



Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet



Metodologija za brzu asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova

-Doktorska disertacija-

Kandidat: Miloš R. Milašinović

Mentor: prof. dr Dušan Prodanović

Komisija za odbranu:

prof. dr Dušan Prodanović

prof. dr Dragan Savić

vprof. dr Miloš Stanić

doc. dr Budo Zindović

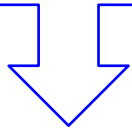
dr Nikola Milivojević

Beograd, 19.02.2021.

Asimilacija podataka u modelima otvorenih tokova

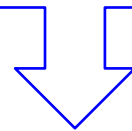


Šta je asimilacija podataka?



Usaglašavanje podataka o istoj veličini dobijenih iz različitih izvora (model i merenja).

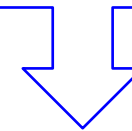
Šta je otvoreni tok?



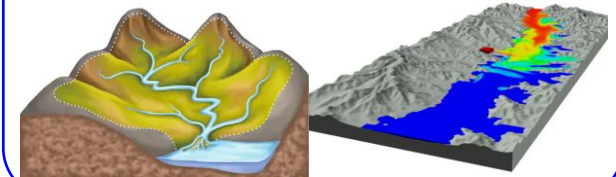
Reka, kanal,...



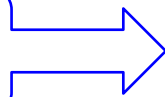
Šta je model otvorenog toka?



Matematički prikaz reke



Šta se dobija asimilacijom podataka?



Pouzdaniji model.

Čemu sve to služi?

Alat koji pomaže boljem upravljanju vodoprivrednim sistemima.

Stručnjaci zaduženi za upravljanje vodnim resursima svakodnevno se suočavaju sa brojnim izazovima:

- Suše



Stručnjaci zaduženi za upravljanje vodnim resursima svakodnevno se suočavaju sa brojnim izazovima:

- Suše
- Poplave




Stručnjaci zaduženi za upravljanje vodnim resursima svakodnevno se suočavaju sa brojnim izazovima:

- Suše
- Poplave
- Zagađenje vode




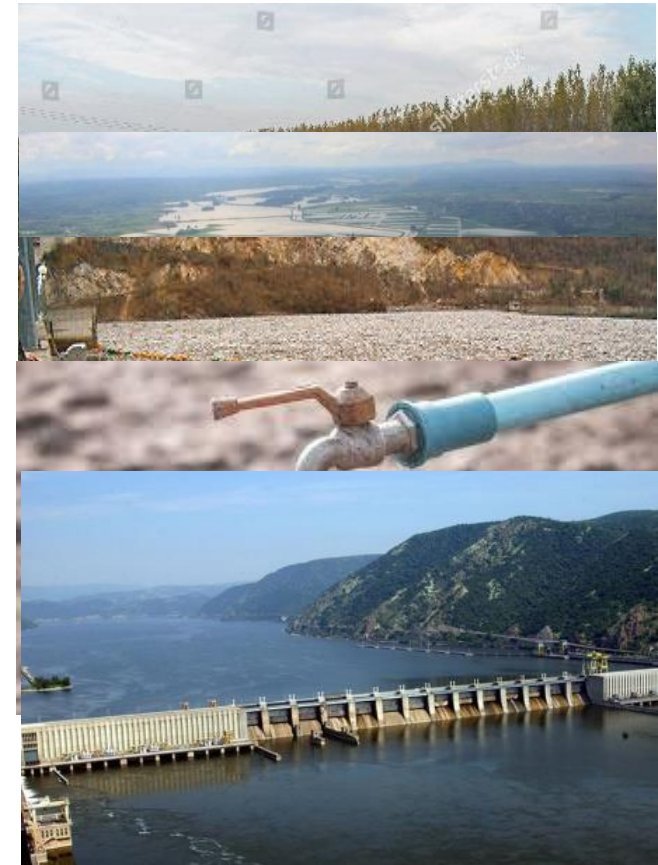
Stručnjaci zaduženi za upravljanje vodnim resursima svakodnevno se suočavaju sa brojnim izazovima:

- Suše
 - Poplave
 - Zagađenje vode
- 
- Pouzdanost vodosnabdevanja




Stručnjaci zaduženi za upravljanje vodnim resursima svakodnevno se suočavaju sa brojnim izazovima:

- Suše
 - Poplave
 - Zagađenje vode
- 
- Pouzdanost vodosnabdevanja
 - Optimalno upravljanje hidroenergetskim sistemima




Stručnjaci zaduženi za upravljanje vodnim resursima svakodnevno se suočavaju sa brojnim izazovima:

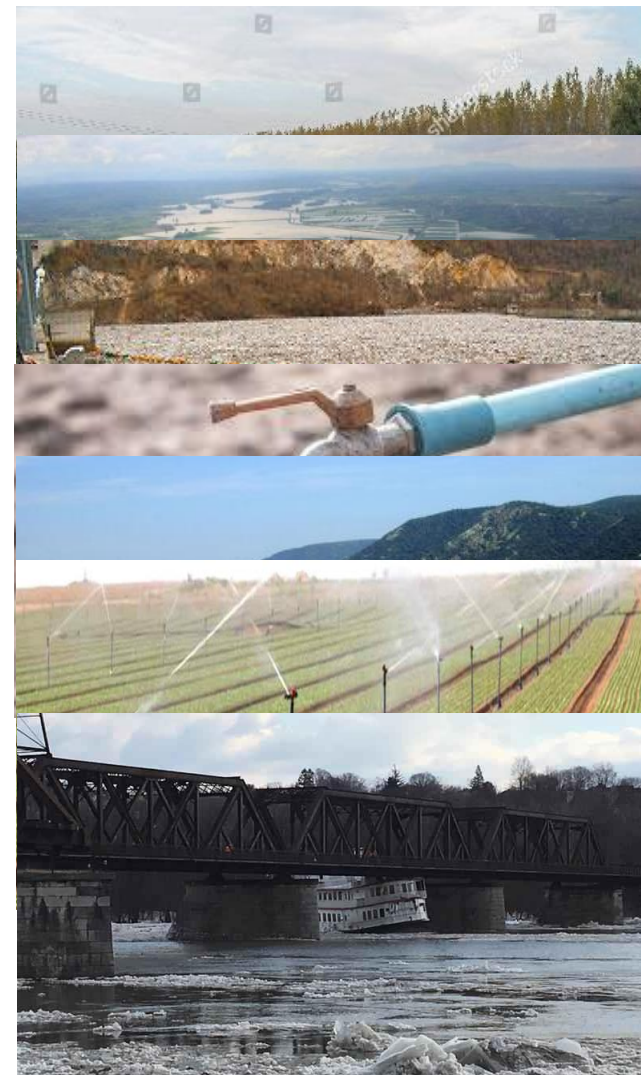
- Suše
 - Poplave
 - Zagađenje vode
- 
- Pouzdanost vodosnabdevanja
 - Optimalno upravljanje hidroenergetskim sistemima
 - Navodnjavanje, plovidbu, itd.



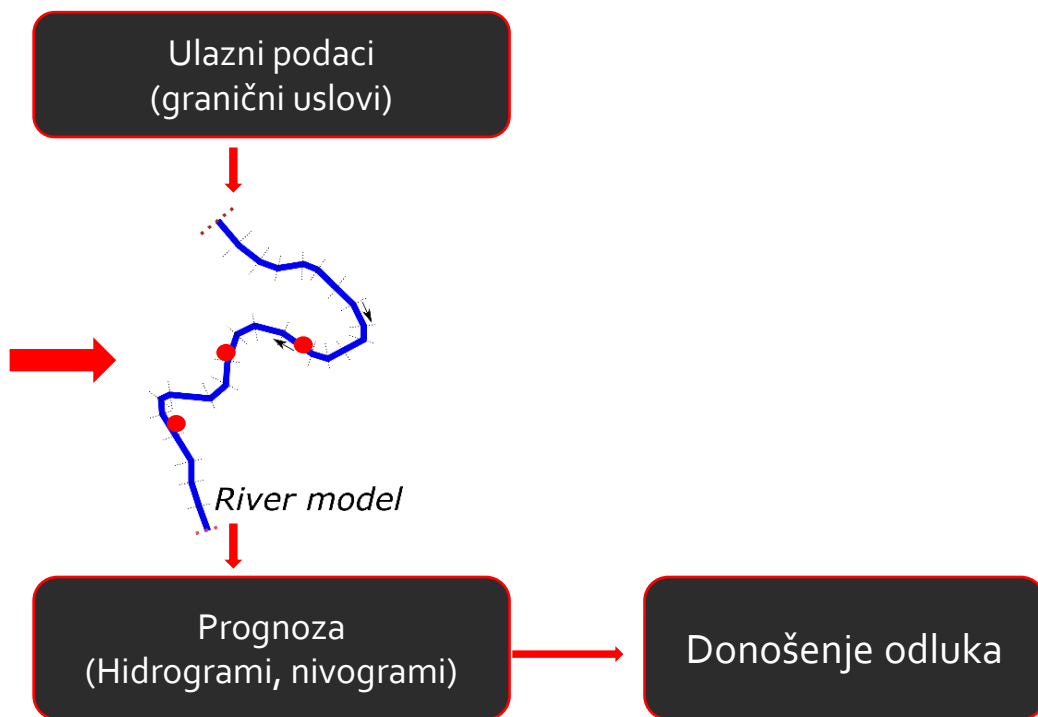
Stručnjaci zaduženi za upravljanje vodnim resursima svakodnevno se suočavaju sa brojnim izazovima:

- Suše
 - Poplave
 - Zagađenje vode
- 
- Pouzdanost vodosnabdevanja
 - Optimalno upravljanje hidroenergetskim sistemima
 - Navodnjavanje, plovidbu, itd.

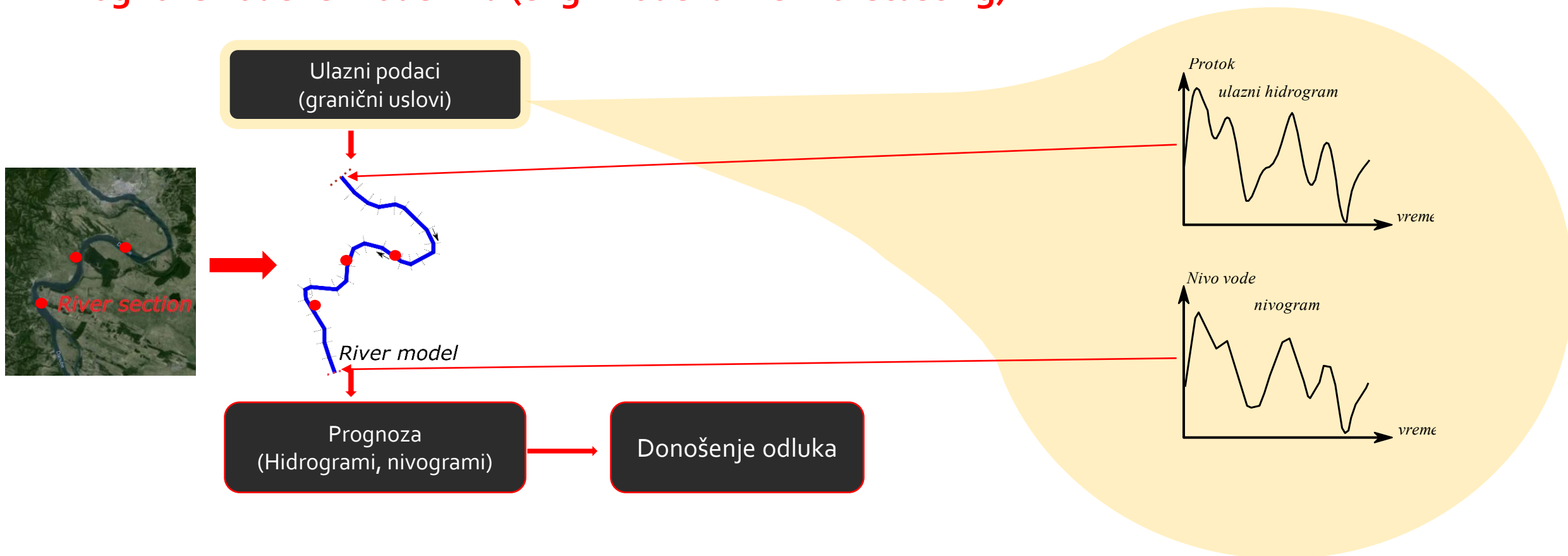
Za svakodnevno održivo upravljanje vodnim resursima neophodne pouzdane prognoze budućih scenarija (bliska budućnost)!



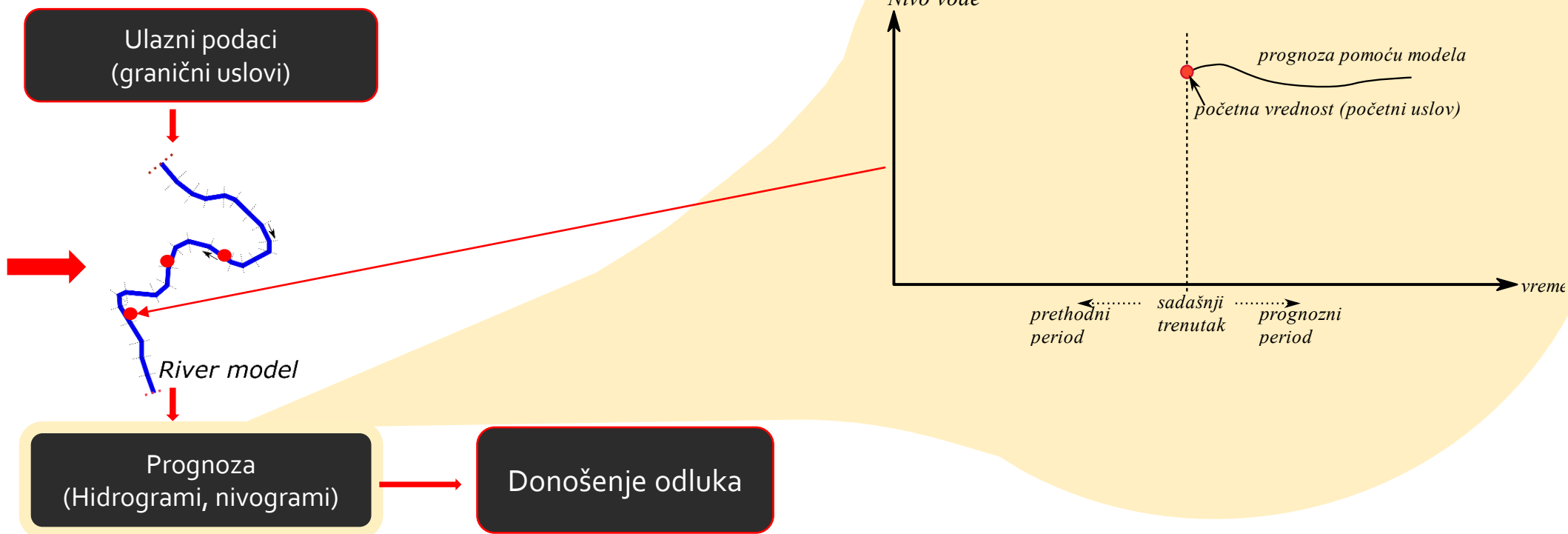
- **Šta predstavlja bliska budućnost?** → Nivoi na rekama, protoci, koncentracije zagađenja u narednih nekoliko dana/časova (prognozni period)
- **Kako proceniti ove veličine?**
- **Prognoze vođene modelima (eng. model driven forecasting)**



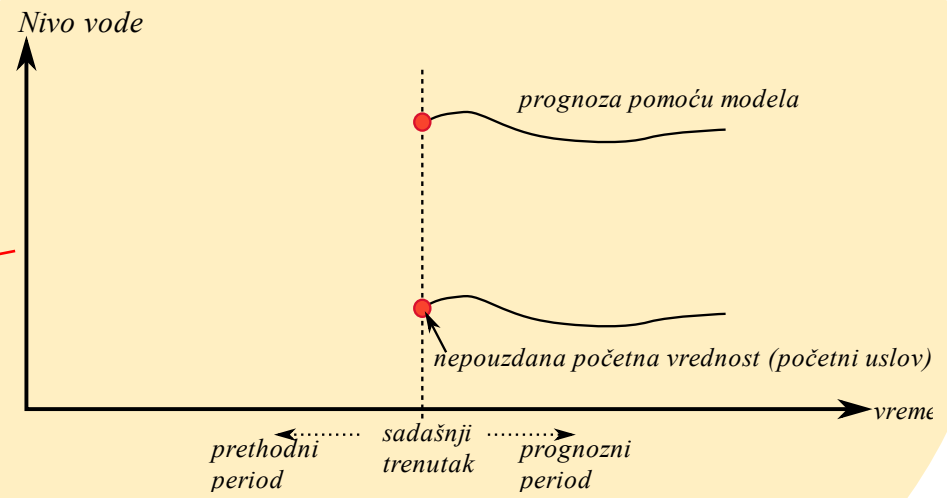
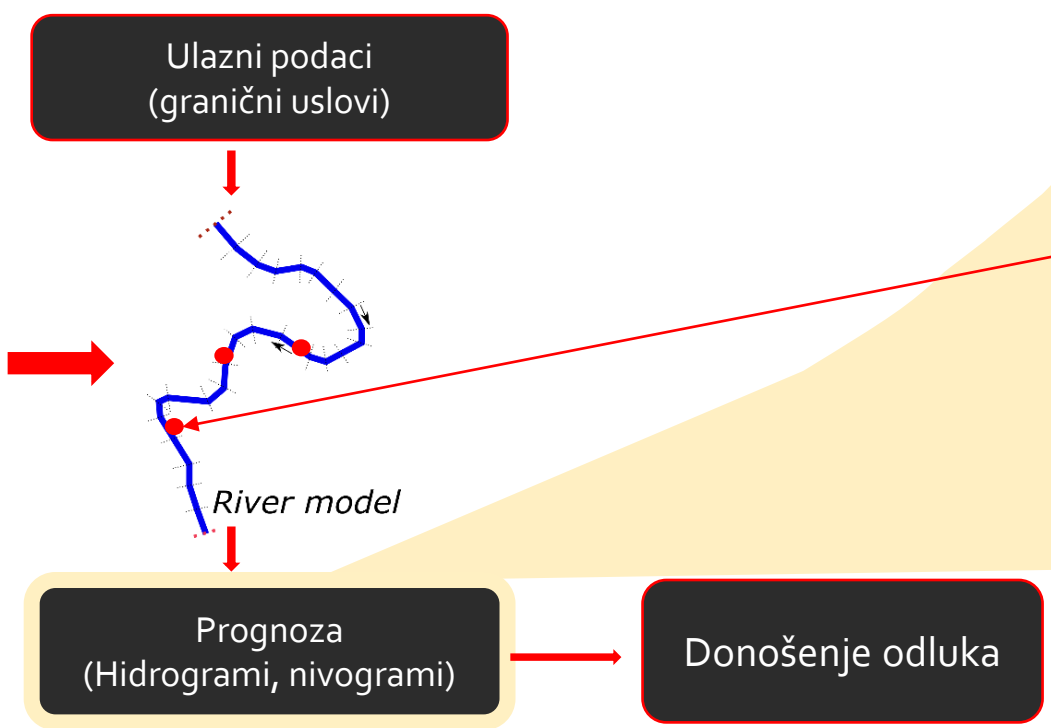
- **Šta predstavlja bliska budućnost?** → Nivoi na rekama, protoci, koncentracije zagađenja u narednih nekoliko dana/časova (prognozni period)
- **Kako proceniti ove veličine?**
- **Prognoze vođene modelima (eng. model driven forecasting)**



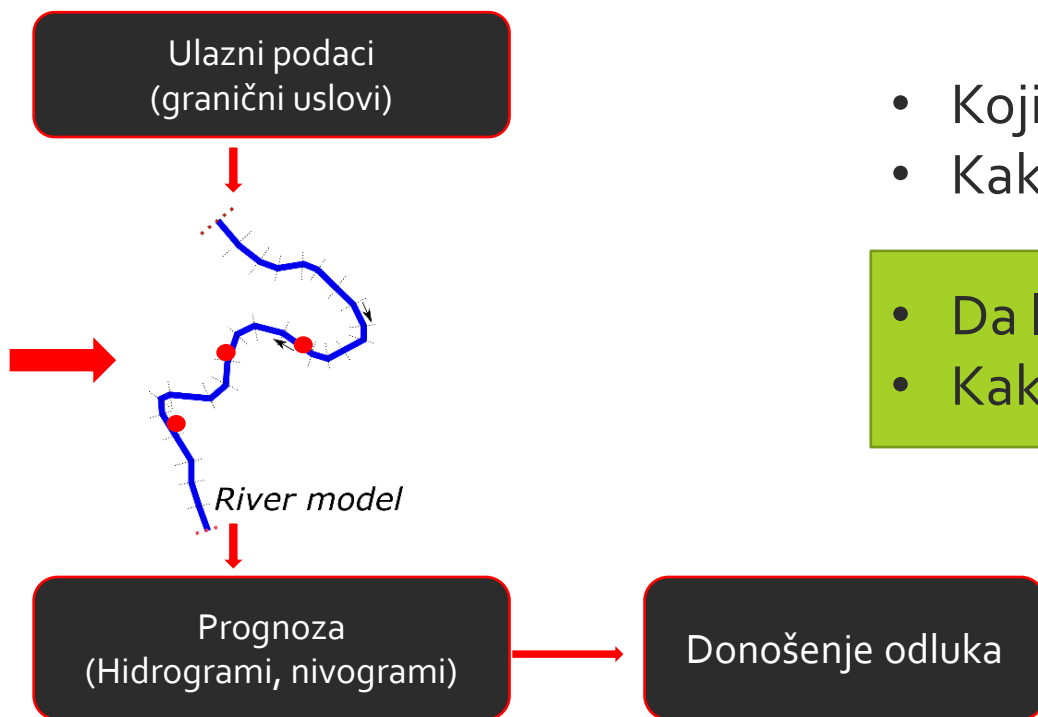
- Šta predstavlja bliska budućnost? → Nivoi na rekama, protoci, koncentracije zagađenja u narednih nekoliko dana/časova (prognozni period)
- Kako proceniti ove veličine?
- **Prognoze vođene modelima (eng. model driven forecasting)**



- Šta predstavlja bliska budućnost? → Nivoi na rekama, protoci, koncentracije zagađenja u narednih nekoliko dana/časova (prognozni period)
- Kako proceniti ove veličine?
- **Prognoze vođene modelima (eng. model driven forecasting)**



