dottori i Todini, 2010, 2011 su razvili model tečenja zasnovan na CA pristupu koji se koristi za pretežno difuzione probleme. U ovom modelu stanje ćelije definiše se kao nivo vode  $Z$  (ili dubina  $h$ ), dok se pravila interakcije između susjednih ćelija opisuju Šezi-Maningovom jednačinom (jednačina (7)). Promena stanja u ćeliji vrši se pomoću jednačine kontinuiteta (jednačina (7)). Shematski prikaz susedstva u CA modelu dat je na slici 2a.

$$Q_{ij}^n = \text{sign}(Z_i^{n-1} - Z_j^{n-1}) \cdot \frac{d_{ij}}{n} \cdot (h_i^{n-1} - h_j^{n-1})^{5/3} \cdot \sqrt{\frac{|Z_i^{n-1} - Z_j^{n-1}|}{\Delta x}} \quad (6)$$

$$Z_i^n = Z_i^{n-1} - \Delta t \cdot \frac{\sum_{j=1}^4 Q_{ij}^{n-1} + Q_{PI,i}^{n-1}}{A_i} \quad (7)$$

$Z_i^{n-1}$  predstavlja nivo vode u razmatranoj ćeliji u prethodnom vremenskom trenutku,  $Z_i^n$  je dubina vode u razmatranoj ćeliji  $i$  u  $n$ -tom vremenskom trenutku,  $Z_j^{n-1}$  je dubina vode u susjednoj ćeliji u prethodnom vremenskom trenutku ( $j=1,2,3,4$ ).  $h$  označava dubinu vode u odgovarajućoj ćeliji i odgovarajućem vremenskom trenutku.  $Q_{ij}^n$  predstavlja protok između susjednih ćelija  $i$  i  $j$ ,  $d_{ij}$  širinu kontaktne ivice između susjednih ćelija,  $n$  hrapavost po Maningu,  $\Delta x$  i  $\Delta t$  predstavljaju prostornu u vremensku distretizaciju, respektivno.  $A_i$  predstavlja površinu razmatrane ćelije dok je  $Q_{PI,i}$  fiktivni protok definisan jednačinom (3) kojim se koriguje stanje ćelije  $i$ .

**Model difuzionog talasa**

Sledeći model testiran u kombinaciji sa asimilacijom podataka primenom PI regulatora je model difuzionog talasa (Ivetić 2000). Originalno, model difuzionog talasa rešava Sen-Venanove jednačine sa zanemarenjem uticaja inercijalnog člana, tj. zadržava uticaj sila pritiska, težine i trenja. Kako bi se rešavali i problemi povratnog tečenja, originalni oblik modela difuzionog talasa je dopunjen članom koji predstavlja lokalnu komponentu ubrzanja. Na taj način matematički model neustaljenog tečenja definiše se jednačinama (9) i (9).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (8)$$

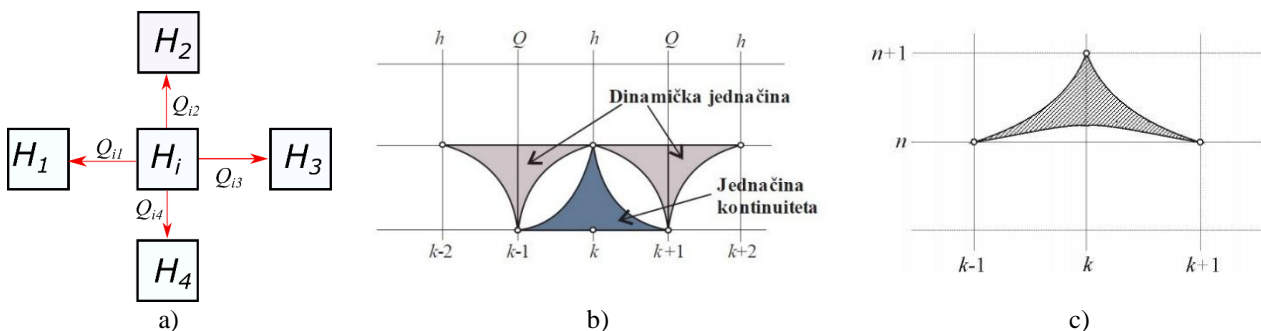
$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + I_d + \frac{n^2}{A^2 R^{4/3}} Q|Q| = 0 \quad (9)$$

Član  $q$  u jednačini predstavlja bočni dotok koji je posledica dodavanja fiktivnog dotoka sračunatog primenom PI regulatora. Primenom eksplicitne numeričke sheme (slika 2b) matematički model se prevodi u numerički koji je korišćen u ovom radu.

Numerički model dat je jednačinama (12), (12) i (12).

$$h_k^{n+1} = h_k^n - \frac{\Delta t}{B} \frac{Q_{k+1}^n - Q_{k-1}^n}{2\Delta x} + \Delta t \cdot \frac{Q_{PI,k-1}^n}{B\Delta x} \quad (10)$$

$$Q_{k+1}^{n+1} = \frac{\frac{Q_{k+1}^n}{g \left( \frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right) \Delta t} + I_d - \frac{h_{k+2}^{n+1} - h_k^{n+1}}{\Delta x}}{\frac{1}{g \left( \frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right) \Delta t} + K |Q_{k+1}^n|} + Q_{PI,k+1}^{n+1} \quad (11)$$



Slika 2. a) Susedstvo u Cellular Automata modelu; b) Numerička shema za diskretizaciju jednačina difuzionog talasa; c) Numerička shema Lax-Wendroff

$$K = \frac{n^2}{\left(\frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2}\right)^2 \left(\frac{R_{k+2}^{n+1} + R_k^{n+1}}{2}\right)^{4/3}} \quad (12)$$

Veličina  $B$  predstavlja širinu vodenog ogledala,  $g$  gravitaciono ubrzanje a  $R$  hidraulički radijus. Bočni dotok  $q$ , definisan u jednačini (8), predstavljen je kao raspodeljeni dotok dobijen pomoću  $PI$  regulatora po deonici dužine  $\Delta x$  i širine vodenog ogledala  $B$ . Potrebno je naglasiti da je uticaj količine kretanja koju unosi neki bočni dotok u dinamičku jednačinu u ovom modelu zanemaren.

### Model dinamičkog talasa – numerička shema Lax - Wendroff

Poslednji model neustaljenog tečenja testiran u kombinaciji sa asimilacijom merenih nivoa pomoću  $PI$  regulatora je pun model dinamičkog talasa, koji ne zanemaruje nijedan član u dinamičkoj jednačini. Pone Sen-Venanove jednačine dinamičkog talasa date su u nastavku.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (g \cdot A \cdot h) - g \cdot A \cdot I_d + g \cdot n^2 \frac{Q \cdot |Q|}{A \cdot R^{4/3}} = 0 \quad (13)$$

Za diskretizaciju matematičkog modela dinamičkog talasa korišćena je eksplicitna numerička shema Lax-Wendroff (Lax i Wendroff 1960). U numeričkom