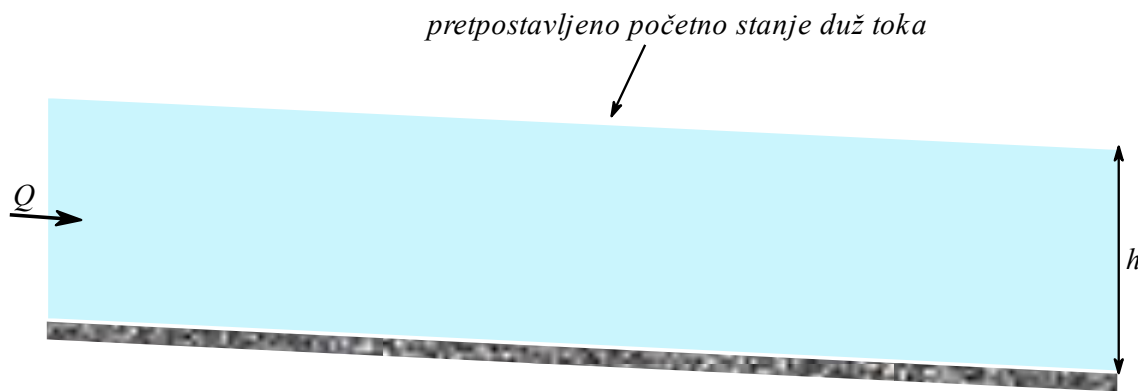
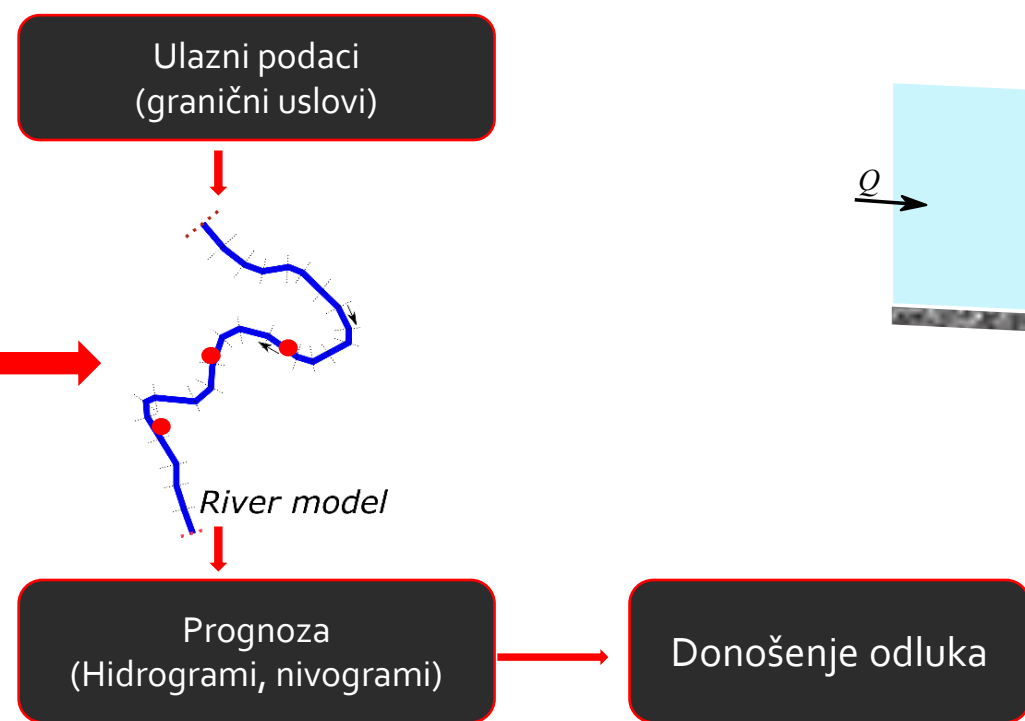
- **Šta predstavlja bliska budućnost?** → Nivoi na rekama, protoci, koncentracije zagađenja u narednih nekoliko dana/časova (prognozni period)
- **Kako proceniti ove veličine?**
- **Prognoze vođene modelima (eng. model driven forecasting)**



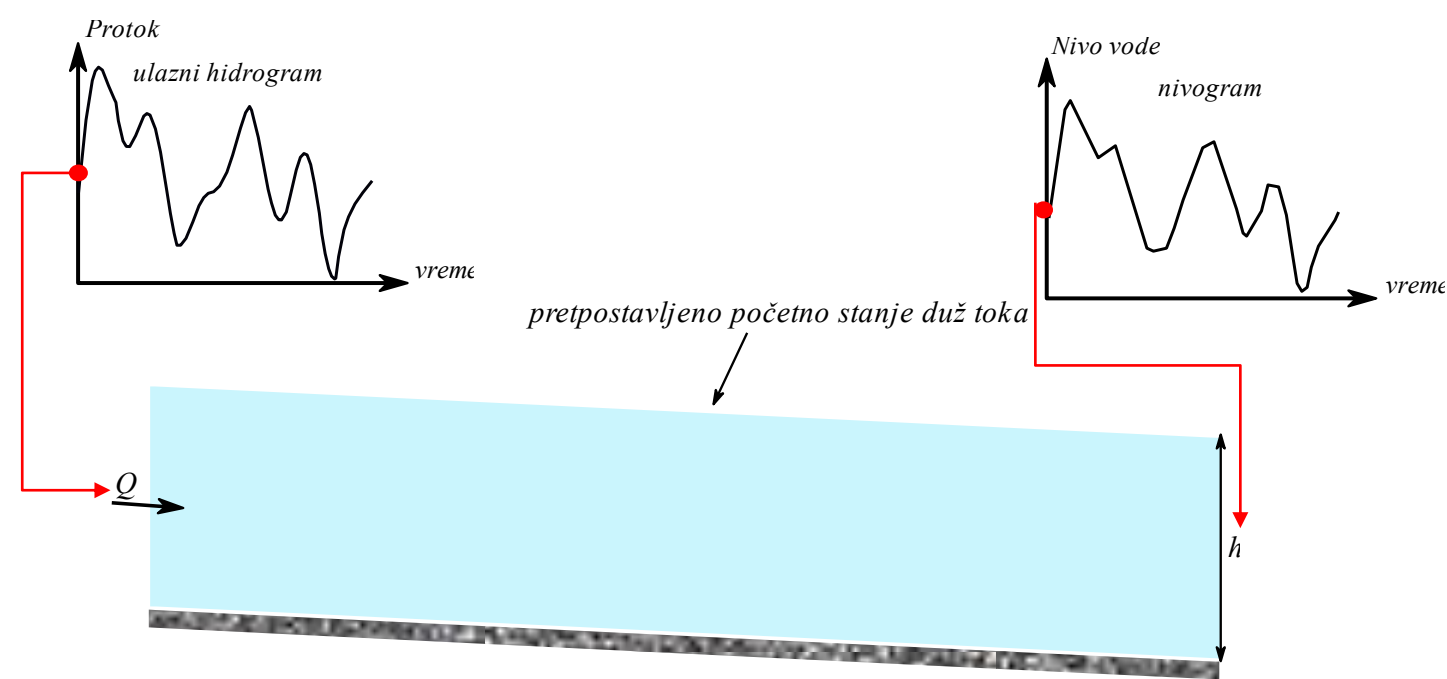
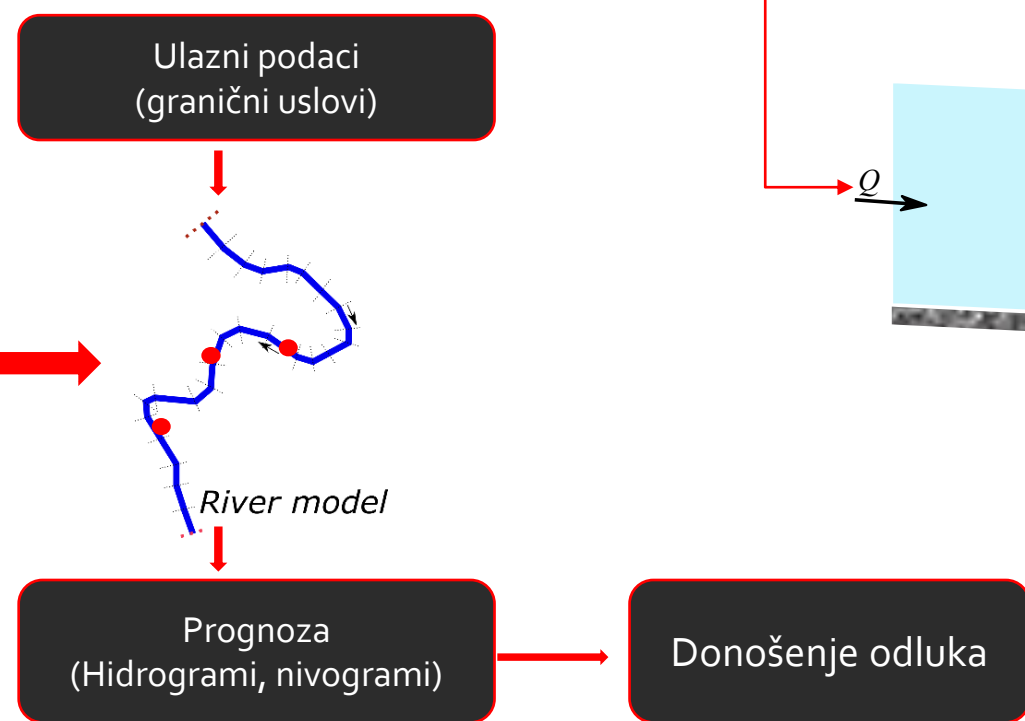
- Koji model koristiti?
- Kako proceniti parametre modela?

- Da li su ulazni podaci (granični uslovi) pouzdani?
- Kako proceniti početne uslove?

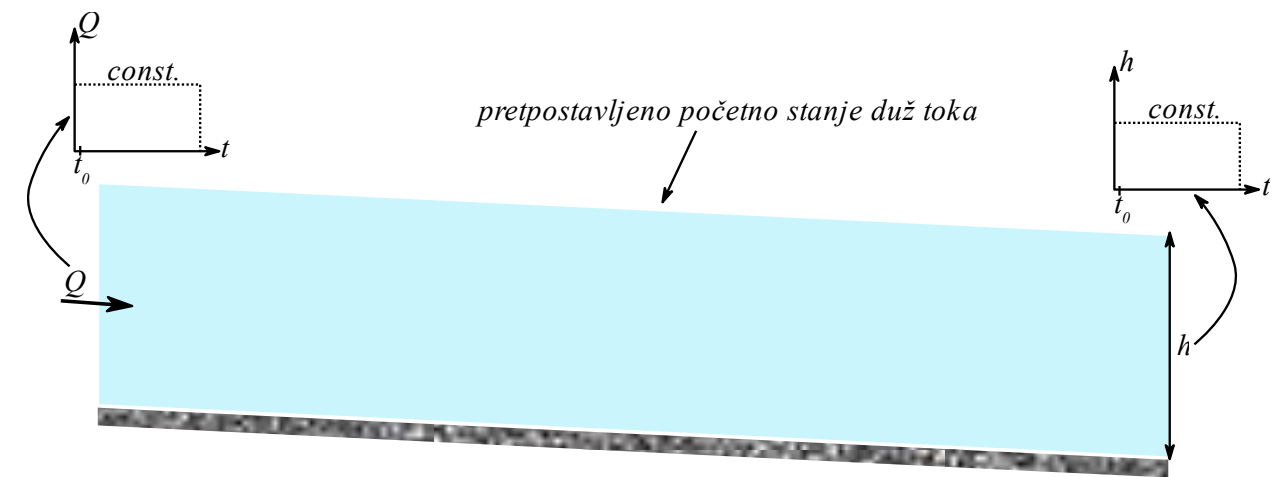
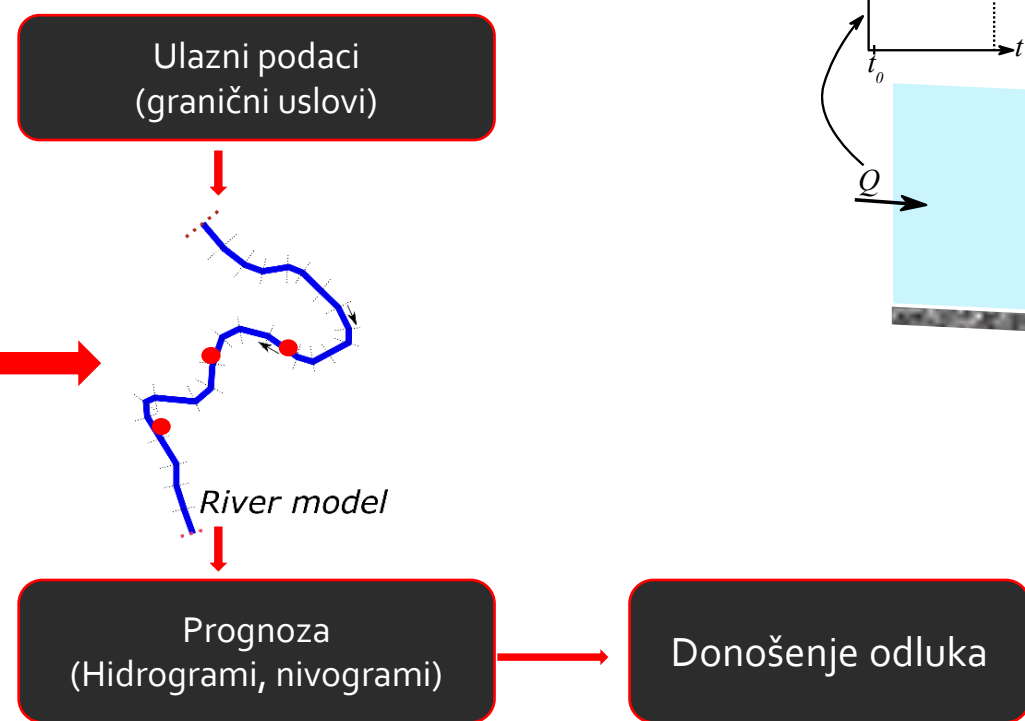
- Procena početnih vrednosti → Tradicionalni pristup



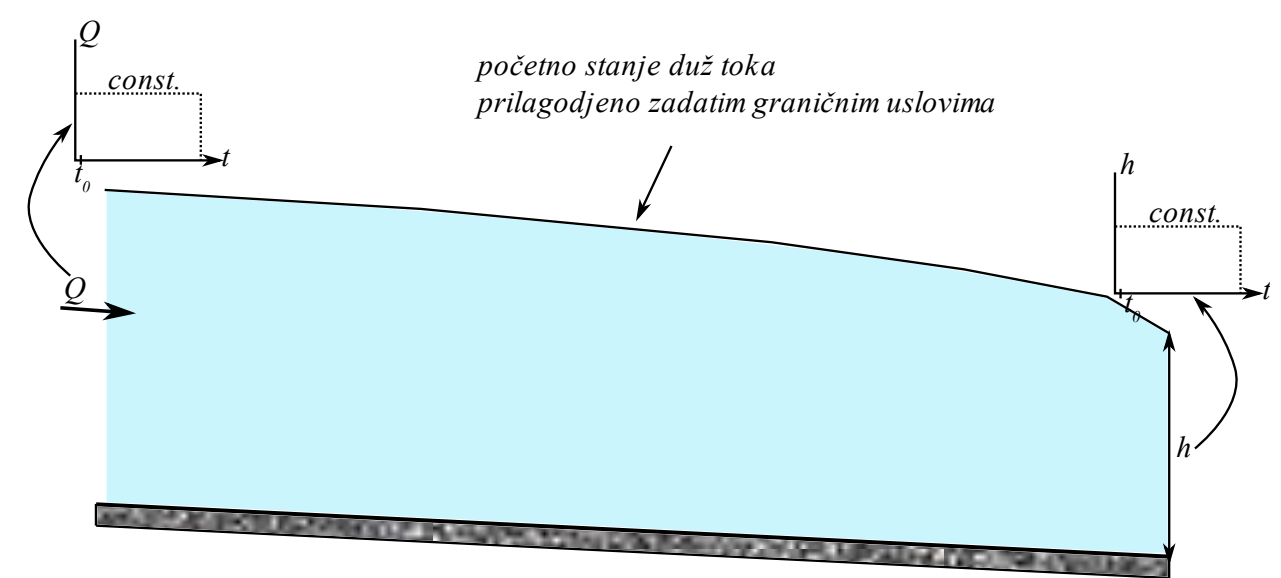
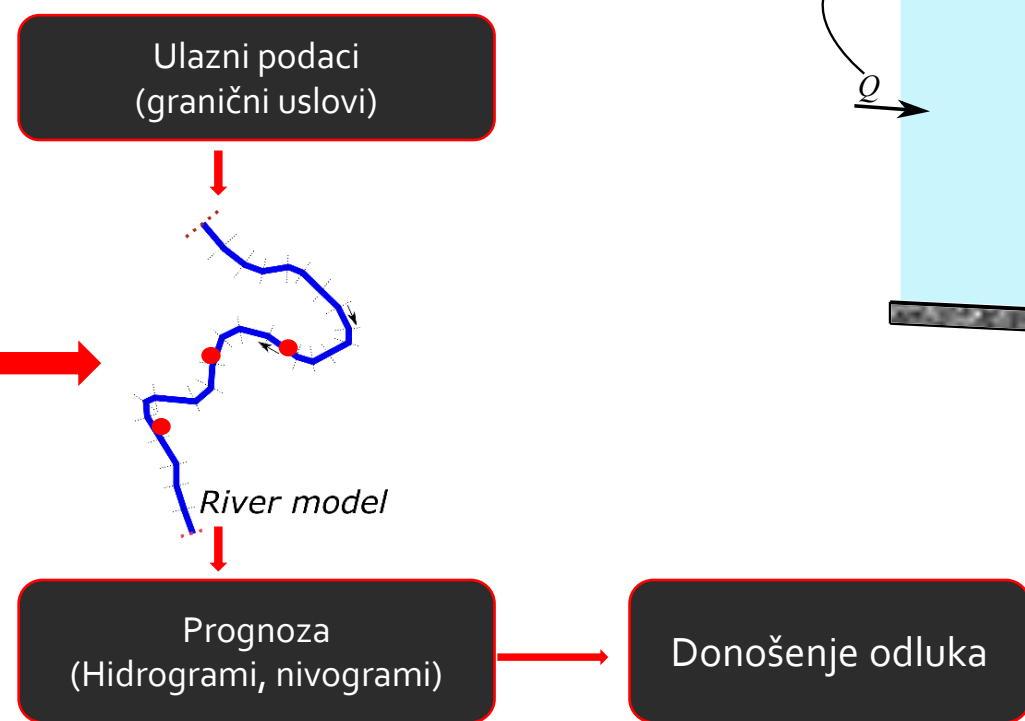
Procena početnih vrednosti → Tradicionalni pristup



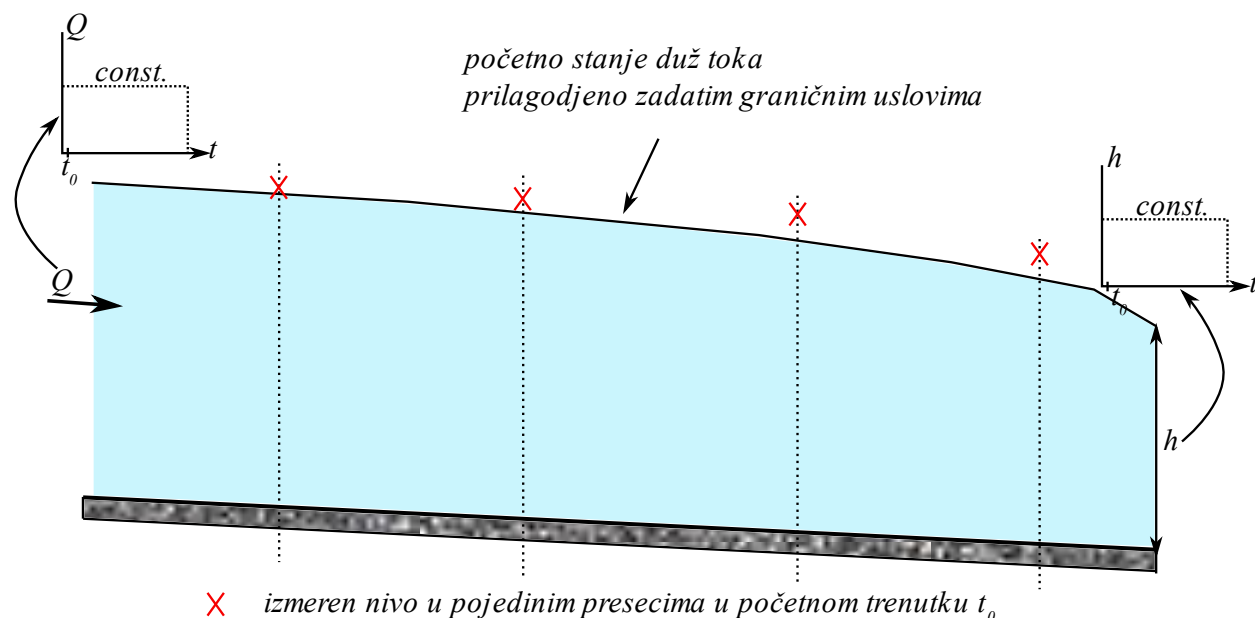
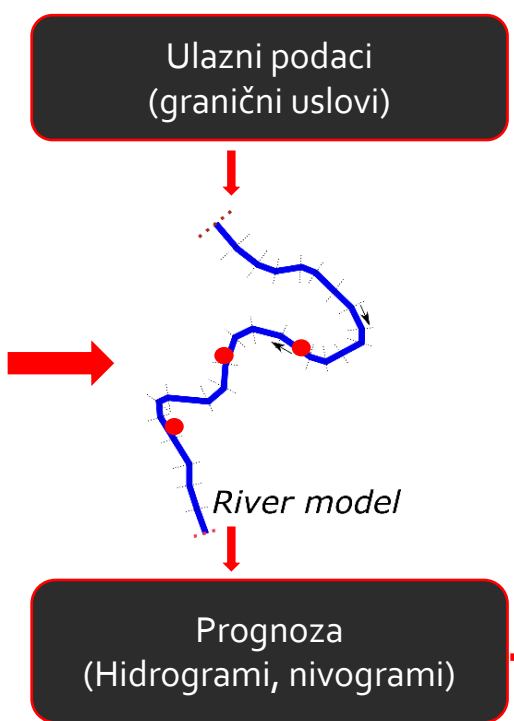
- Procena početnih vrednosti → Tradicionalni pristup



- Procena početnih vrednosti → Tradicionalni pristup



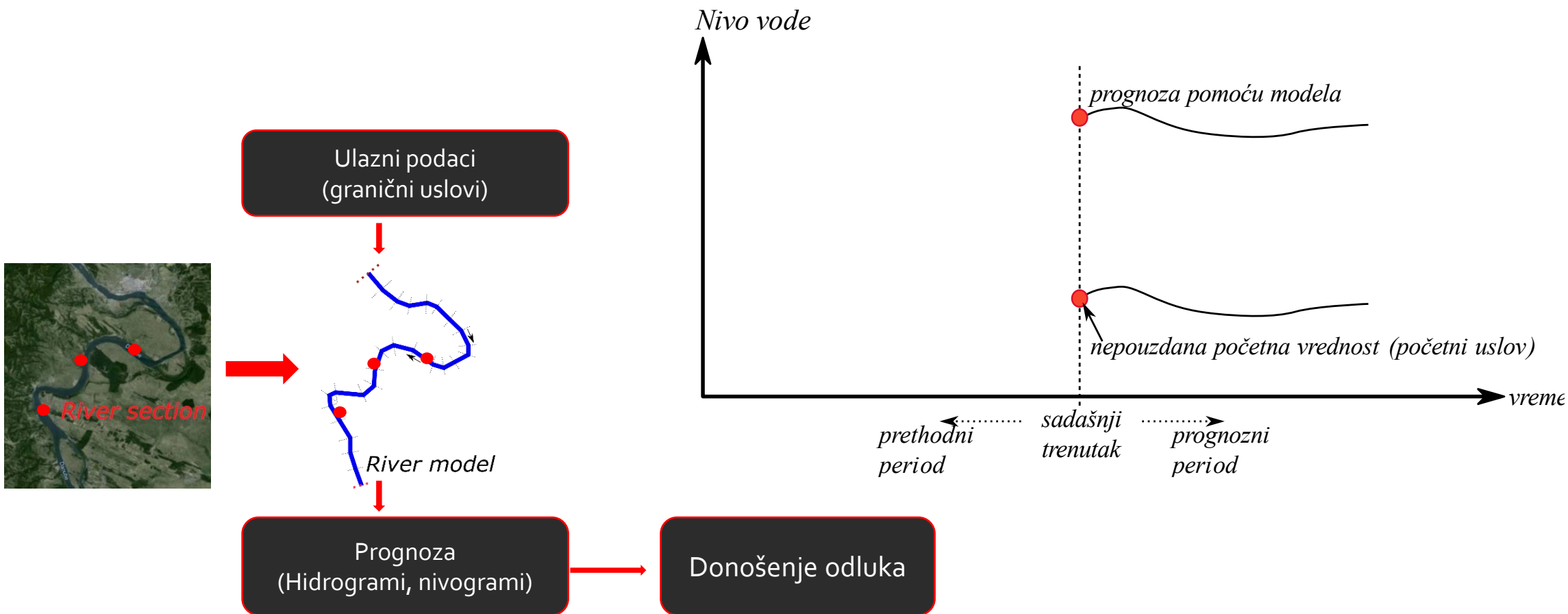
- Procena početnih vrednosti → Tradicionalni pristup