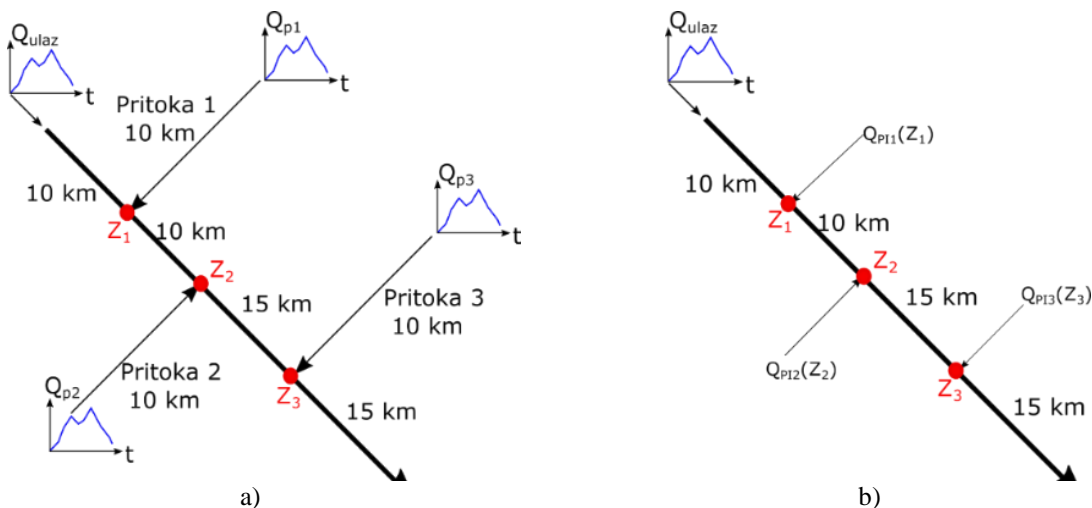
modelu dinamičkog talasa dodati su i članovi koji prikazuju dotok sa strane definisan  $PI$  regulatorom.

$$h_k^{n+1} = h_k^n - \frac{\Delta t}{B} \frac{Q_{k+1}^n - Q_{k-1}^n}{2\Delta x} + \frac{Q_{pi,k}^n}{B\Delta x} \Delta t \quad (14)$$

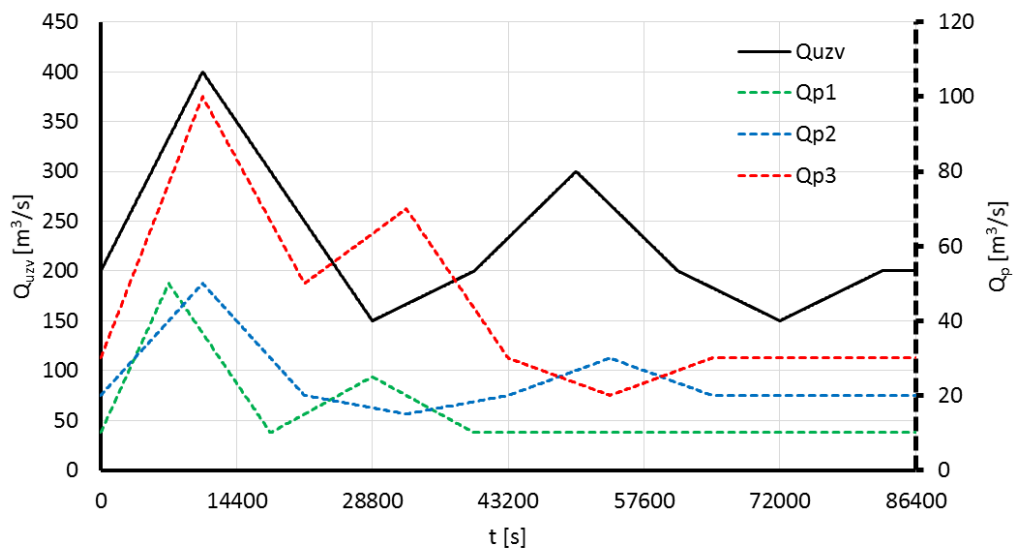
$$Q_k^{n+1} = Q_k^n - \Delta t \left( 2 \frac{Q_k^n}{A_k^n} \cdot \frac{Q_{k+1}^n - Q_{k-1}^n}{2\Delta x} - \left( \frac{Q_k^n}{A_k^n} \right)^2 \cdot \frac{A_{k+1}^n - A_{k-1}^n}{2\Delta x} \right) - \left( -g A_k^n I_d + g n^2 \frac{Q_k^n |Q_k^n|}{A_k^n (R_k^n)^{4/3}} \right) + Q_{pi,k}^{n+1} \quad (15)$$