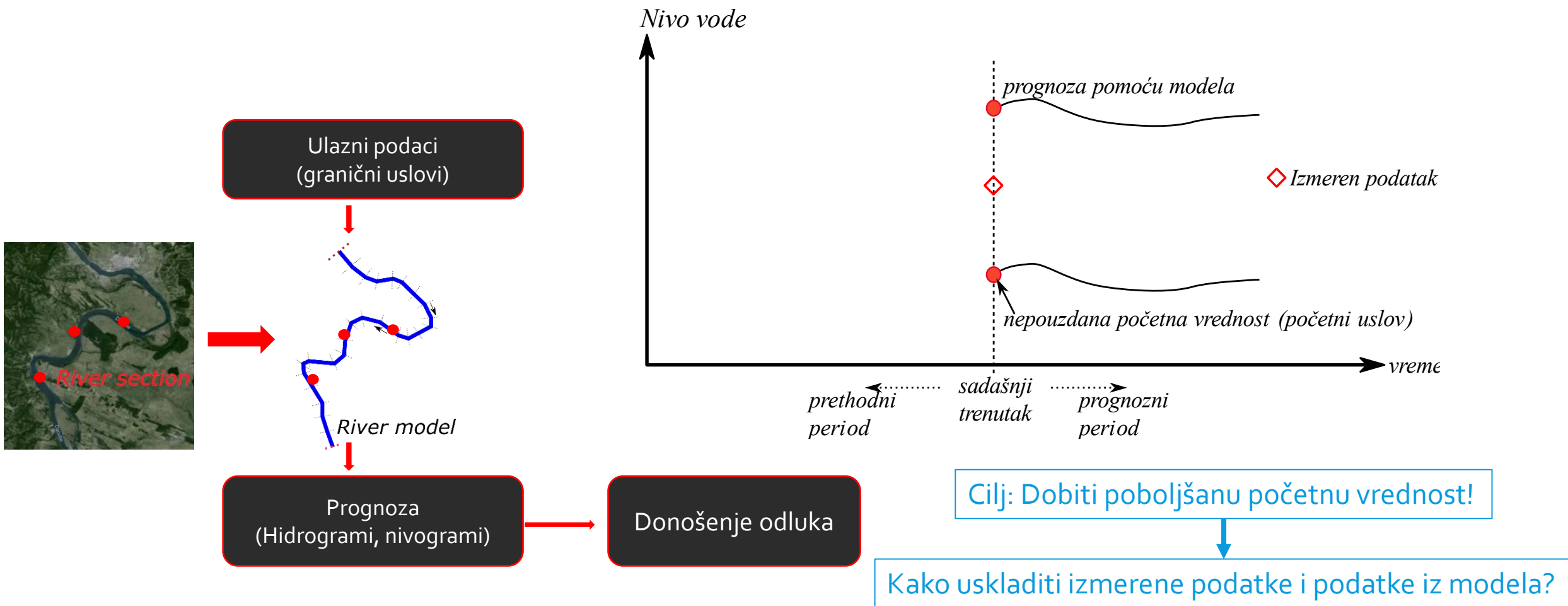
Problem: Procenjeno početno stanje odstupa od izmerenog!

Nepouzdana prognoza!

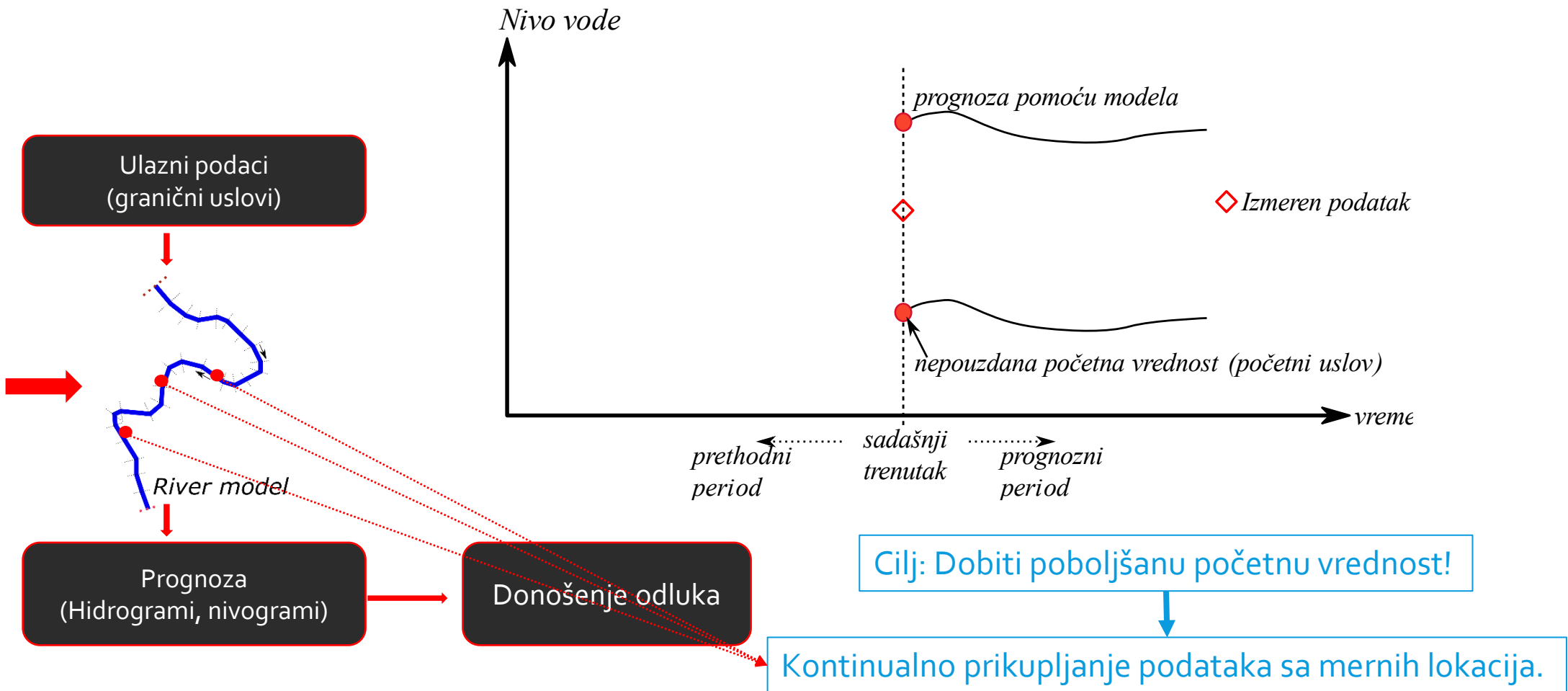
- Procena početnih vrednosti → Tradicionalni pristup



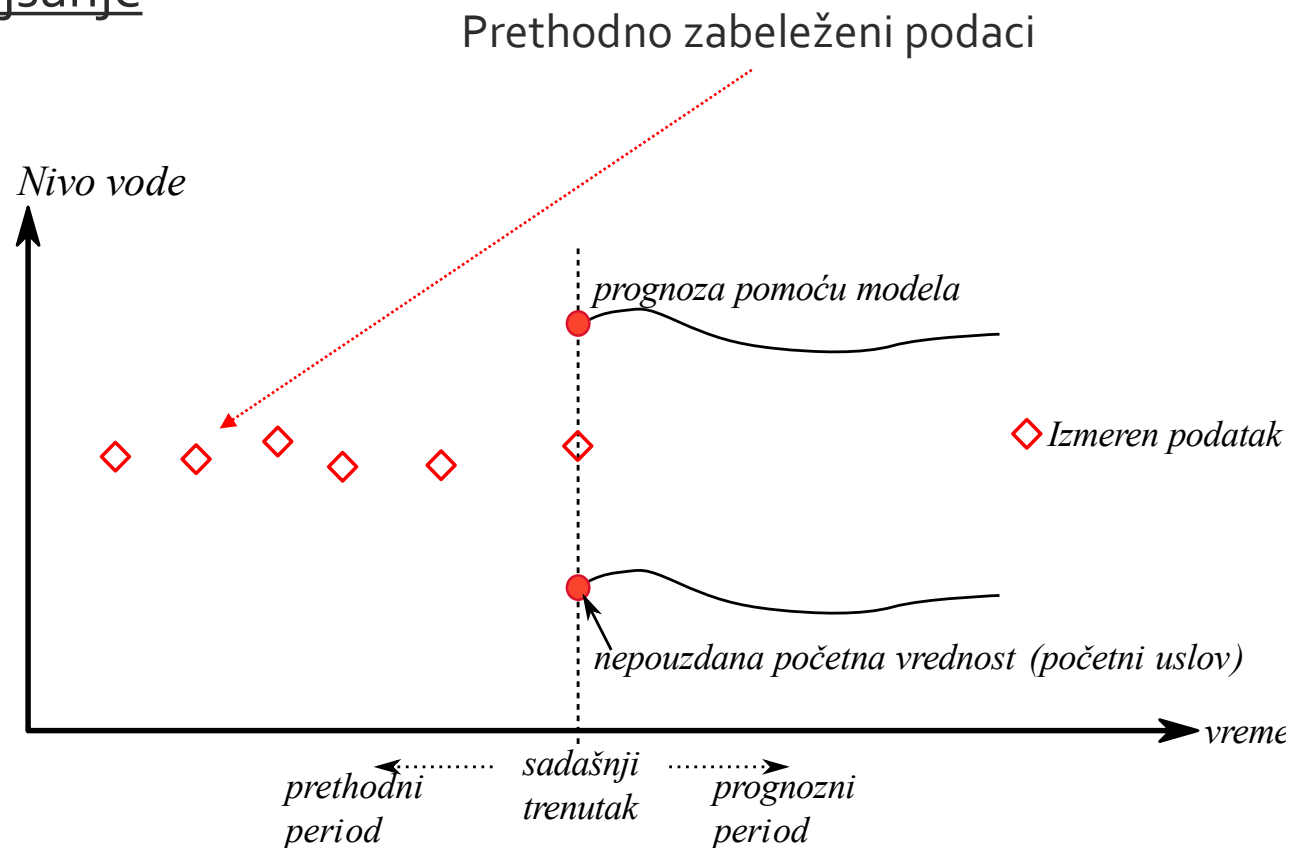
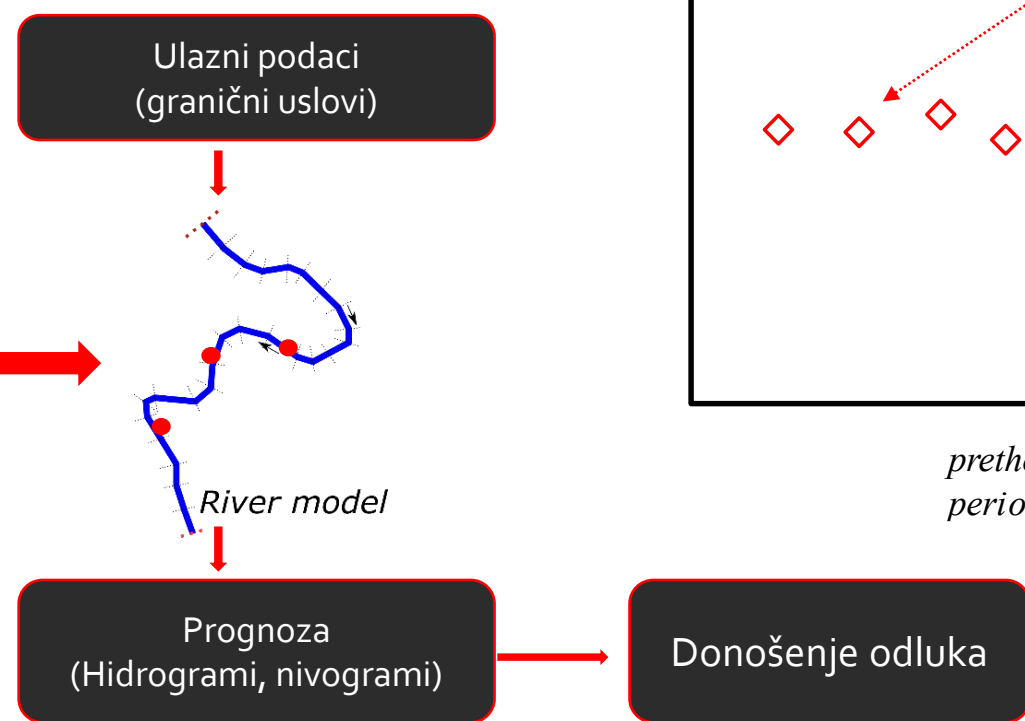
- Procena početnih vrednosti → Tradicionalni pristup



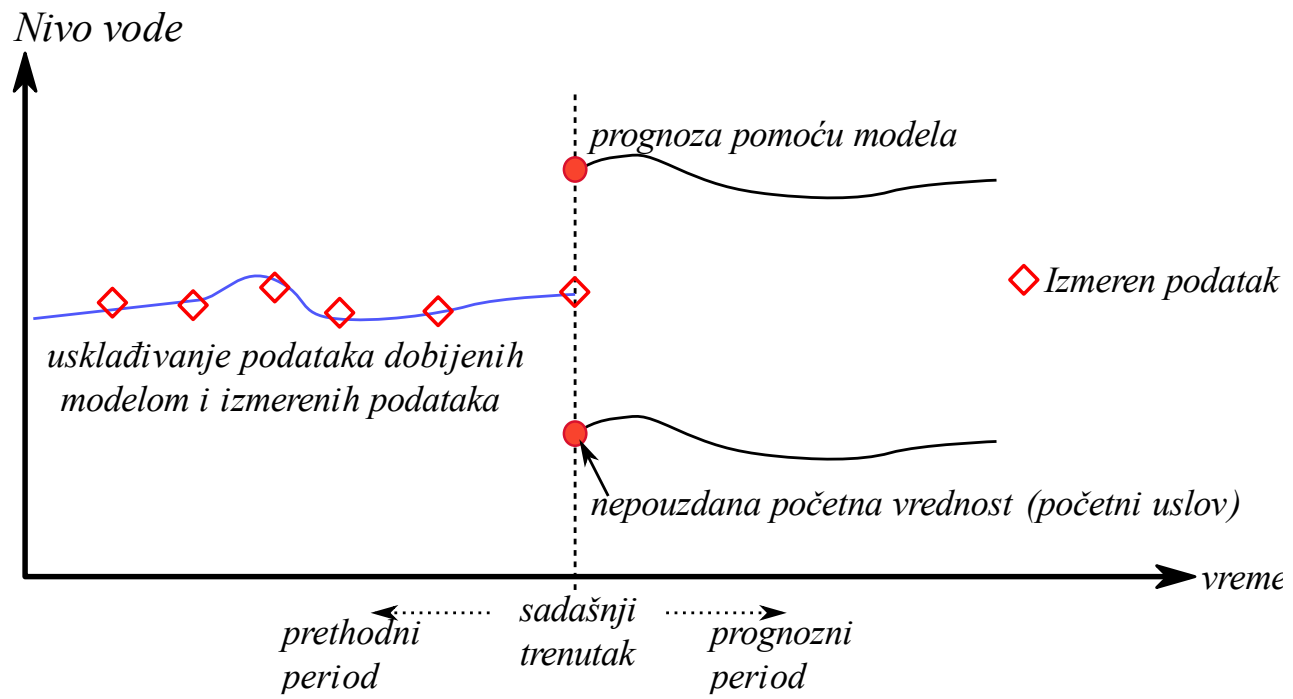
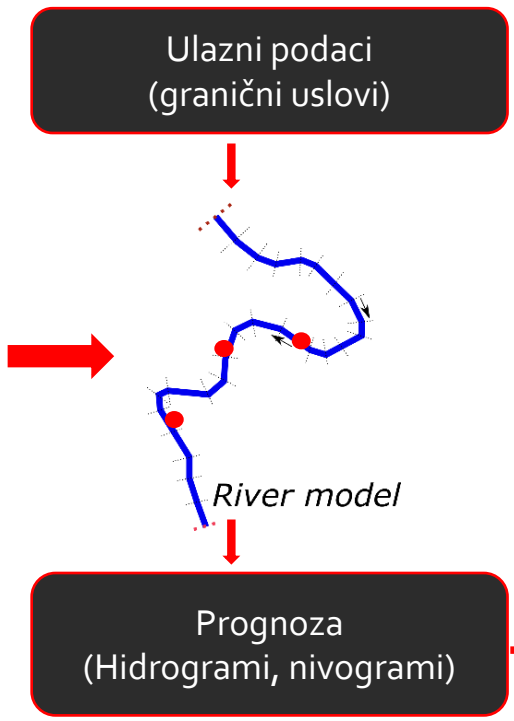
- Procena početnih vrednosti → Tradicionalni pristup



▪ Procena početnih vrednosti → Pобољшanje



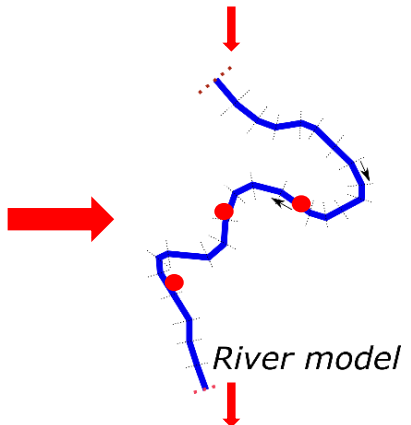
- Procena početnih vrednosti → Pобољшanje



▪ Procena početnih vrednosti → Pобољшanje

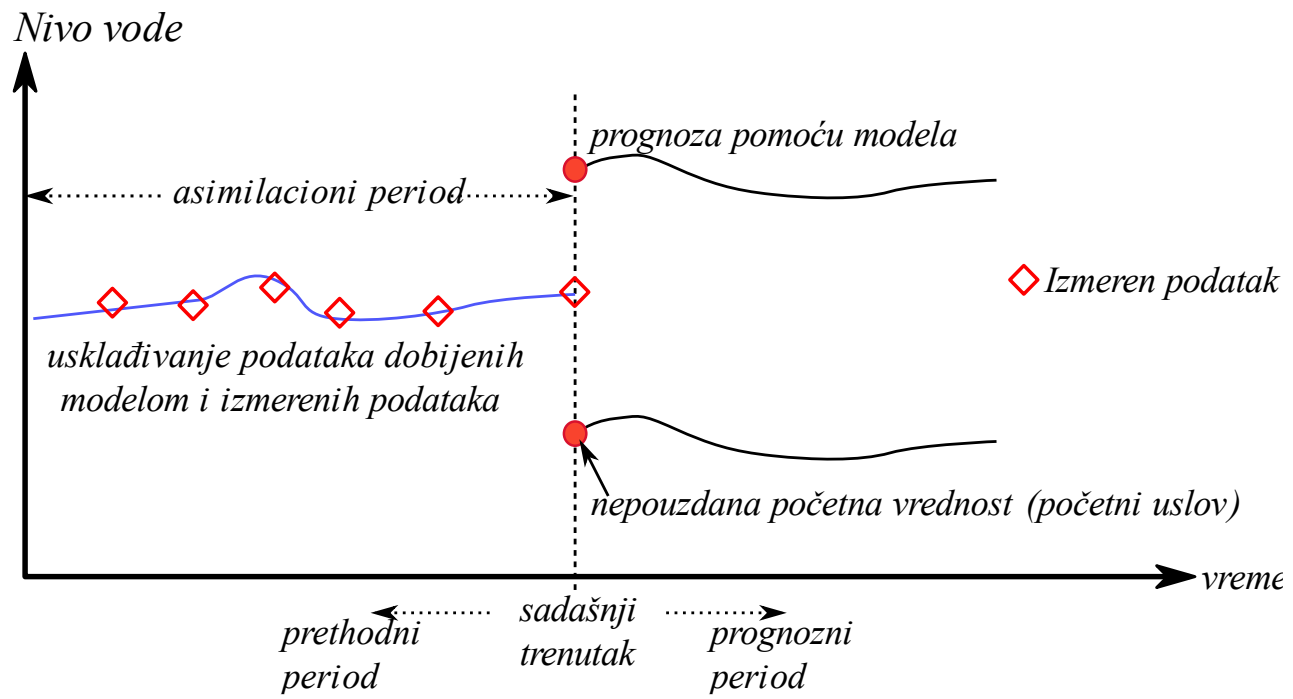


Ulazni podaci
(granični uslovi)



Prognoza
(Hidrogrami, nivogrami)

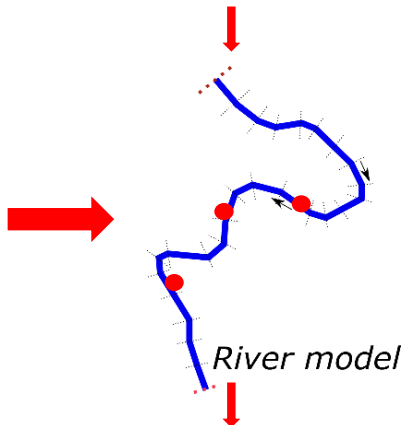
Donošenje odluka



▪ Procena početnih vrednosti → Pобољшanje

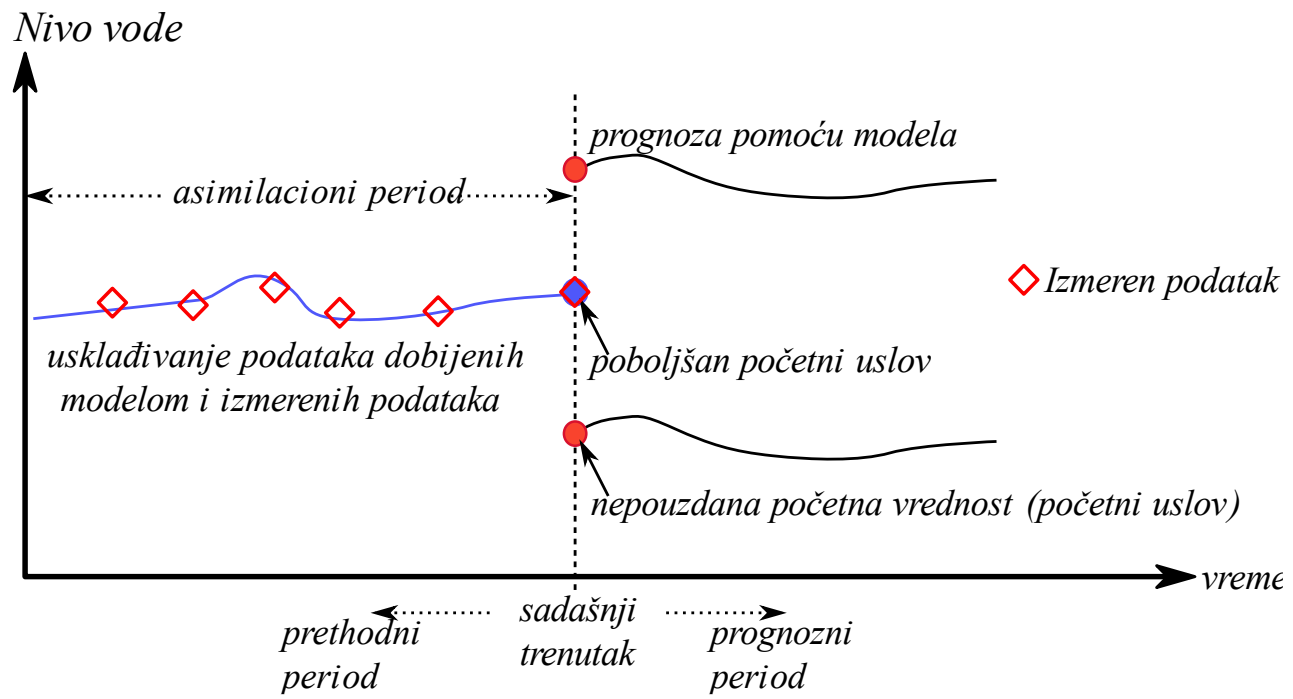


Ulazni podaci
(granični uslovi)



Prognoza
(Hidrogrami, nivogrami)

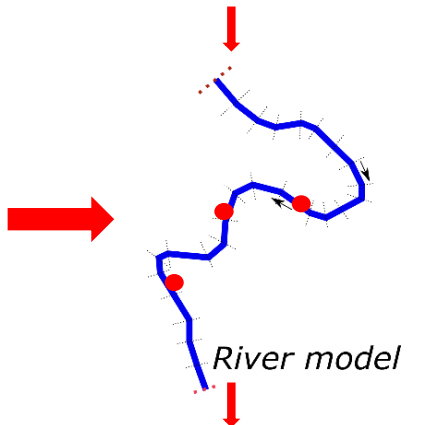
Donošenje odluka



- Procena početnih vrednosti → Pобољшanje
- **Asimilacija podataka**

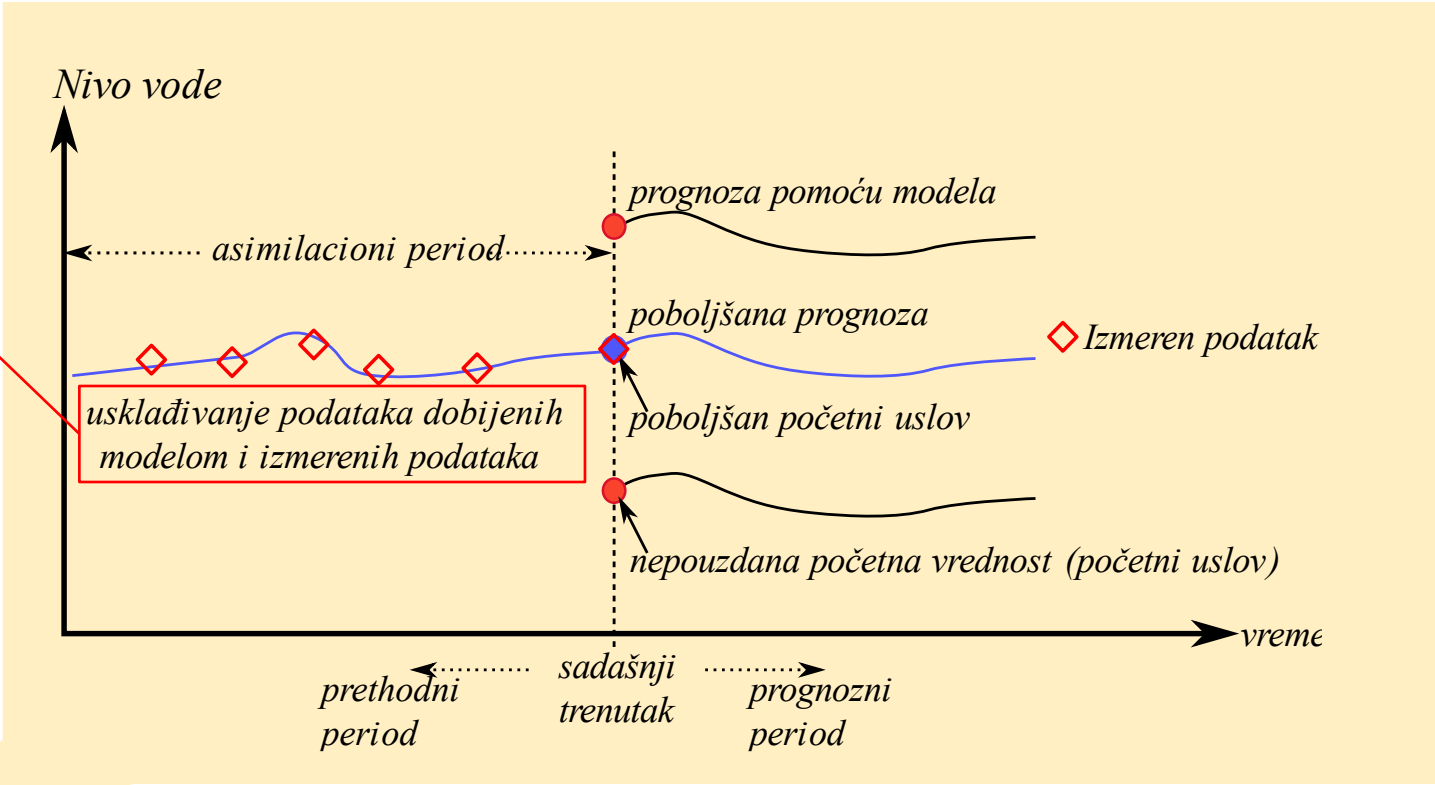


Ulazni podaci
(granični uslovi)

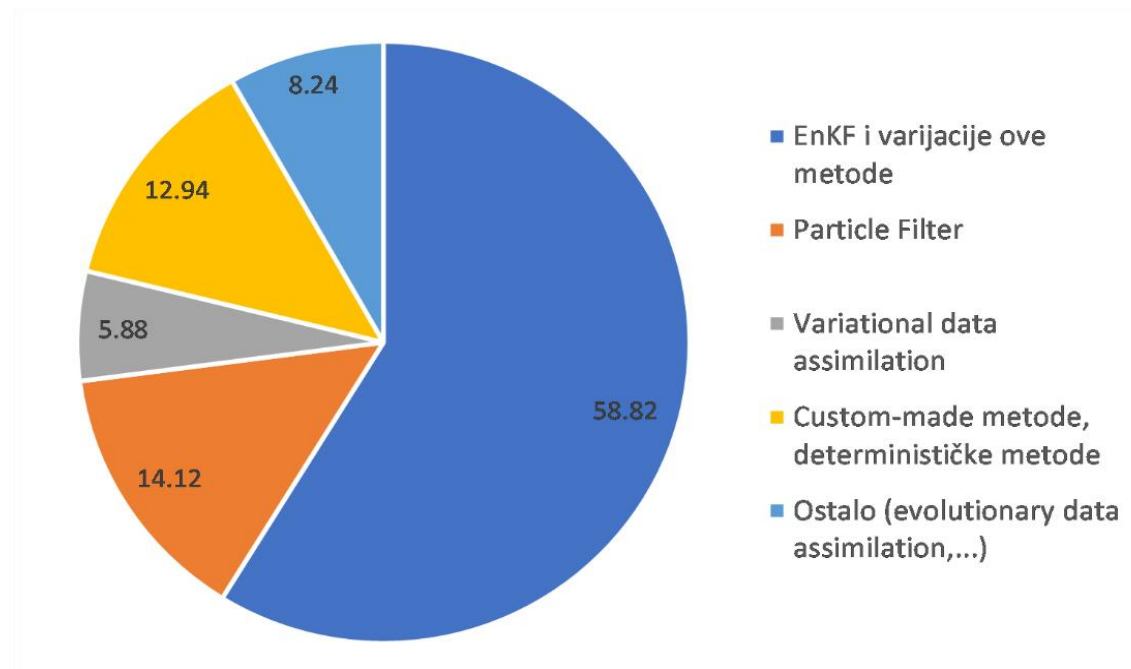
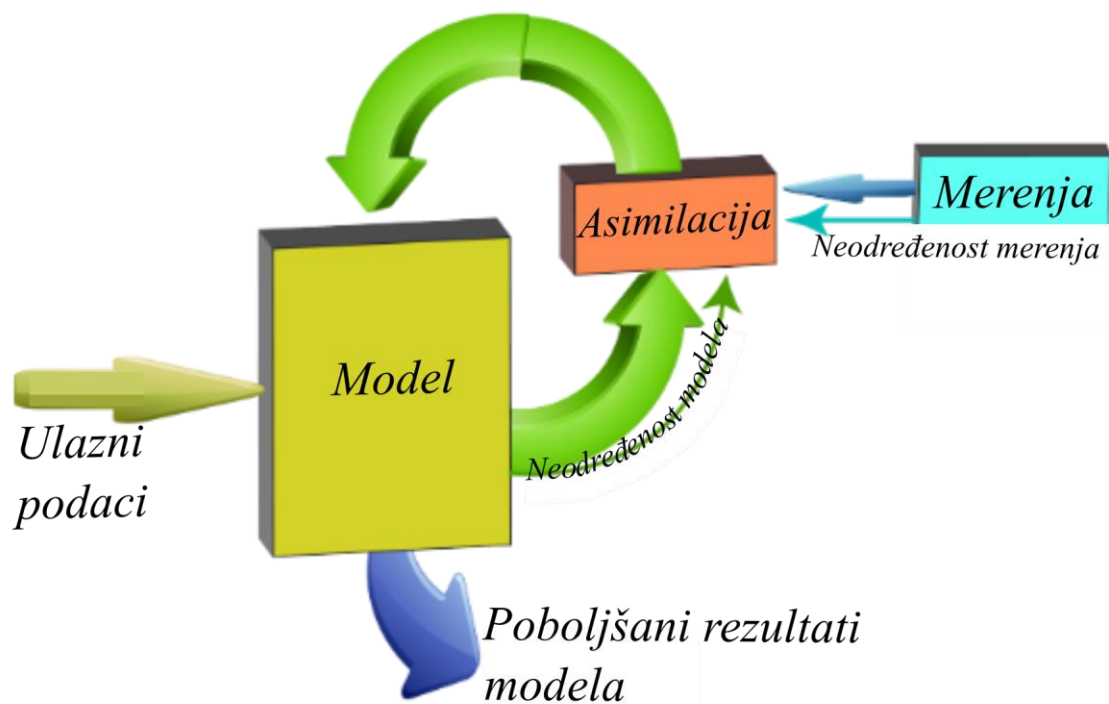


Pобољšana prognoza
(Hidrogrami, nivogrami)

Donošenje odluka



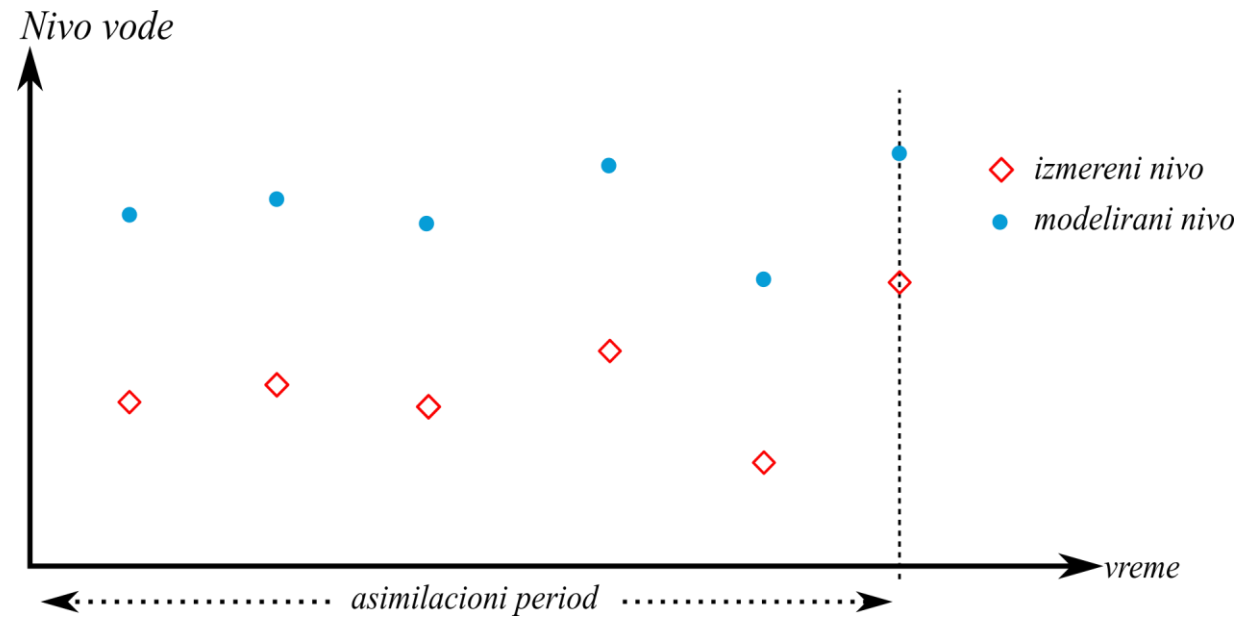
- Cilj asimilacije podataka → bolja procena početnih uslova → bolja prognoza nivoa vode
- **Zašto ne samo modeli?** → dosta pretpostavki → **previše nepouzdanosti** + ■
- **Zašto ne samo merenja?** → pokrivaju samo mali deo domena koji se analizira + ■
- **Model + merenja = Asimilacija podataka** → bolja procena p.u. na celom domenu ■
- Kako asimilacija podataka funkcioniše → zavisi od primenjenog algoritma



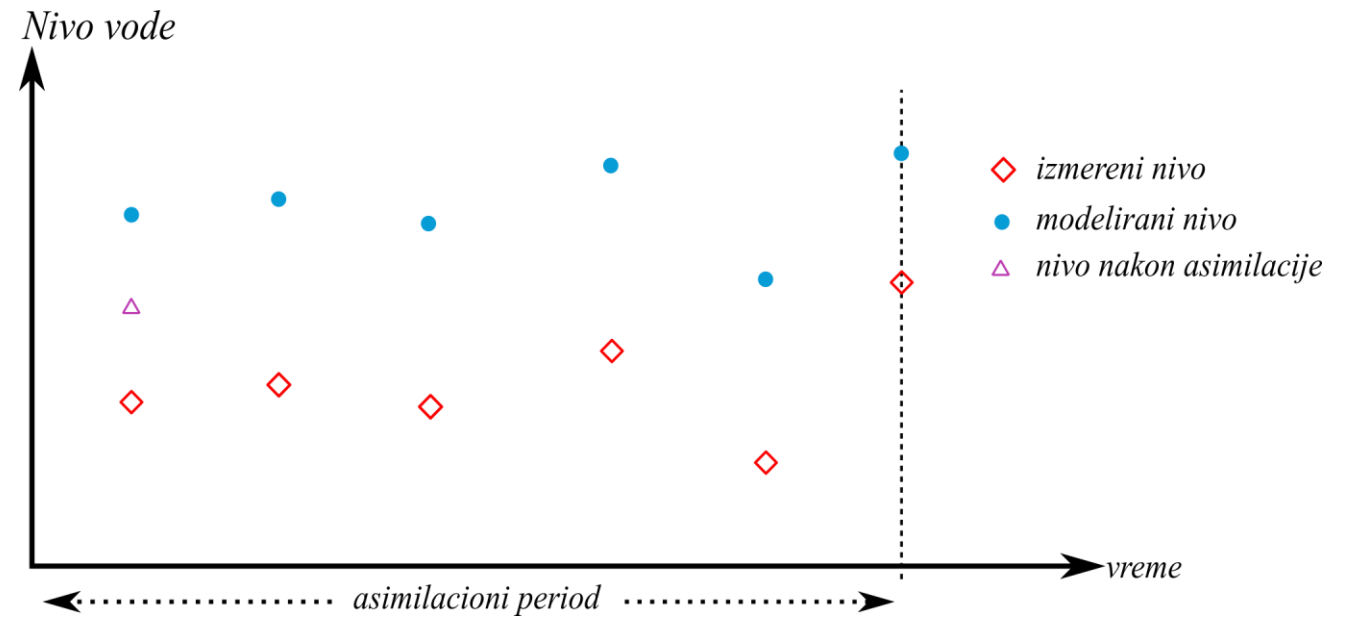
- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Hidrološko – hidrauličko modeliranje → najčešće Ensemble Kalman Filter (EnKF)
- Usvojeno kao referentna metoda

- **Potencijalni problemi pri primeni standardnih metoda**

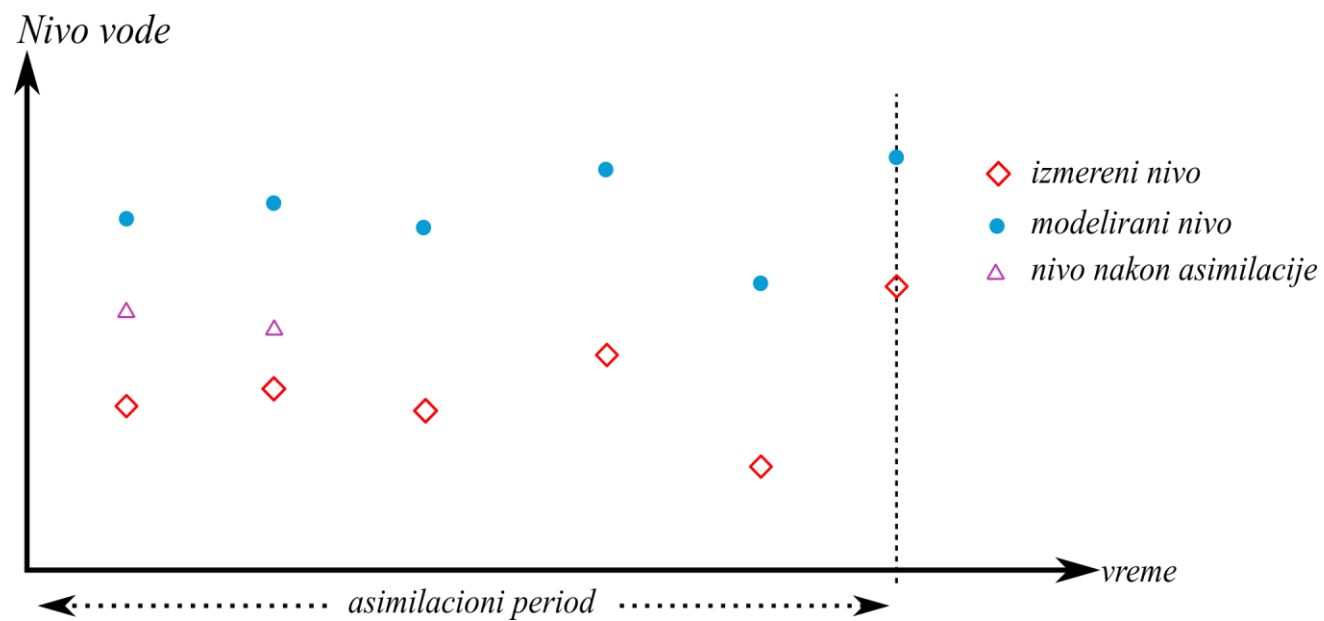
- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?



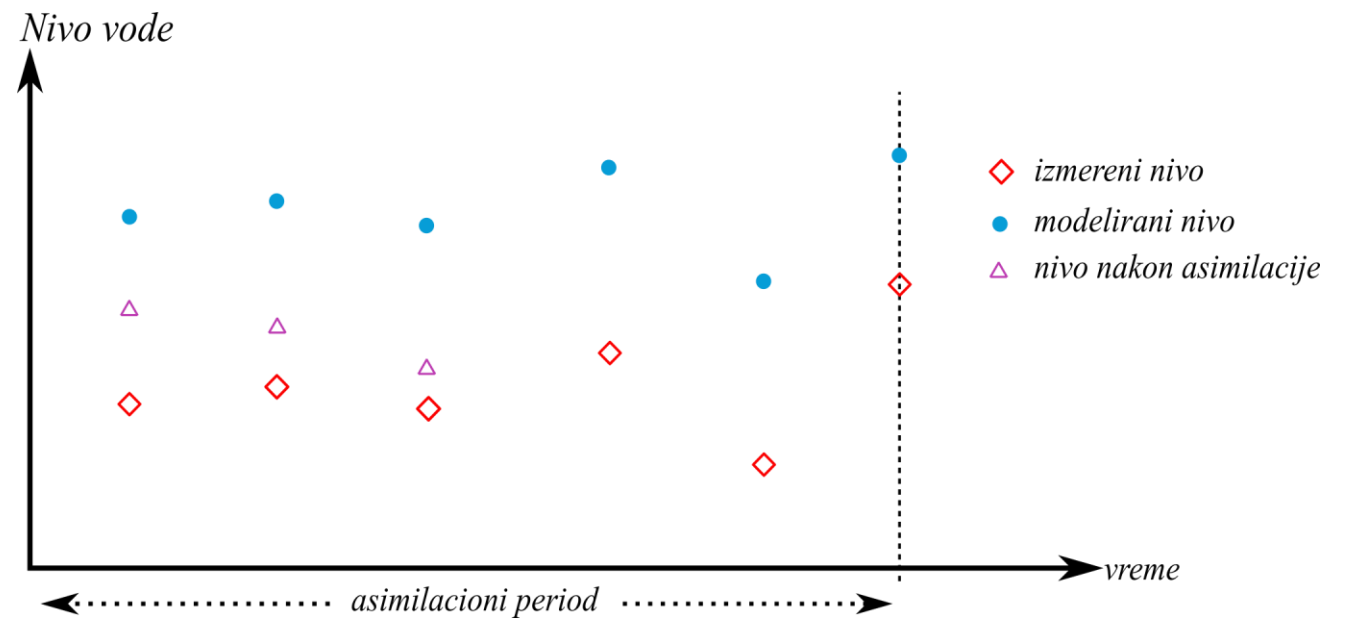
- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?



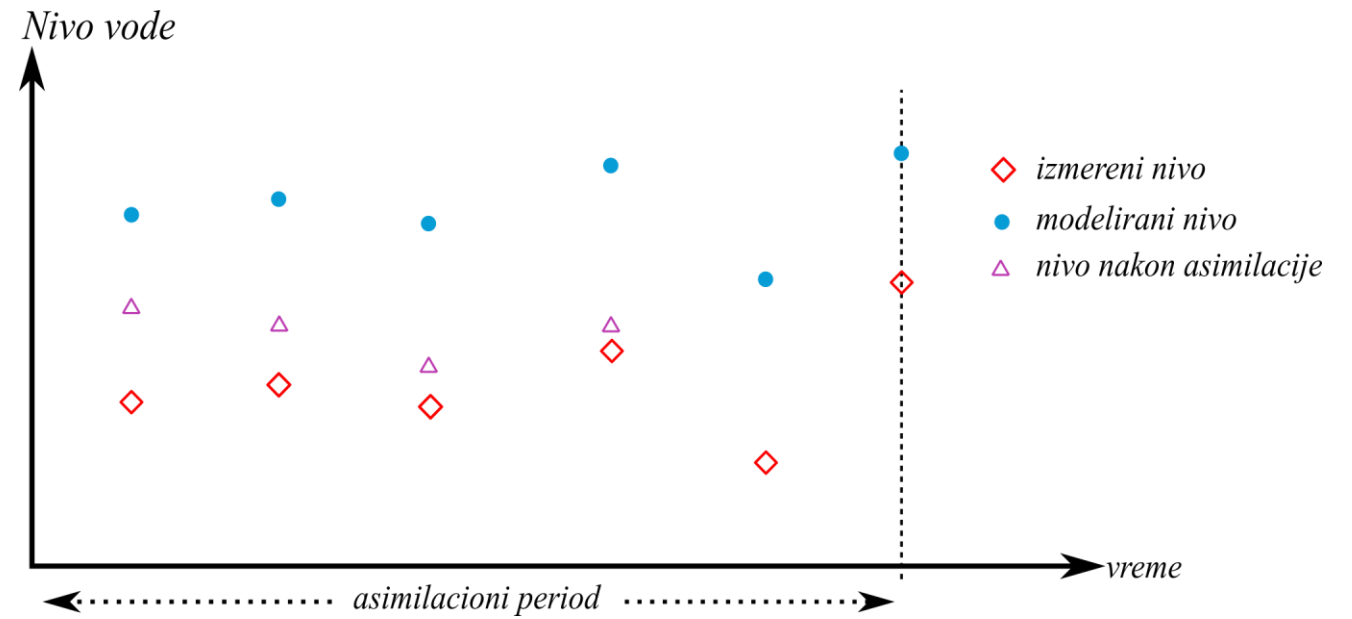
- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?