### NUMERIČKI PRIMER

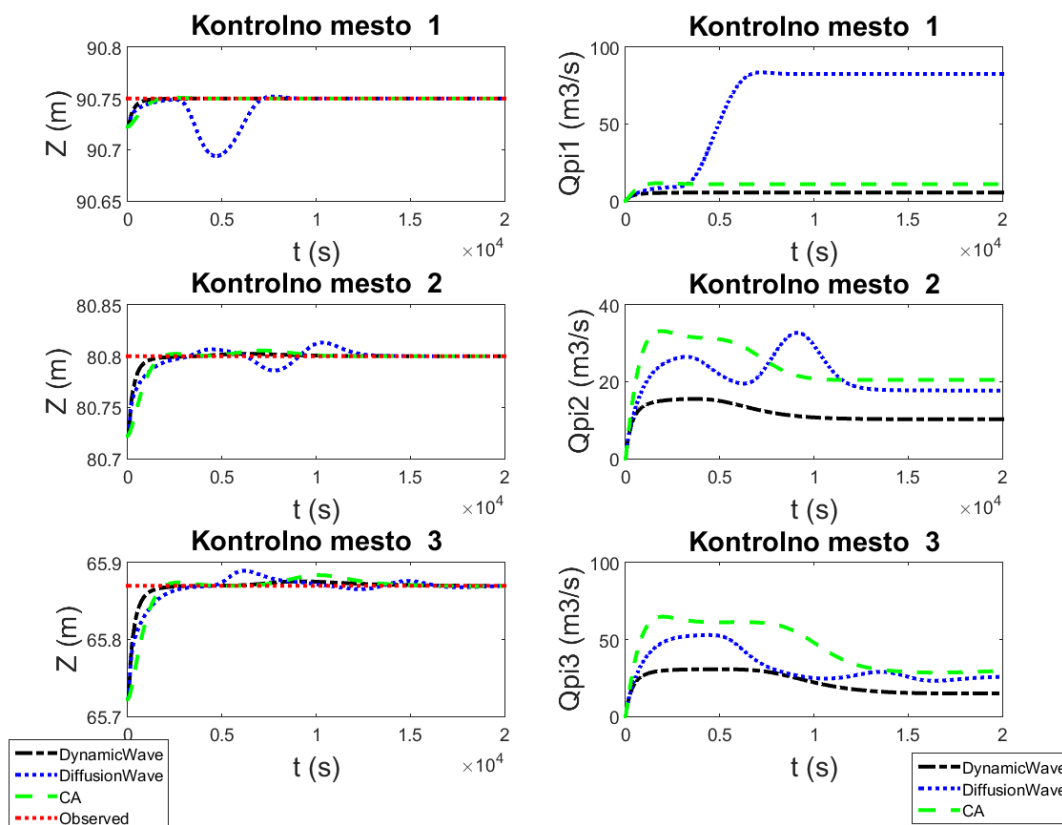
Testiranje je obavljeno na jednostavnom primeru neustaljenog tečenja u dugačkom kanalu pravougaonog poprečnog preseka. Dužina kanala je 50 km a širina 250 m. Podužni nagib dna je konstantan i iznosi 1‰. Hrapavost po Maningu iznosi  $0,03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ . Prostorna diskretizacija, u zavisnosti od modela usvojena je na 125 i 250 m, a prema CFL uslovu stabilnosti usvajan je i vremenski korak. Pošto se testiranje predložene asimilacione metode vrši na veštački generisanom primeru, potrebno je nekako generisati i „merene“ vrednosti nivoa (*true state*). Kako bi se generisali podaci prema kojima se vrši asimilacija, kreiran je model u programskom paketu HEC RAS. Model se sastoji od razmatranog glavnog kanala (karakteristike prethodno opisane) i tri pritoke pravougaonog poprečnog preseka (slika 3a). Sve tri pritoke su dužine 10 km. Na uzvodnoj granici glavnog toka i na uzvodnim krajevima pritoka zadati su sintetički hidrogrami (slika 4).



Slika 3. a) Rečna mreža koja služi za generisanje „merenih“ podataka; b) Glavni tok sa  $PI$  regulatorima na mernim mestima



Slika 4. Hidrogrami na uzvodnim krajevima rečne mreže koji se koriste za generisanje „merenih“ podataka



Slika 5. Asimilacija nivoa i vrednosti protoka koji se dodaju/oduzimaju na tri merne lokacije primenom PI regulatora ( $P=10, I=1, D=0$ ) – slučaj dostizanja ustaljenog tečenja

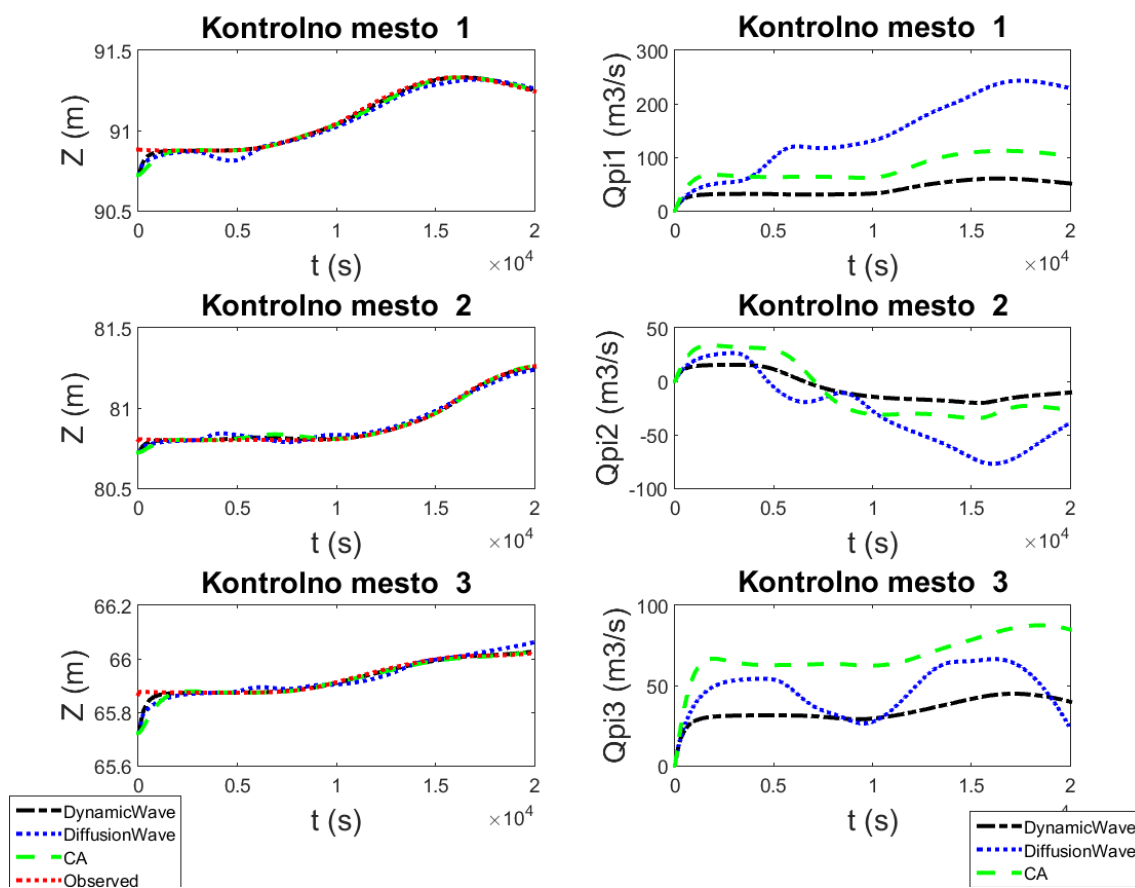
Kao nizvodni granični uslov na glavnom toku figuriše normalna dubina. Transformacijom talasa u opisanoj rečnoj mreži, u HEC RAS okruženju, i eksportovanjem nivoa na ušćima pritoka (usvojena kao lokacije na kojima postoji merenje nivoa) dobijaju se „mereni“ podaci potrebni za proces asimilacije. Generisani mereni podaci su sa vremenskim razmakom od 60 s, dok je vremenski korak, u zavisnosti od izabranog modela tečenja 5 do 10 s.