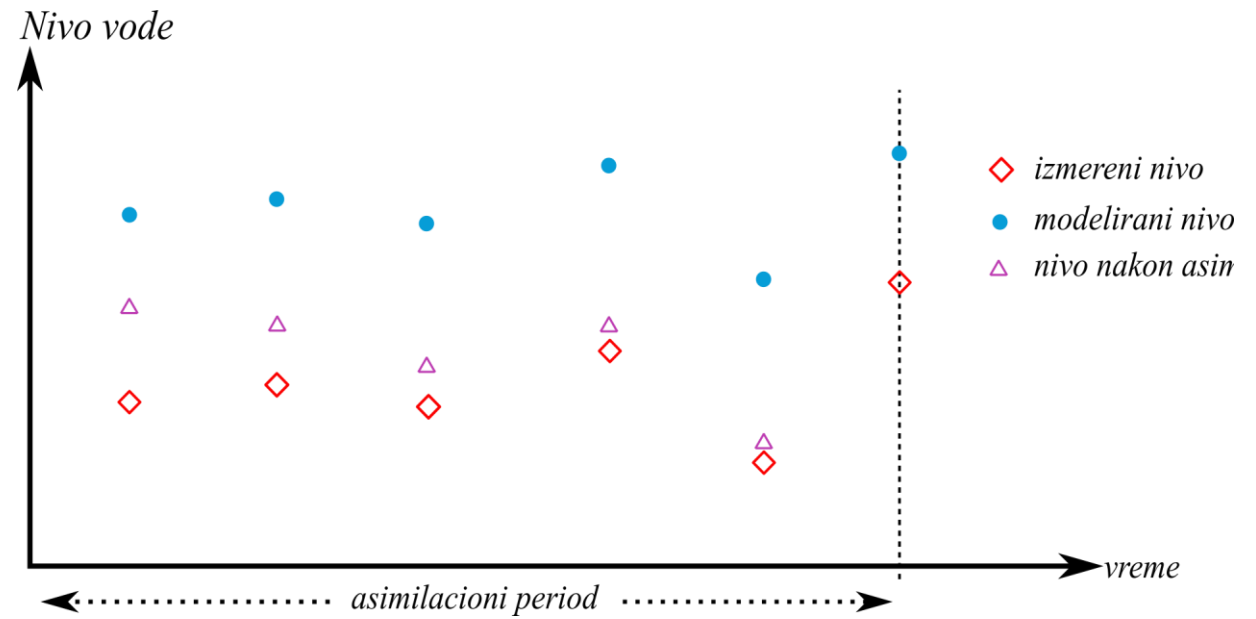
- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?



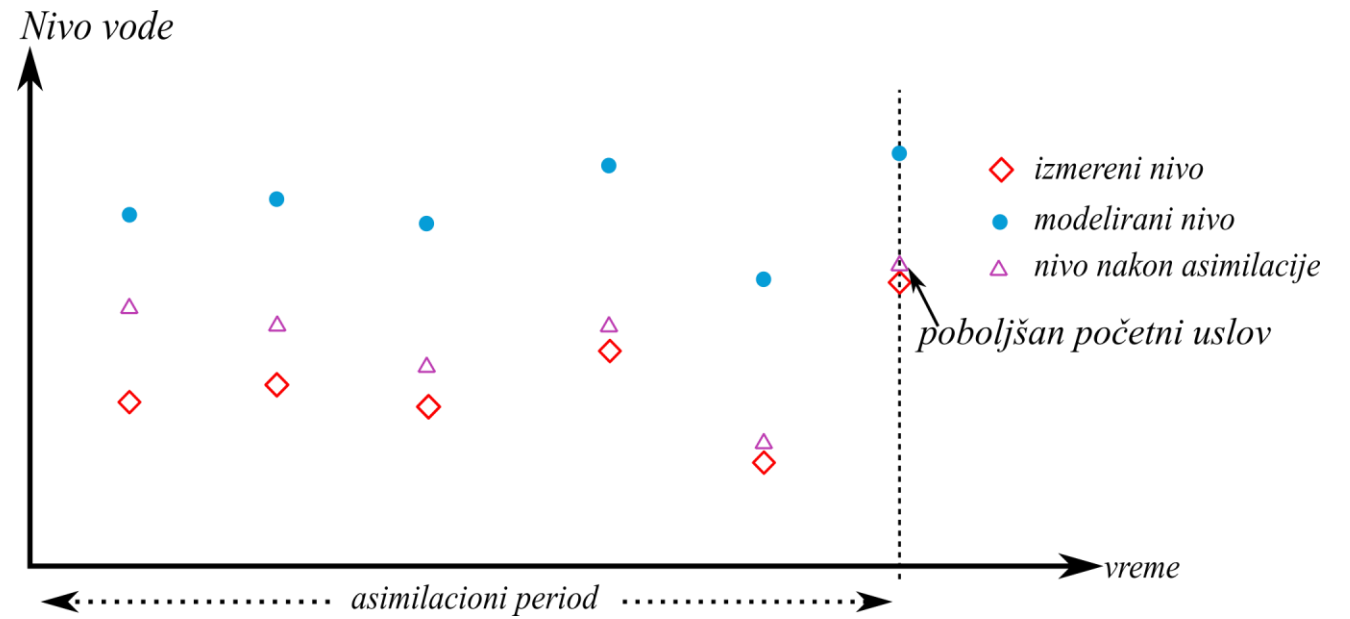
- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?



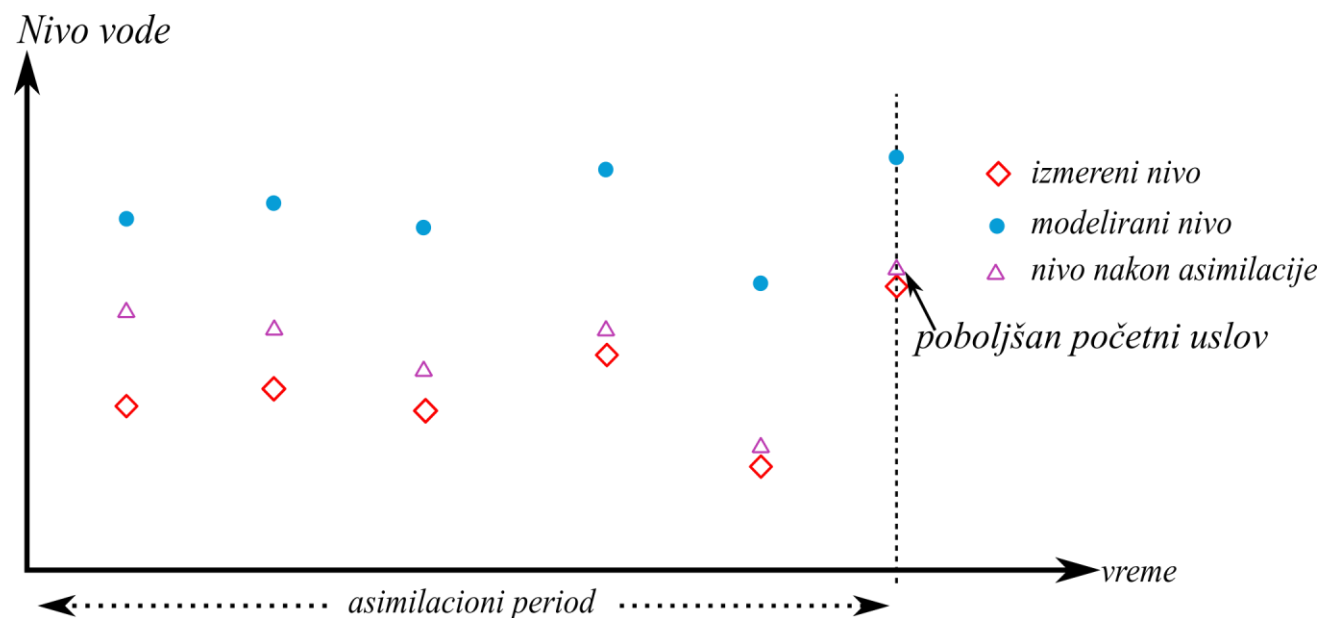
- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?



- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?



- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?
- Šta je to što nas „muči“ kod standardnih metoda?

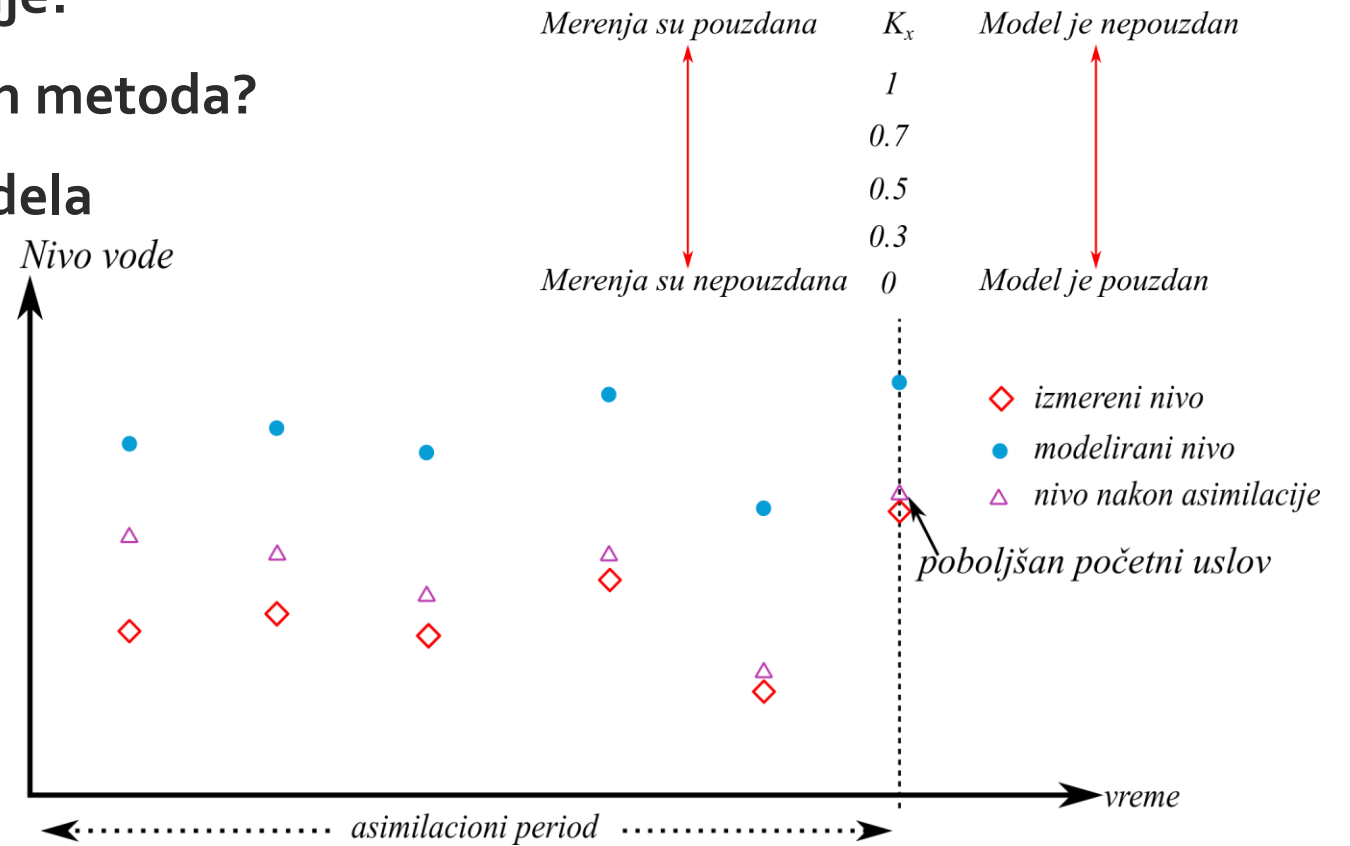


Direktan pristup za asimilaciju podataka

- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?
- Šta je to što nas „muči“ kod standardnih metoda?
- Poređenje neodređenosti merenja i modela
- Merna neodređenost unapred poznata
- Kako proceniti neodređenost modela?

- Višestruke (Monte Carlo) simulacije na svakom vremenskom koraku
- Kreiranje skupova vrednosti po modelu u svakom koraku simulacije

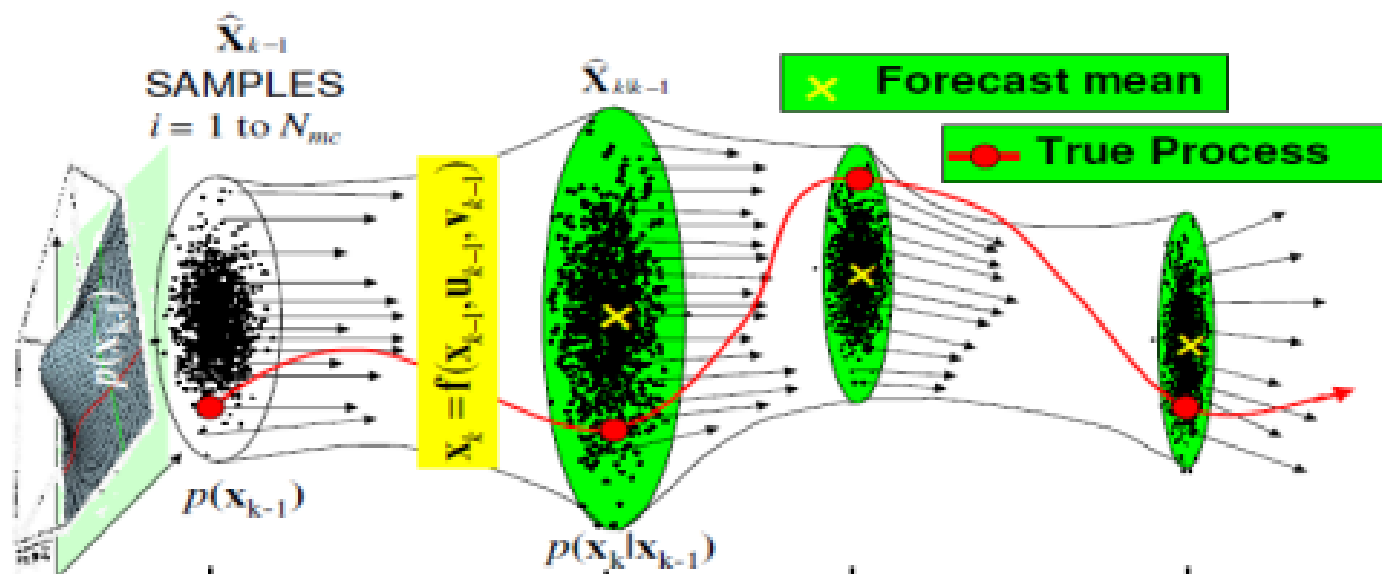
$$K_x = \frac{\text{Neodređenost modela}}{\text{Neodređenost modela} + \text{Merna neodređenost}}$$



Direktan pristup za asimilaciju podataka

- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Kako rade standardne metode asimilacije?
- Šta je to što nas „muči“ kod standardnih metoda?
- Poređenje neodređenosti merenja i modela
- Merna neodređenost unapred poznata
- Kako proceniti neodređenost modela?

- Višestruke (Monte Carlo) simulacije na svakom vremenskom koraku
- Kreiranje skupova vrednosti po modelu u svakom koraku simulacije



Direktan pristup za asimilaciju podataka

Računarski često zahtevno i nepraktično za svakodnevnu upotrebu

Mogućnost poboljšanja

- Standardne metode za asimilaciju podataka
- Hidrološko – hidrauličko modeliranje → najčešće Ensemble Kalman Filter (EnKF)
- Usvojeno kao referentna metoda
- **Potencijalni problemi pri primeni standardnih metoda**
 - Relativno složen matematički aparat, nije intuitivno jasno kako funkcioniše
 - Direktna asimilacija → povećana mogućnost za nestabilnost modela tečenja
 - Računarski relativno zahtevne metode
 - Često izbegavane od inženjera u praksi
- Kako rešiti ove probleme? → Razvoj „inženjerskije“ metode za asimilaciju podataka



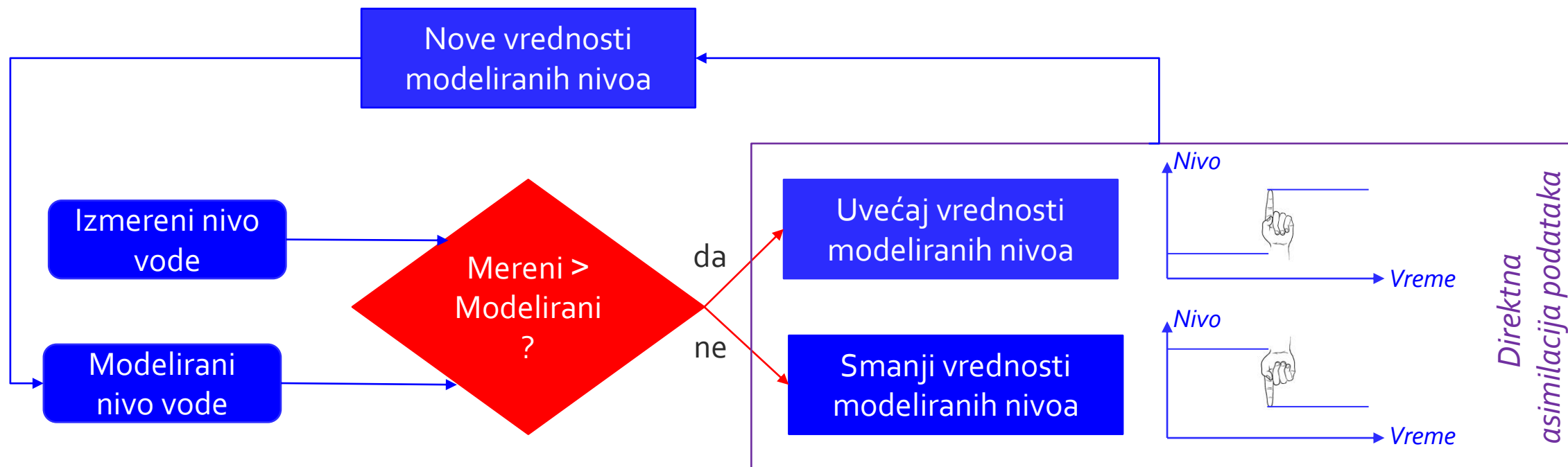
↓
Cilj istraživanja!

- Polazne hipoteze
- **Hipoteza 1: Svi parametri modela su dobro određeni, neodređenost modela je posledica nepouzdanosti graničnih i početnih uslova**
- **Hipoteza 2: Nivoi vode na vodomernim stanicama se najlakše mere → usvajaju se kao osnovni pokazatelj stanja sistema**
- **Hipoteza 3: Neodređenost merenja nivoa je značajno manja od neodređenosti modela → nije potrebno porediti ove dve neodređenosti na svakom koraku → redukcija vremena za proračun**

Na osnovu polaznih hipoteza razvijen je princip rada nove asimilacione metode



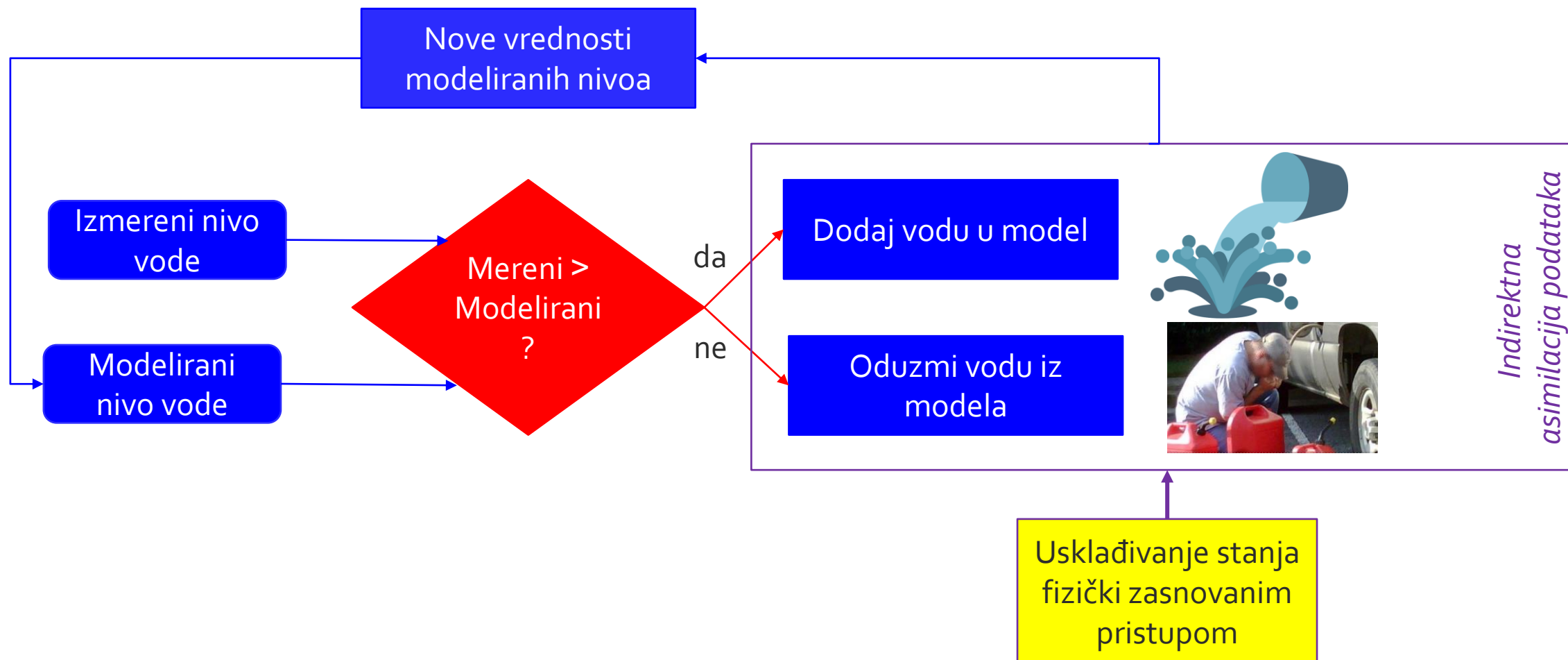
- Standardne metode asimilacije → direktan pristup za asimilaciju podataka



Neko fizičko opravdanje
direktne promene stanja
u modelu?