Za proces asimilacije pretpostavlja se da su dotoci sa pritoka nepoznati, pa se na mestima ušća, koja su ujedno i merna mesta, postavljaju PI regulatori kojima se dodaje/oduzima fiktivni dotok u cilju korekcije stanja dobijenog nekim od opisanih modela. Pretpostavlja se da su poznati samo podaci na uzvodnoj deonici glavnog toka, tj. da je poznat samo ulazni hidrogram na glavnom toku.

Polazna pretpostavka je, da je primenom PI regulatora moguće delimično rekonstruisati talase koji u glavni tok pristižu sa pritoka. Testiranje pretpostavke se obavlja za dva slučaja. Prvi slučaj je dostizanje ustaljenog tečenja (vrednosti proticaja pri ustaljenom režimu odgovaraju početnim uslovima neustaljenog tečenja). Drugi slučaj je analiza rada PI kontrolera pri neustaljenim uslovima.

## REZULTATI I DISKUSIJA

Slika 5 prikazuje promenu nivoa na „mernim“ mestima obeleženim na slici 3 za slučaj dostizanja ustaljenog tečenja i dodate/oduzete protoke kojima se koriguje stanje sistema. Sva tri hidrodinamička modela (Cellular Automata model, difuzioni talas I dinamički talas) imaju isti početni uslov, koji se razlikuje od početne merene vrednosti (koja se u ovom slučaju ne menja vremenom). PI regulatori na mestima nepoznatih protoka sa pritoka imaju iste vrednosti parametara,  $P=10$  i  $I=1$ .



Slika 6. Asimilacija nivoa i vrednosti protoka koji se dodaju/oduzimaju na tri merne lokacije primenom PI regulatora ( $P=10$ ,  $I=1$ ,  $D=0$ ) – neustaljeno tečenje

Slika 6 prikazuje promenu nivoa i promenu protoka koji dodaje/oduzima svaki od PI regulatora sa težnjom da se približi "stvarnom" stanju pri dostizanju stanja u neustaljenom režimu. Na slici 5 može se videti da sva tri modela podjednako dobro dostižu ustaljeno stanje. Na kontrolnom mestu 1, ustaljeno stanje najbrže se uspostavlja kada se koristi najjednostavniji hidrodinamički model, tj. oscilacije nivoa pri radu PI kontrolera su najmanje. Na ostala dva mesta sva tri modela podjednako brzo dostižu ustaljeno stanje (razlika nivoa manja od 5 mm) ali su oscilacije u postupku asimilacije i na ova dva kontrolna mesta (kontrolna mesta 2 i 3) najmanje kada se koristi najjednostavniji hidrodinamički model.

Prikazan je samo manji period asimilacije u odnosu na ukupno trajanje ulaznih hidrograma (slika 4) kojima se generiše neustaljeno stanje. Na slici 6 ponovo se uočava dobar trend pri asimilaciji, korišćenjem sva tri modela, mada treba napomenuti da i u ovom slučaju najjednostavniji model ima najmanje oscilacije u odnosu na vrednosti nivoa koje se usvajaju kao "merene".