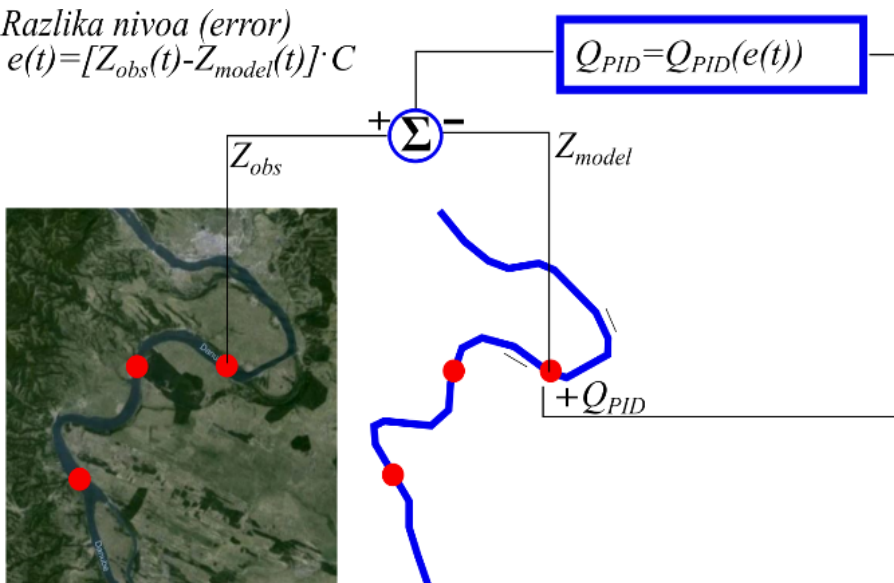


- Nova metoda asimilacije → indirektni pristup za asimilaciju podataka
- **Razlika između modeliranih nivoa vode i izmerenih nivoa** → višak/manjak vode



- Nova metoda asimilacije → indirektni pristup za asimilaciju podataka
- **Razlika između modeliranih nivoa vode i izmerenih nivoa** → višak/manjak vode
- **Višak/manjak vode** → razlika nivoa (*error, greška*)
- **Količina vode koja fali ili je višak u modelu** → korektivni dotok Q_{pid}
- **Korektivni dotoci** → primenom Proporcionalno-Integrativno-Derivativnih (PID) kontrolera

Razlika nivoa (error)
 $e(t) = [Z_{obs}(t) - Z_{model}(t)] \cdot C$

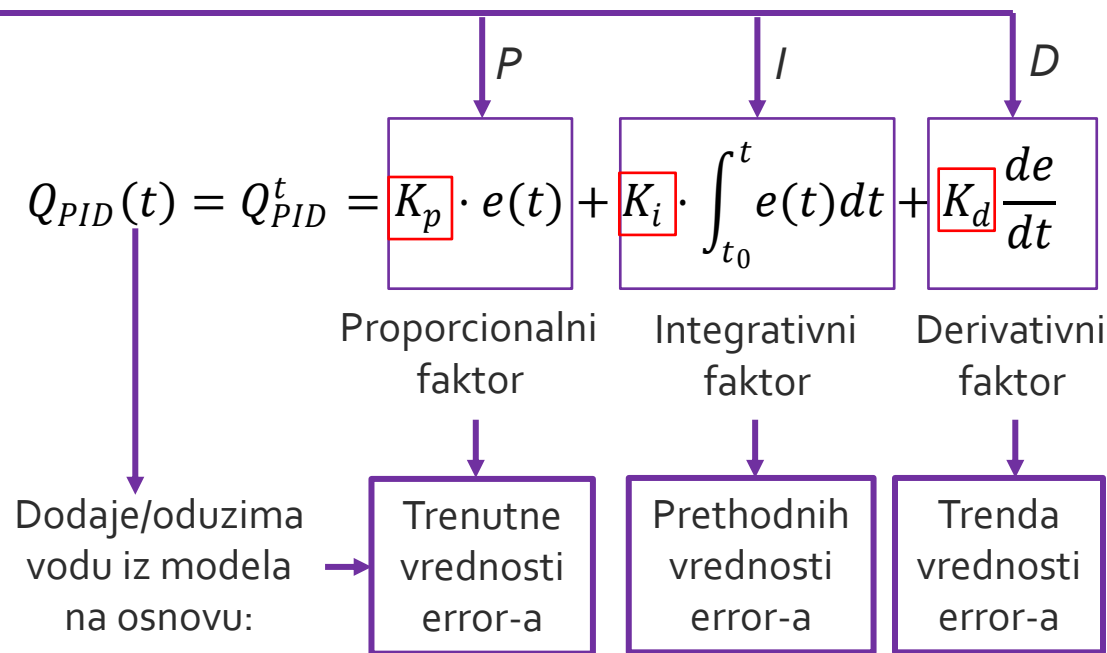
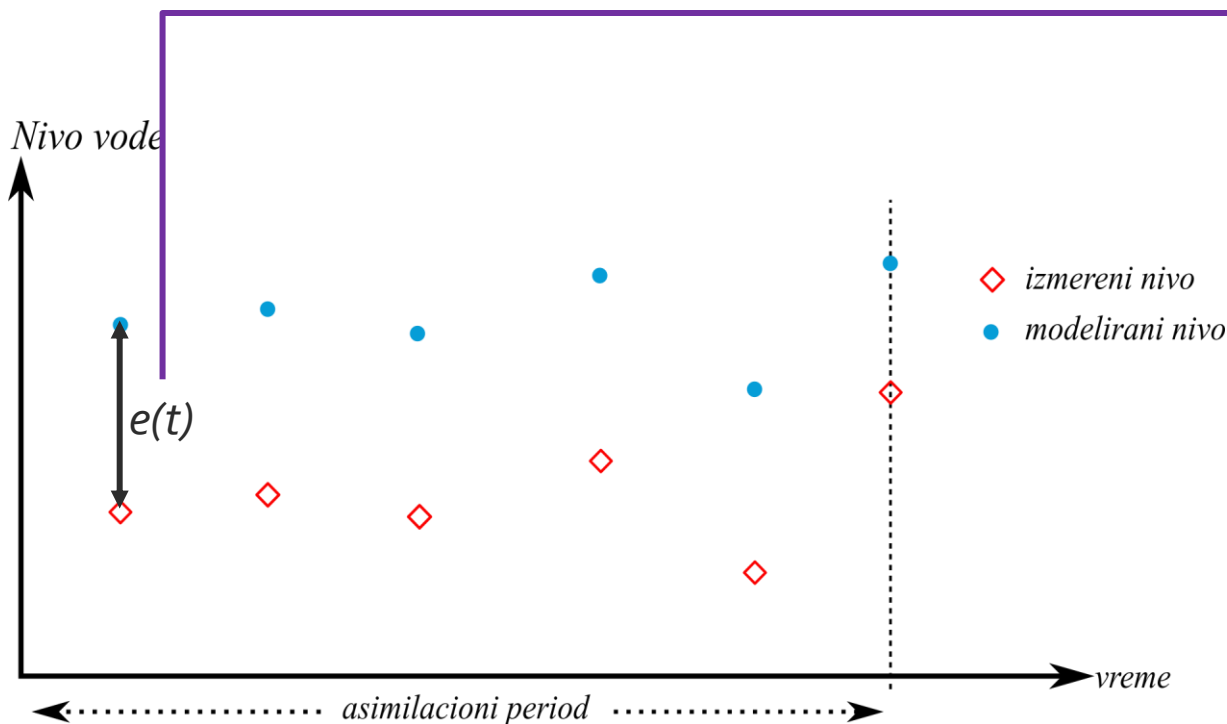


Rečna deonica

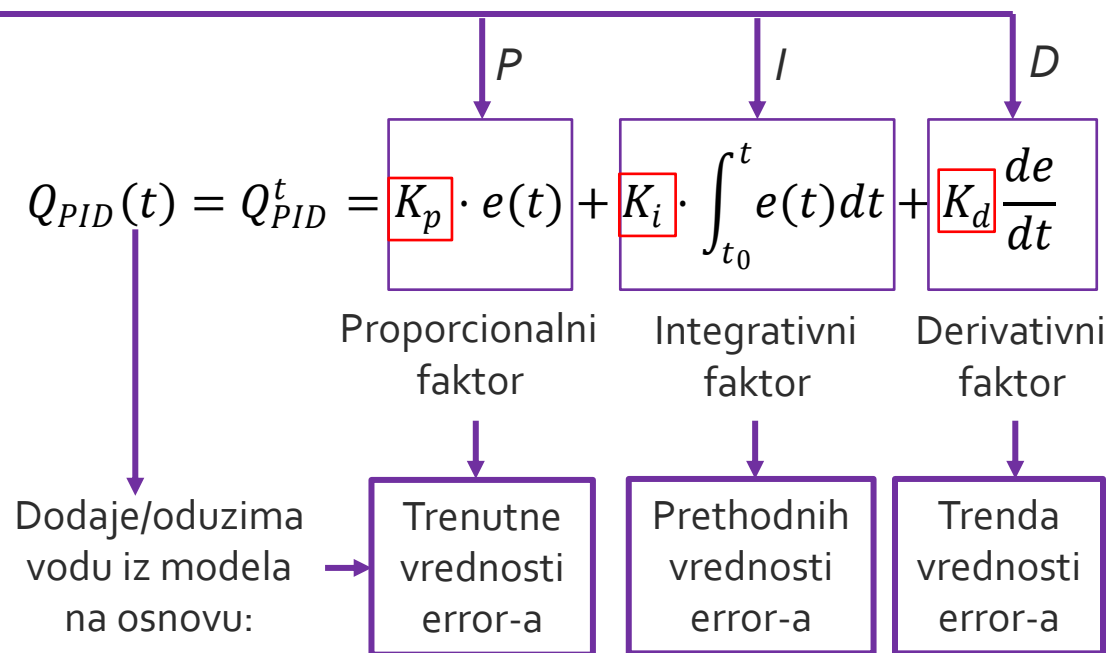
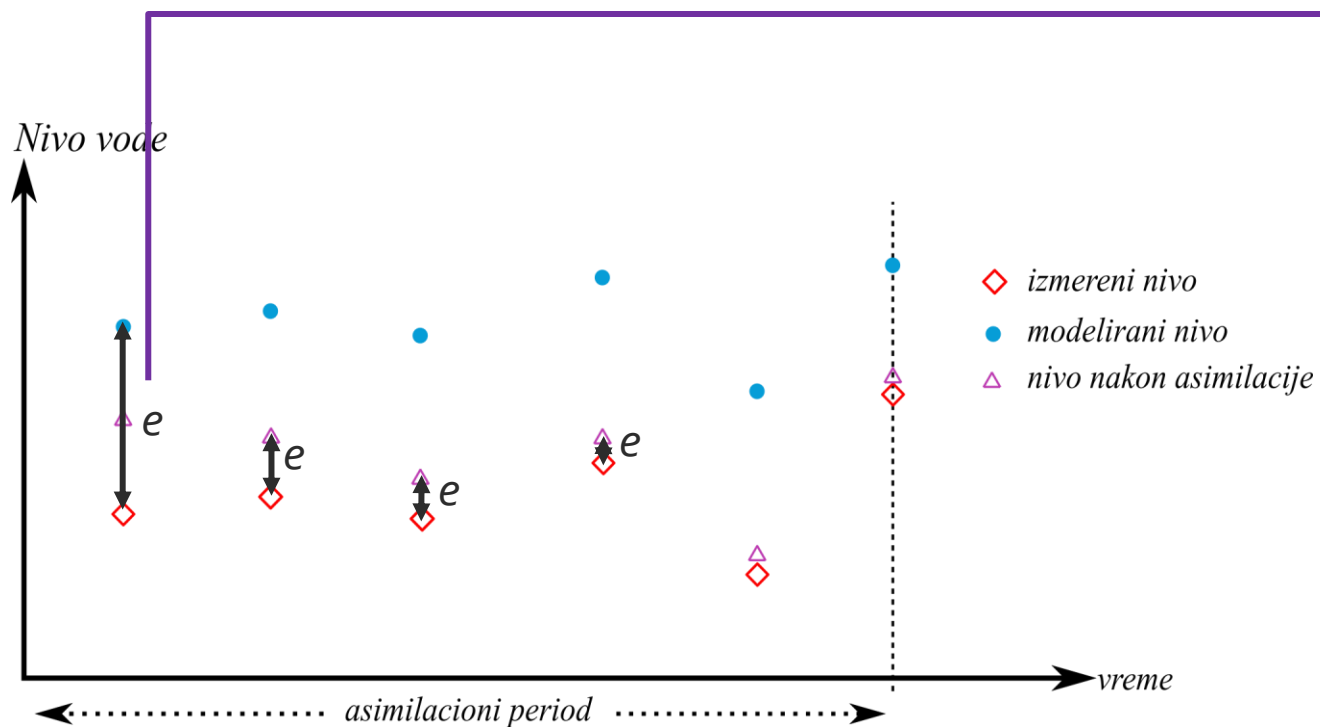
Računski model

- Merna stanica (merenje nivoa vode)
- Q_{PID} Korektivni dotoka sračunat pomoću PID kontrolera
- Z_{obs}, Z_{model} Nivo vode (modelirani ili izmereni)
- t simulaciono vreme
- t_{obs} vreme u kom se prikupljaju merenja
- $C(t_{obs}, t)$ faktor ublaženja

- Proporcionalno – Integrativno – Derivativni (PID) kontroleri kao alat za asimilaciju
- Šta je error (greška)? $\rightarrow e(t) = Z_{obs}(t) - Z_{model}(t)$
- Kako ona ulazi u PID kontroler, kako od error-a do korektivnog dotoka Q_{pid} ?



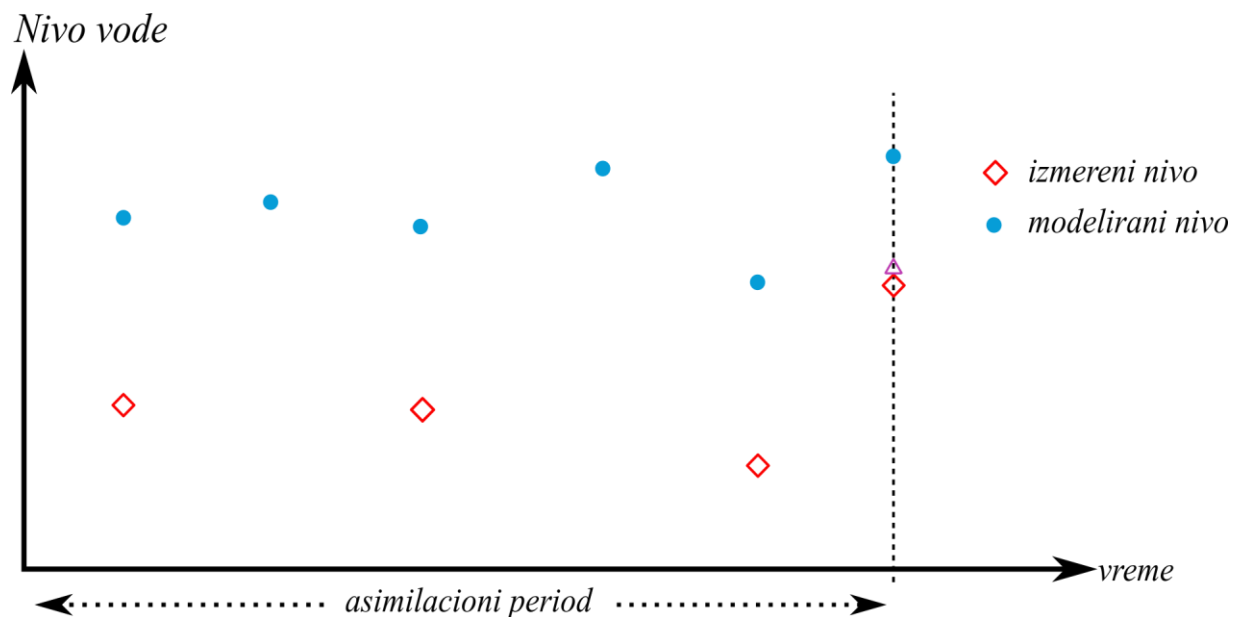
- Proporcionalno – Integrativno – Derivativni (PID) kontroleri kao alat za asimilaciju
- Šta je error (greška)? $\rightarrow e(t) = Z_{obs}(t) - Z_{model}(t)$
- Kako ona ulazi u PID kontroler, kako od error-a do korektivnog dotoka Q_{pid} ?



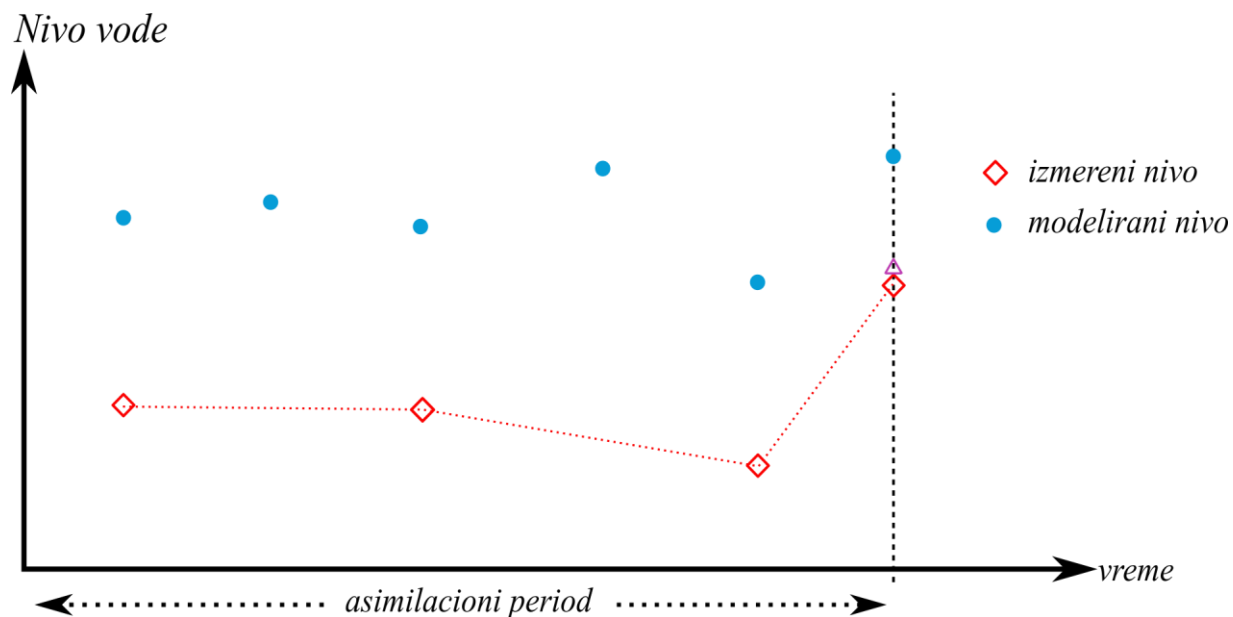
Asimilacijom se smanjuje odstupanje modeliranih i merenih nivoa!

Problem: Vremenski korak sa kojim se prikupljaju merenja često ne odgovara vremenskom koraku modela!!!

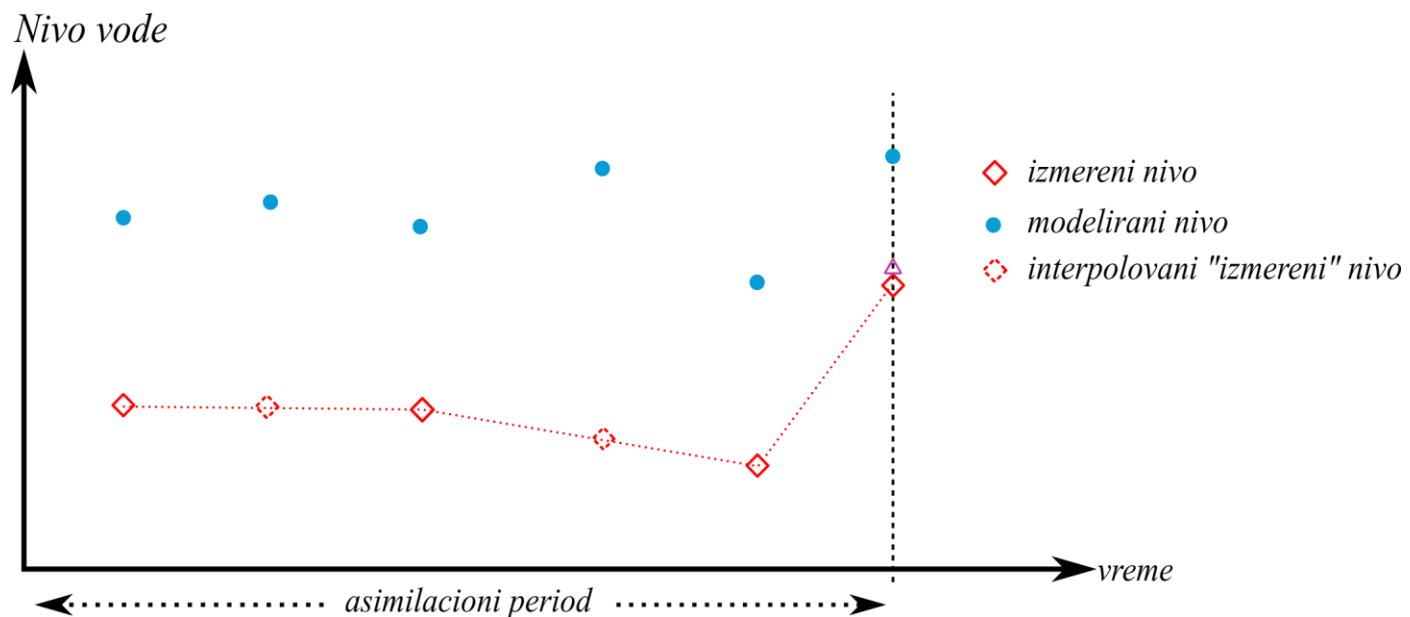
- Proporcionalno – Integrativno – Derivativni (PID) kontroleri kao alat za asimilaciju
- Problem: nejednaka skala merenih podataka i modela
- Kako prevazići problem?



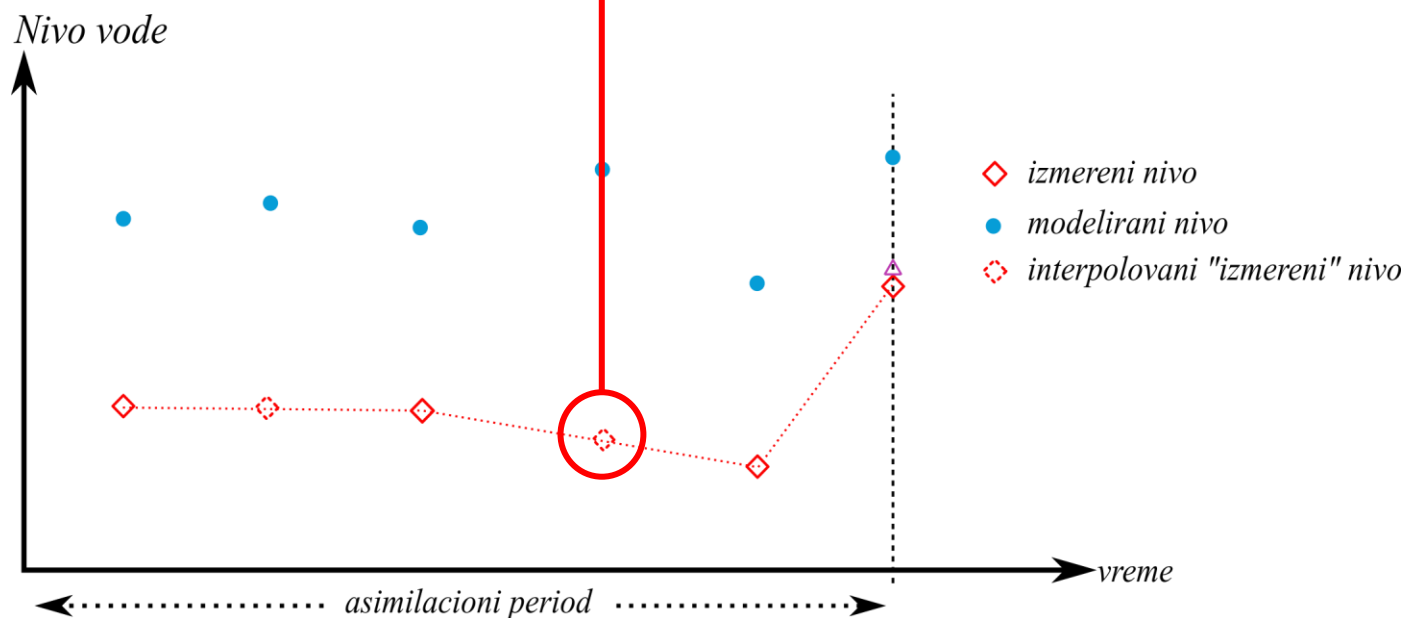
- Proporcionalno – Integrativno – Derivativni (PID) kontroleri kao alat za asimilaciju
- Problem: nejednaka skala merenih podataka i modela
- Kako prevazići problem? → linearna interpolacija merenja



- Proporcionalno – Integrativno – Derivativni (PID) kontroleri kao alat za asimilaciju
- Problem: nejednaka skala merenih podataka i modela
- Kako prevazići problem? → linearna interpolacija merenja → novi „izmereni“ nivoi



- Proporcionalno – Integrativno – Derivativni (PID) kontroleri kao alat za asimilaciju
- **Problem: nejednaka skala merenih podataka i modela**
- **Kako prevazići problem?** → linearna interpolacija merenja → novi „izmereni“ nivoi

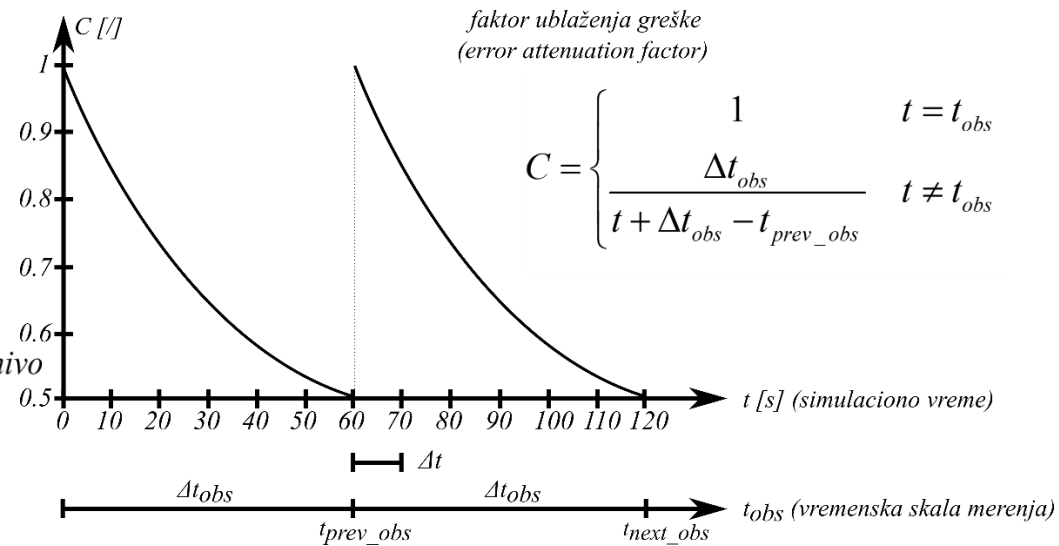
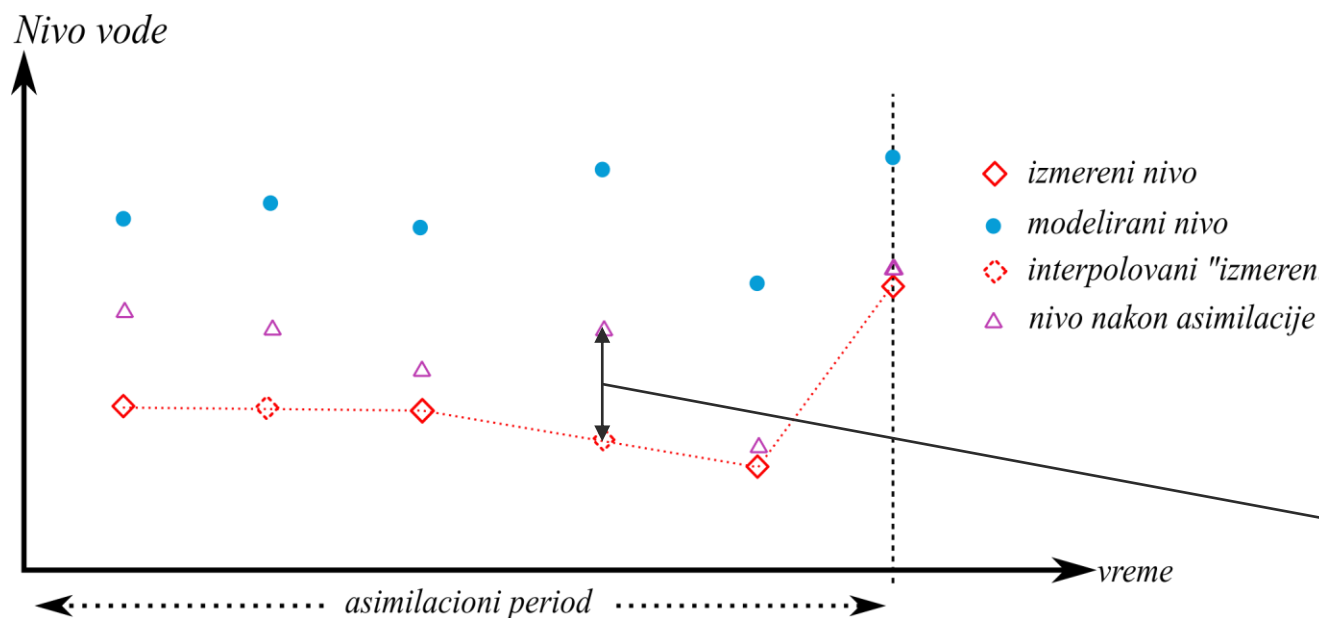


Merni podaci koji su interpolovani su manje pouzdani od stvarnih merenja!

Potrebno redukovati uticaj vrednosti error-a u korektivnom dotoku

Faktor ublaženja uticaja error-a

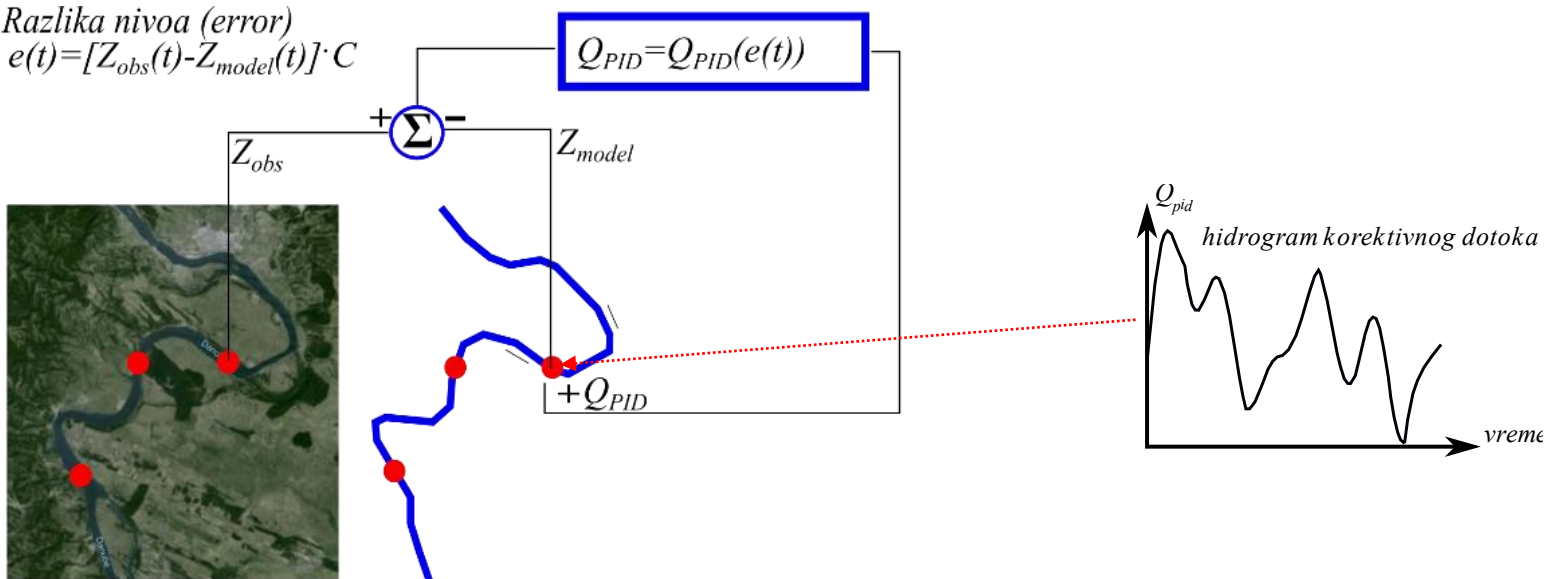
- Proporcionalno – Integrativno – Derivativni (PID) kontroleri kao alat za asimilaciju
- Problem: nejednaka skala merenih podataka i modela
- Kako prevazići problem? → linearna interpolacija merenja → novi „izmereni“ nivoi
- Faktor ublaženja C



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

- Proporcionalno – Integrativno – Derivativni (PID) kontroleri kao alat za asimilaciju
- Problem: nejednaka skala merenih podataka i modela
- Kako prevazići problem? → linearna interpolacija merenja → novi „izmereni“ nivoi
- Faktor ublaženja C
- Konačan rezultat rada PID kontrolera → hidrogrami korektivnih dotoka na svim mernim lokacijama

Razlika nivoa (error)
 $e(t) = [Z_{obs}(t) - Z_{model}(t)] \cdot C$



Rečna deonica

Računski model

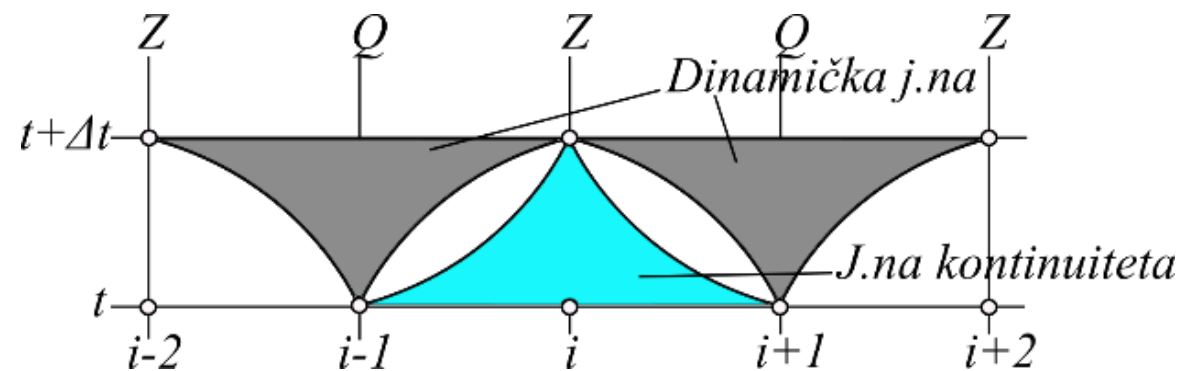
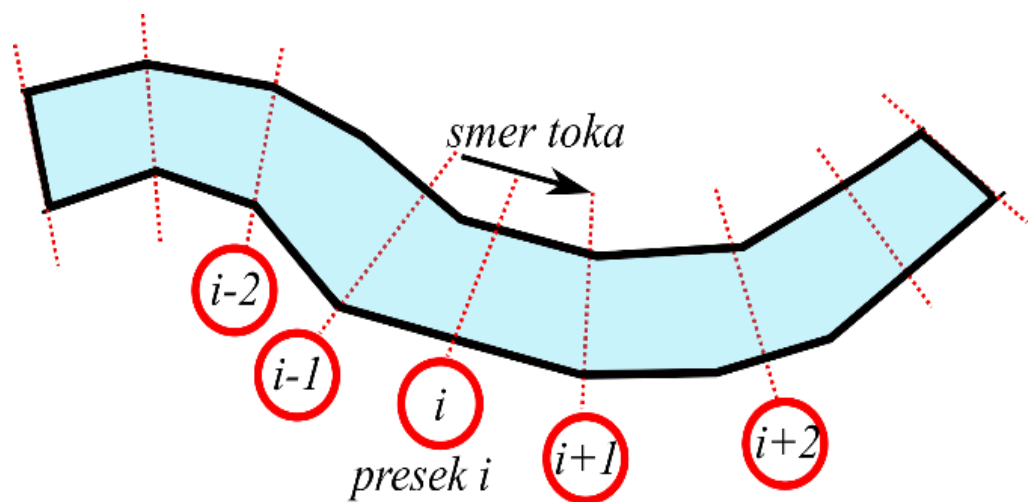
Kako se Q_{pid} implementira u model?

Koji model?

- Model tečenja u otvorenim tokovima (hidraulički model)
- Model difuzionog talasa

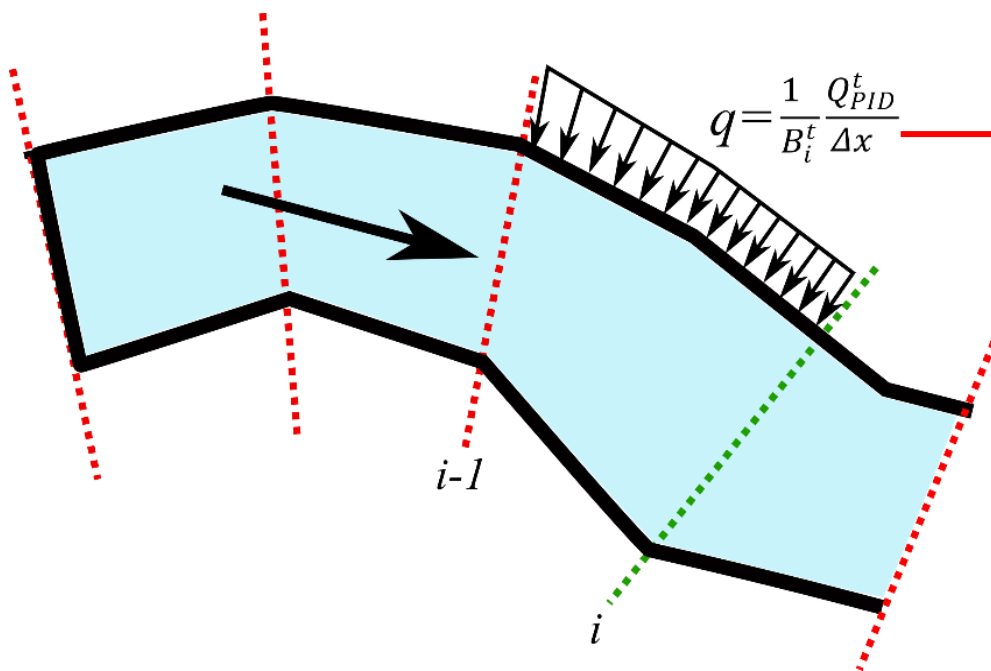
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gn^2 \frac{Q|Q|}{A^2 \cdot R^{4/3}} = 0$$



- Implementacija PID kontrolera u hidraulički model
- Implementacija Q_{pid} u model → fiktivni bočni dotok raspodeljen na deonici između dva susedna preseka
- Samo u jednačinu kontinuiteta

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$



q - bočni, raspodeljeni,
korektivni dotok

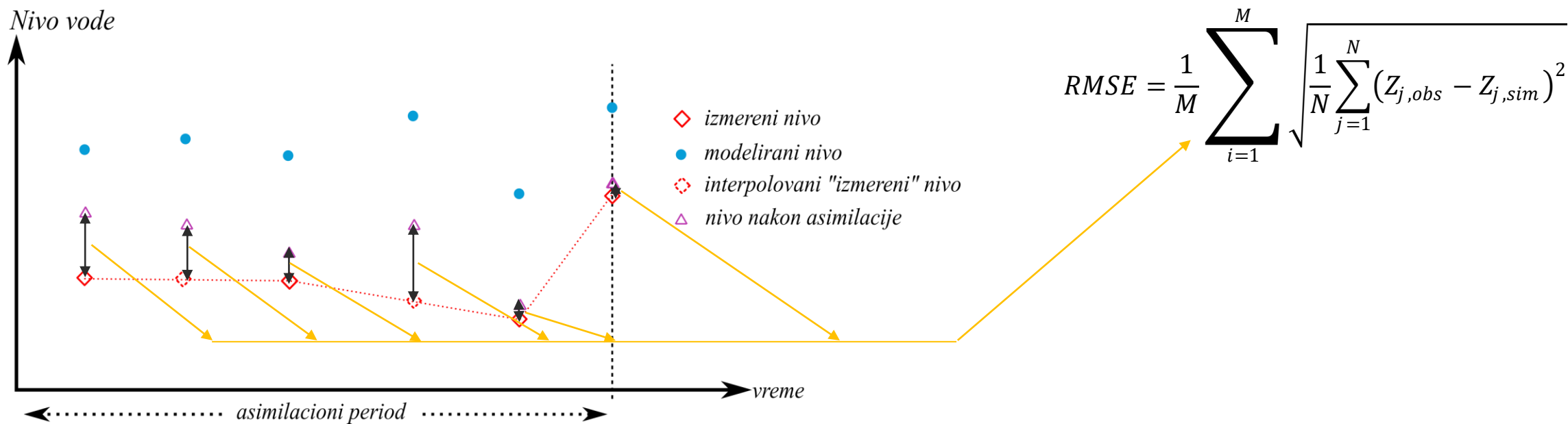
..... presek u kom postoje merenja
(asimilaciono mesto)

- Implementacija PID kontrolera - specifičnosti
- Upotreba PID kontrolera generalno podrazumeva:
 - Procenu optimalne konfiguracije kontrolera (P, I, PI, PD, PID)
 - Procenu optimalnih vrednosti parametara kontrolera (K_p , K_i , K_d) – podešavanje (tuning) kontrolera
- Generalni cilj istraživanja + specifičnosti upotrebe PID kontrolera → istraživački zadaci
 - Benchmark nove metode sa EnKF i potvrda računarske efikasnosti
 - Razviti algoritam za procenu optimalne konfiguracije PID kontrolera
 - Razviti algoritam za optimalno podešavanje PID kontrolera

- Implementacija PID kontrolera
- **Ocena kvaliteta asimilacije** → indikatori performansi (kvaliteta) asimilacije

1. Koliko su rezultati modela u proseku usklađeni sa merenjima? → *RMSE*

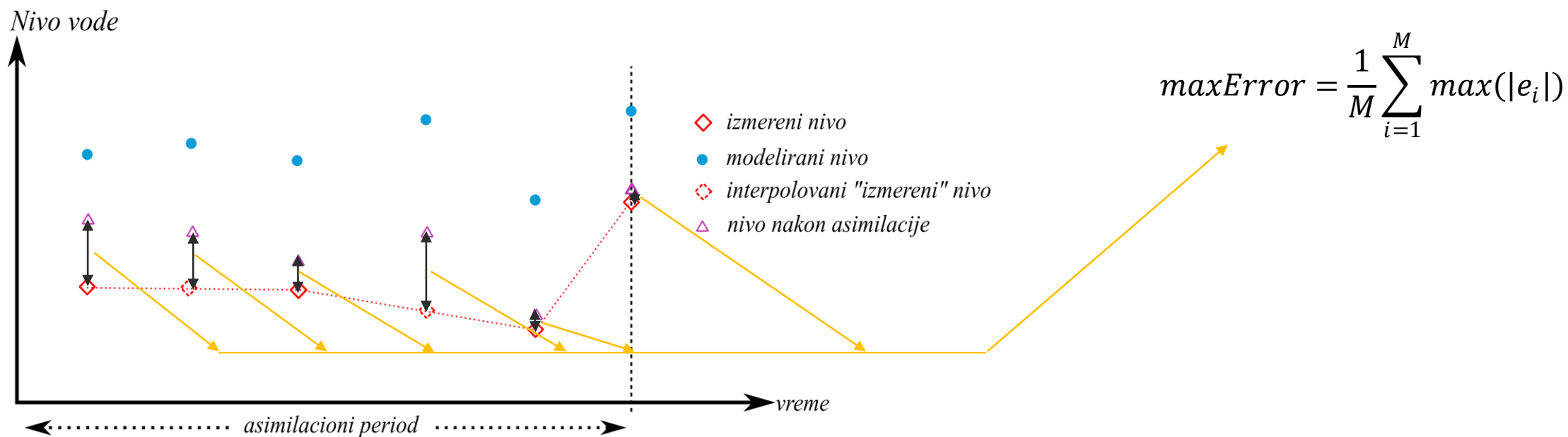
Više (M) lokacija za asimilaciju → srednja vrednost svih RMSE



- Implementacija PID kontrolera
- Ocena kvaliteta asimilacije → indikatori performansi (kvaliteta) asimilacije

2. Kolika su maksimalna odstupanja između merenih i modeliranih nivoa? → $maxError$

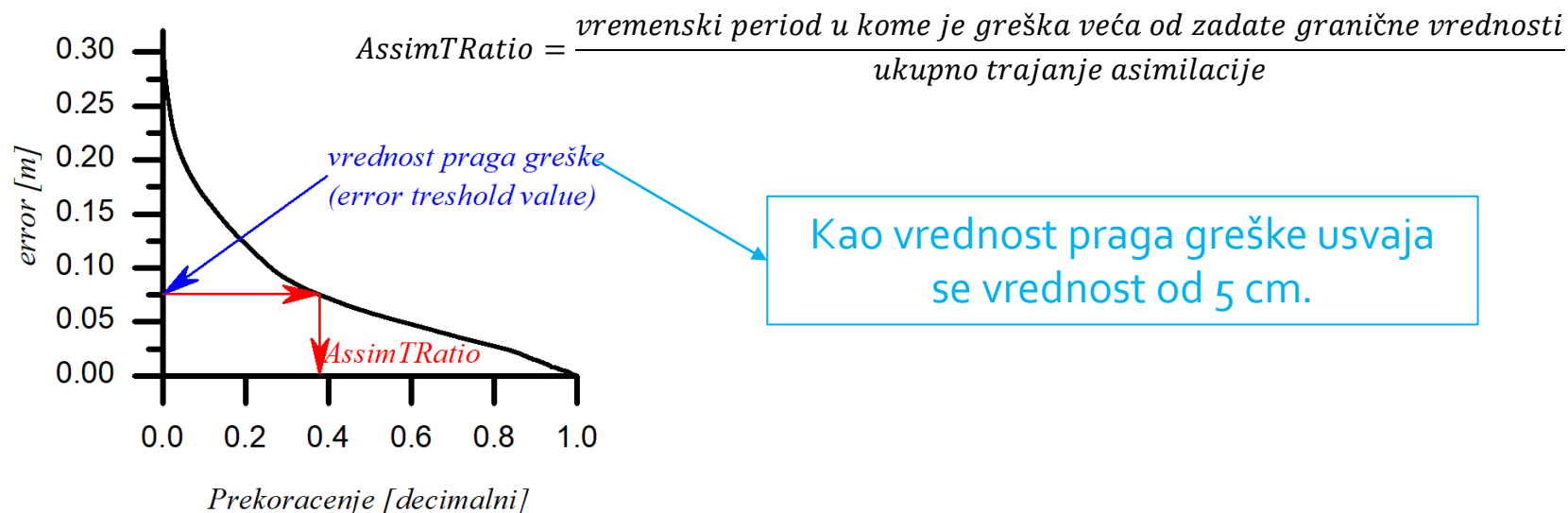
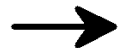
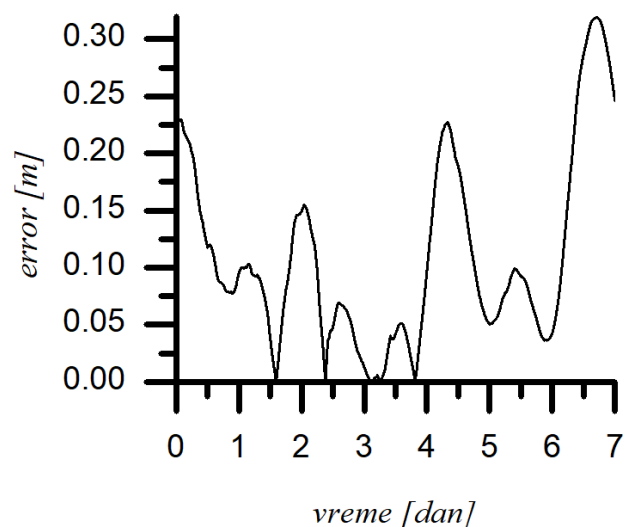
Više (M) lokacija za asimilaciju → srednja vrednost svih $maxError$