Pored svega, potrebno je naglasiti da su u oba slučaja asimilacije (dostizanje ustaljenog stanja i neustaljeno stanje) korišćeni "merni" podaci sa vremenskim razmakom od 60 s, dok su vremenski koraci korišćeni u hidrodinamičkim modelima manji. U slučaju najjednostavnijeg modela, proračun je bio stabilan ukoliko nije usvajan vremenski korak veći od 10 s. Primena difuzionog i dinamičkog talasa uslovljavala je izbor vremenskog koraka sa maksimalnom vrednošću od 5 s.

## ZAKLJUČAK

U radu se prikazuje potencijalno korišćenje PI regulatora za prevazilaženje česte nekonzistentnosti između rezultata pojedinih hidrauličkih veličina dobijenih modelom sa izmerenim podacima tih istih veličina, čak i u slučaju prethodno dobro kalibrisanih modela. Standardne metode asimilacije modela sa merenim podacima (Ensemble Kalman Filter, Particle Filter) daju dobre rezultate, ali često narušavaju neka fizička ograničenja koja se podrazumevaju modelom (npr. jednačina kontinuiteta često nije ispoštovana). opisana metoda asimilacije primenom PI regulatora ima za cilj da prevaziđe prethodno pomenuti problem koji imaju standardne metode asimilacije. Međutim, treba napomenuti da ova metoda ima ograničenje u tome što uvodi pretpostavku da je glavni uzrok neslaganja

modela i merenja nepoznavanje početnih i graničnih uslova.

U radu je i prikazana analiza uticaja kompleksnosti hidrodinamičkog modela uparenog sa PI regulatorom za asimilaciju. U preliminarnim rezultatima vidi se da primena relativno jednostavnijih hidrodinamičkih modela može dati zadovoljavajuće rezultate u pogledu dostizanja traženog stanja u sistemu. Čak se primenom jednostavnijih modela može povećati vremenski korak čime se može ubrzati vreme potrebno za proračun.

Buduća istraživanja trebalo bi da obuhvate detaljniju analizu problematike izložene u radu, na dodatnim numeričkim primerima i na realnim rečnim sistemima. Pored dodatnih primera, potrebno je ispitati i međusobni uticaj PI kontrolera, tj. prostornu i vremensku spregu više PI regulatora, uvođenjem dodatnih veza kojima rad jednog PI regulatora direktno utiče na rad nekog drugog PI regulatora.

## LITERATURA

- [1] Barthélémy, S., S. Ricci, M. C. Rochoux, E. Le Pape, i O. Thual. 2017. „Ensemble-based data assimilation for operational flood forecasting – On the merits of state estimation for 1D hydrodynamic forecasting through the example of the “Adour Maritime” river“. *Journal of Hydrology* 552: 210–24. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.017>.
- [2] Clark, Martyn P., David E. Rupp, Ross A. Woods, Xiaogu Zheng, Richard P. Ibbitt, Andrew G. Slater, Jochen Schmidt, i Michael J. Uddstrom. 2008. „Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: Use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model“. *Advances in Water Resources* 31 (10): 1309–24. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.06.005>.
- [3] Dottori, F., i E. Todini. 2011. „Developments of a flood inundation model based on the cellular automata approach: Testing different methods to improve model performance“. *Physics and Chemistry of the Earth* 36 (7–8). Elsevier Ltd: 266–80. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.02.004>.
- [4] Dottori, F, i E Todini. 2010. „A 2D Flood Inundation Model Based on Cellular Automata Approach“. *XVIII International Conference on Water Resources*, izd. 2: 1–8.



- [5] 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>.
- [6] Franz, Delbert D, i Charles 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“. *Water-Resources Investigations Report*. <https://doi.org/10.3133/wri964240>.
- [7] Goutal, N, i F Maurel. 2002. „A finite volume solver for 1D shallow water equations applies to an actual river“. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 19 (January 2001): 1–19.
- [8] Habert, J., S. Ricci, E. Le Pape, O. Thual, A. Piacentini, N. Goutal, G. Jonville, i M. Rochoux. 2016. „Reduction of the uncertainties in the water level-discharge relation of a 1D hydraulic model in the context of operational flood forecasting“. *Journal of Hydrology* 532. Elsevier B.V.: 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.023>.
- [9] Ivetić, Marko V. 2000. „Računska hidraulika - Otvoreni tokovi“. *Građevinski fakultet*.
- [10] Jean-Baptiste, Nelly, Pierre Olivier Malaterre, Christophe Dorée, i Jacques Sau. 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). Inter-national Association for Mathematics and Computers in Simulation (IMACS): 2201–14. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2010.12.021>.
- [11] Karl Astrom, Johan. 2002. „PID Control“. *Control System Design*. <https://doi.org/10.1007/1-84628-148-2>.
- [12] Lax, Peter D., i B Wendroff. 1960. „Systems of conservation laws“. *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13 (2): 217–37. <https://doi.org/10.1002/cpa.3160130205>.
- [13] Madsen, Henrik, Johan Hartnack, i Jacob V T Sørensen. 2006. „Data Assimilation in a Flood Modelling System Using the Ensemble Kalman Filter“. *XVI International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR-XVI)* 16: 1–8.
- [14] Paiva, R. C.D., W. Collischonn, M. P. Bonnet, L. G.G. De Gonçalves, S. Calmant, A. Getirana, i J. Santos Da Silva. 2013. „Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for stream-flow forecast in the Amazon“. *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (7): 2929–46. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2929-2013>.
- [15] Rosić, Nikola, Nenad Jaćimović, Dušan Prodanović, i Boban Stojanović. 2017. „Data assimilation for operational reservoir management on the Danube river“. *7th International Conference on Information Society and Technology ICIST 2017*, 210–13.
- [16] Rosić, Nikola, Dušan Prodanović, Boban Stojanović, i Dragana Obradović. 2017. „ASIMILACIJA RAČUNSKOG MODELA DUNAVA OD NOVOG SADA DO HE Đ ERDAP 1“. *Vodoprivreda* 49 (288): 253–61.
- [17] Wolfram, Stephen. 1998. „Cellular automata as models of complexity“. *Nonlinear Physics for Beginners: Fractals, Chaos, Solitons, Pattern Formation, Cellular Automata, Complex Systems* 311 (5985): 197. <https://doi.org/10.1038/311419a0>.

## ANALYSIS OF THE 1D HYDRODYNAMIC MODEL COMPLEXITY INFLUENCE ON PID-CONTROLLER BASED DATA ASSIMILATION – PRELIMINARY RESULTS

by

Miloš MILAŠINOVIĆ, Budo ZINDOVIĆ, Nikola ROSIĆ, Dušan PRODANOVIĆ  
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

## Summary

Managing water systems, especially flood risks management is based on data obtained by different forecasts. State variables, such as water levels on certain river sections, catchment runoff, reservoir inflows are used for forecasting. Forecasts are often based on hydrological-hydrodynamic models, which have been previously calibrated using selected time series from the past. However, even calibrated models in later exploitation phases can produce solutions without satisfying accuracy. The reasons for this are numerous, from uncertainty in the initial and boundary conditions to uncertainty in the input data and uncertainty in riverbed geometry. The aim of the assimilation is to correct the results obtained from the previously calibrated model by coupling it with observed data. In this way, forecast starting point is improved. Model is

run for a short period which includes observed data, the state obtained by the model is corrected, and the corrected state is used as an initial state for short-term forecasting by using model independently. Assimilation method based on the PID controller for 1D river hydrodynamic models is analysed in this paper. This method adjusts the state in the hydrodynamic models according to the measurements indirectly by adding or subtracting the discharge in the junction/sections where water level is measured. The influence of the hydrodynamic model complexity is analysed, comparing the three models to assimilation based on the PID controller.

Key words: Forecasting, hydrological-hydrodynamic model, data assimilation, PID controller

Redigovano 2.11.2018.