- Implementacija PID kontrolera
- **Ocena kvaliteta asimilacije** → indikatori performansi (kvaliteta) asimilacije

3. Koliko brzo modelirani nivo dostiže izmereni, tj. procenat asimilacionog perioda u kome vrednost greške prevazilazi zadati prag? → *AssimTRatio*

Više (M) lokacija za asimilaciju → srednja vrednost svih AssimTRatio

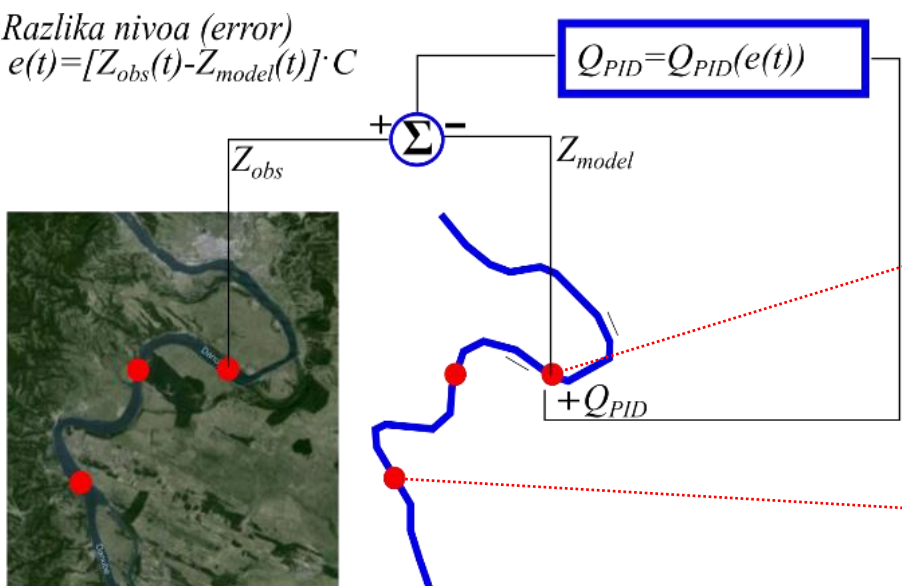


- Implementacija PID kontrolera
- Ocena kvaliteta asimilacije → indikatori performansi (kvaliteta) asimilacije

4. Kolika je bila „intervencija“ u model da bi se došlo do boljeg početnog uslova? → Količina vode koja se doda/oduzme iz modela → *CorrVol*

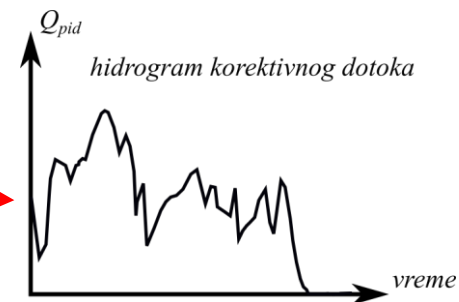
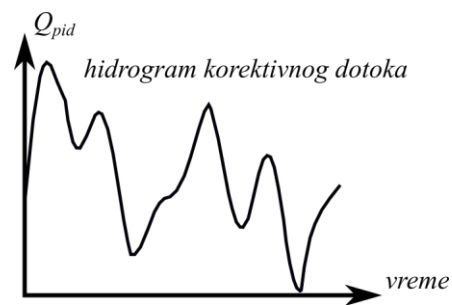
Više lokacija za asimilaciju → suma svih CorrVol

Razlika nivoa (error)
 $e(t) = [Z_{obs}(t) - Z_{model}(t)] \cdot C$



Rečna deonica

Računski model

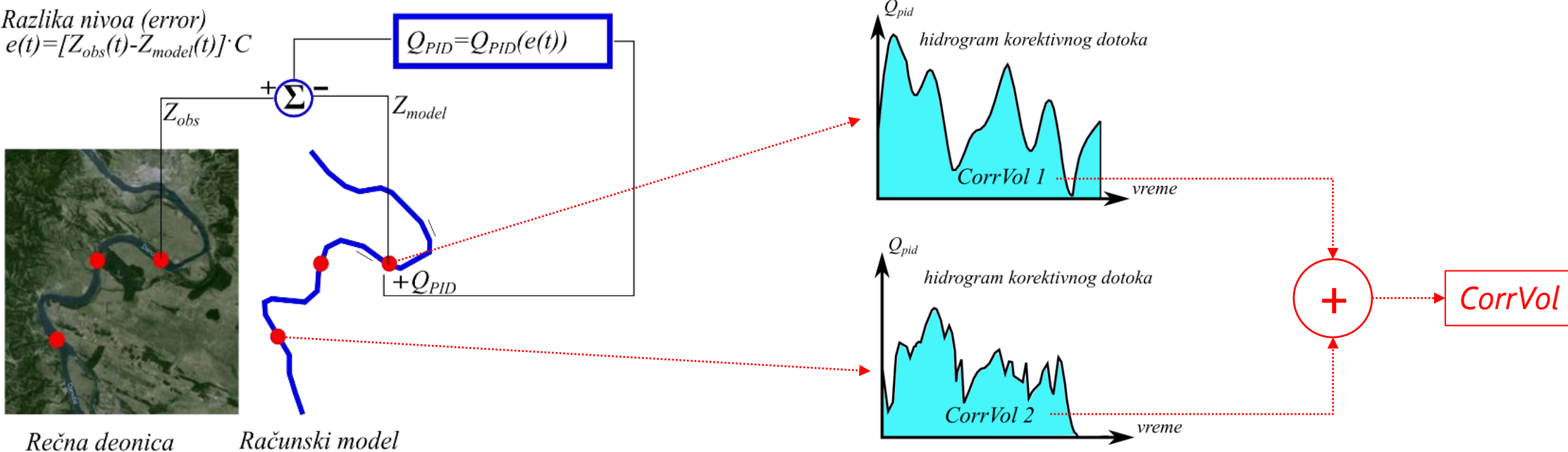


- Implementacija PID kontrolera
- Ocena kvaliteta asimilacije → indikatori performansi (kvaliteta) asimilacije

4. Kolika je bila „intervencija“ u model da bi se došlo do boljeg početnog uslova? → Količina vode koja se doda/oduzme iz modela → *CorrVol*

Više lokacija za asimilaciju → suma svih CorrVol

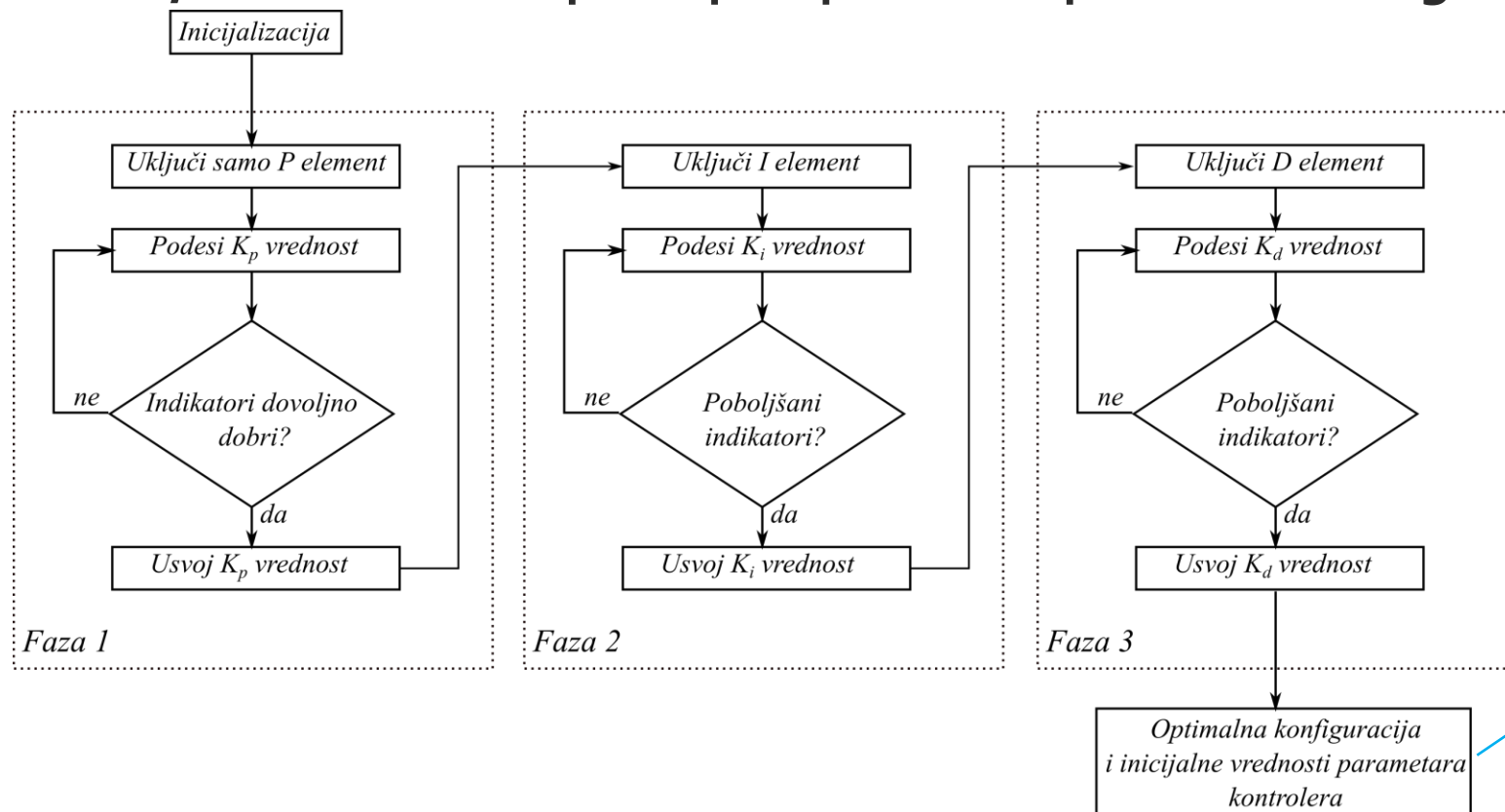
Razlika nivoa (error)
 $e(t) = [Z_{obs}(t) - Z_{model}(t)] \cdot C$



Rečna deonica

Računski model

- Implementacija PID kontrolera – optimalna konfiguracija kontrolera
- Konfiguracija → Koji od elemenata (P, I, D) u kontroleru je uključen
- Fazni, multi-metrički pristup za procenu optimalne konfiguracije



U mnogim slučajevima inicijalno procenjene vrednosti parametara kontrolera će biti dovoljno dobre!

Neki od K_p , K_i , K_d parametara = 0 → Isključiti odgovarajući element iz kontrolera

- Implementacija PID kontrolera – optimalno podešavanje kontrolera
- Neophodno fino podešavanje parametara kontrolera
- **Kriterijumske funkcije** → indikatori performansi (kvaliteta) asimilacije

$$f_{crit,1} = RMSE \rightarrow min$$

$$f_{crit,2} = maxError \rightarrow min$$

$$f_{crit,3} = AssimTRatio \rightarrow min$$

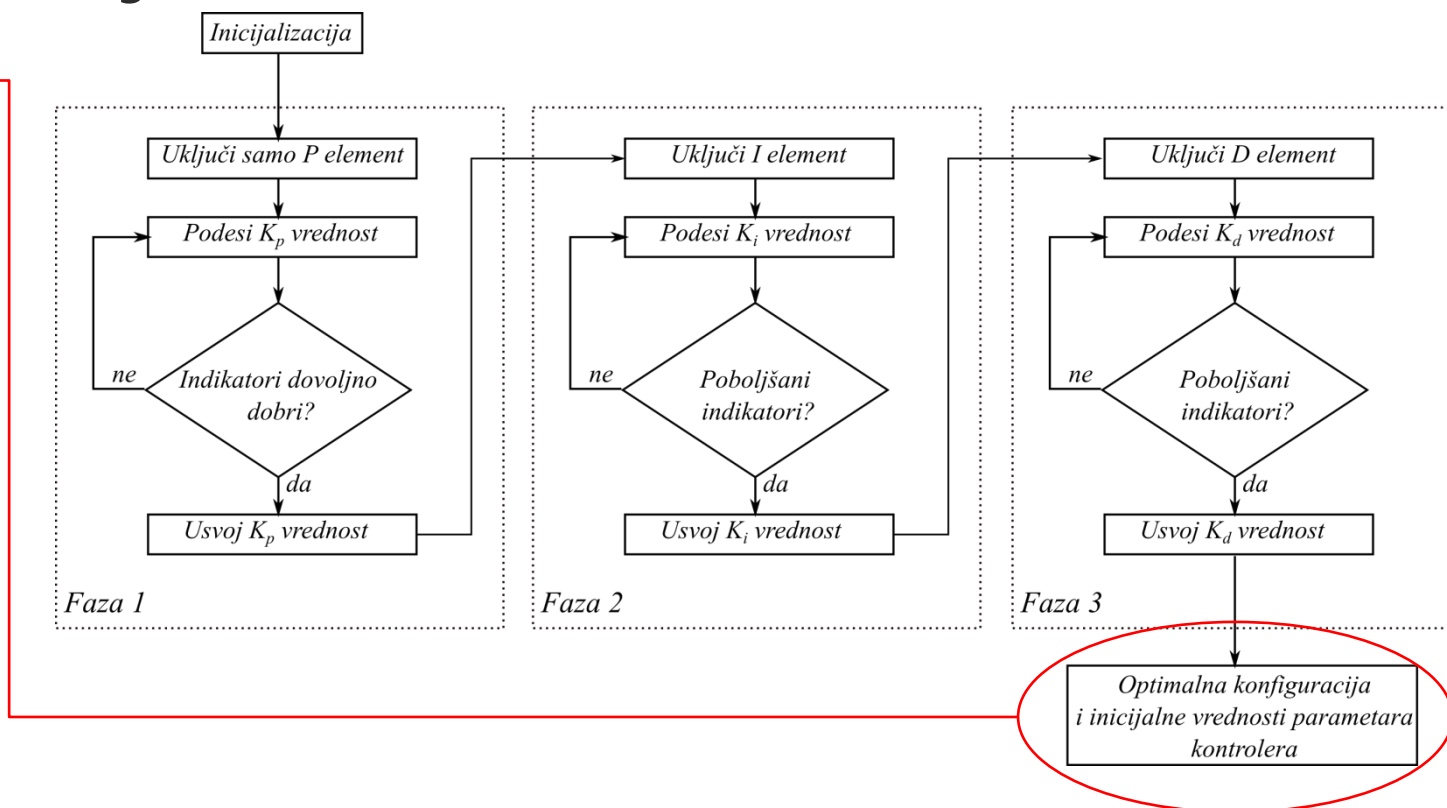
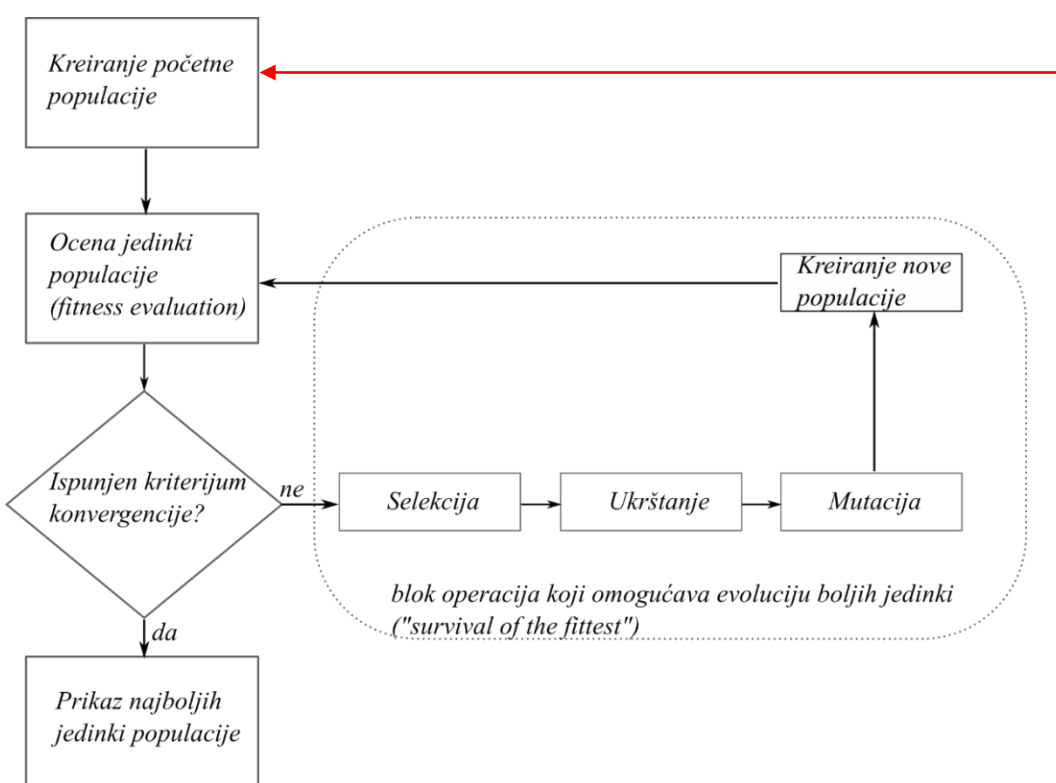
$$f_{crit,4} = CorrVol \rightarrow min$$

Ubacivanje sve 4 funkcije u višekriterijumsku optimizaciju nije praktično jer su neke funkcije isto orijentisane

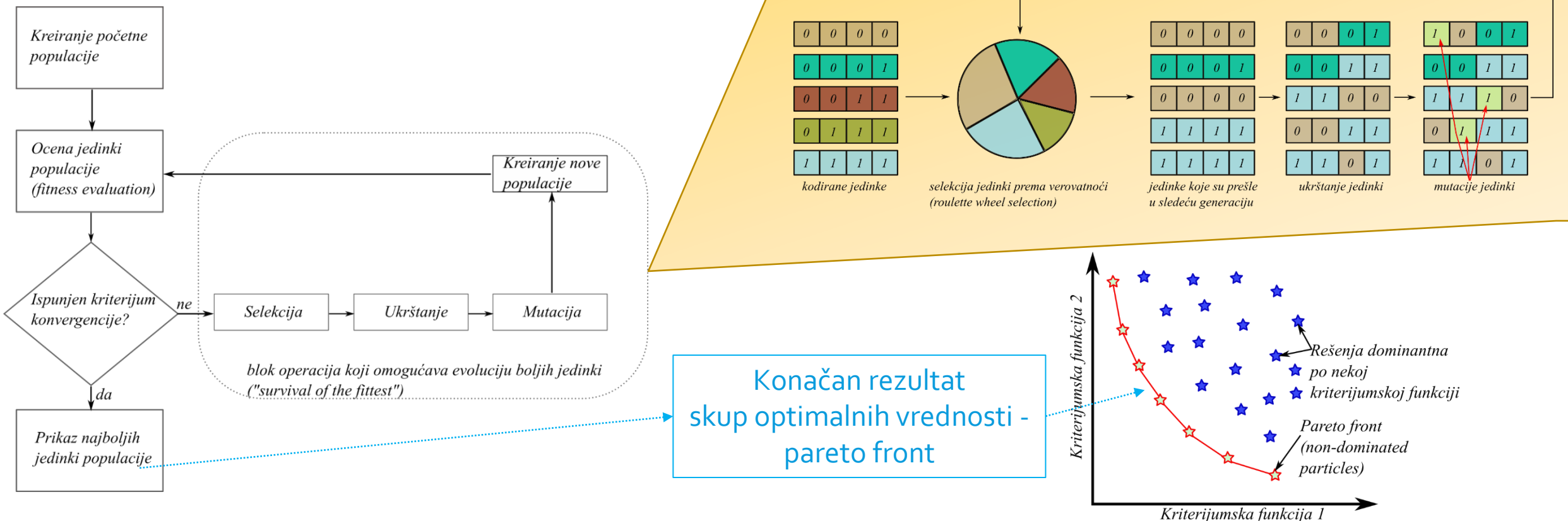
Za efikasniju optimizaciju bolje kombinacije od po dve suprotno orijentisane funkcije

Kombinacija kriterijumskih funkcija (objectives combination)	Kriterijumska funkcija 1	Kriterijumska funkcija 2
OC1	RMSE	maxError
OC2	RMSE	CorrVol
OC3	AssimTRatio	maxError
OC4	AssimTRatio	CorrVol

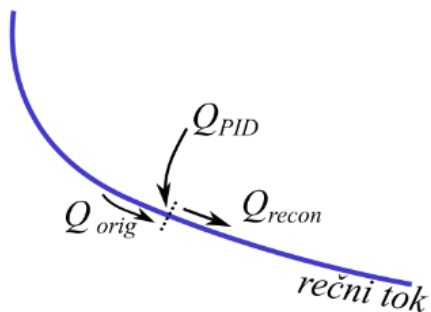
- Implementacija PID kontrolera – optimalno podešavanje kontrolera
- Neophodno fino podešavanje parametara kontrolera
- **Kriterijumske funkcije** → indikatori performansi (kvaliteta) asimilacije
- **Višekriterijumska optimizacija** → genetski algoritam – *NSGA-II*



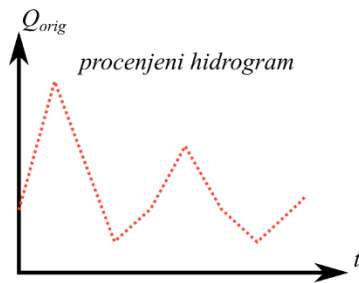
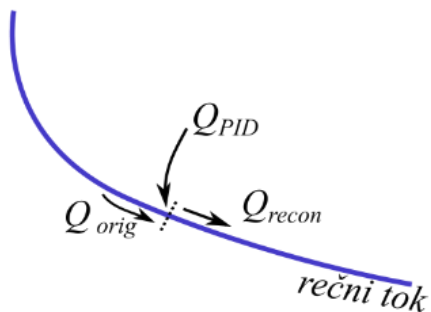
- Implementacija PID kontrolera – optimalno podešavanje kontrolera
- Neophodno fino podešavanje parametara kontrolera
- **Kriterijumske funkcije** → indikatori performansi (kvaliteta) asimilacije
- **Višekriterijumska optimizacija** → genetski algoritam – *NSGA-II*



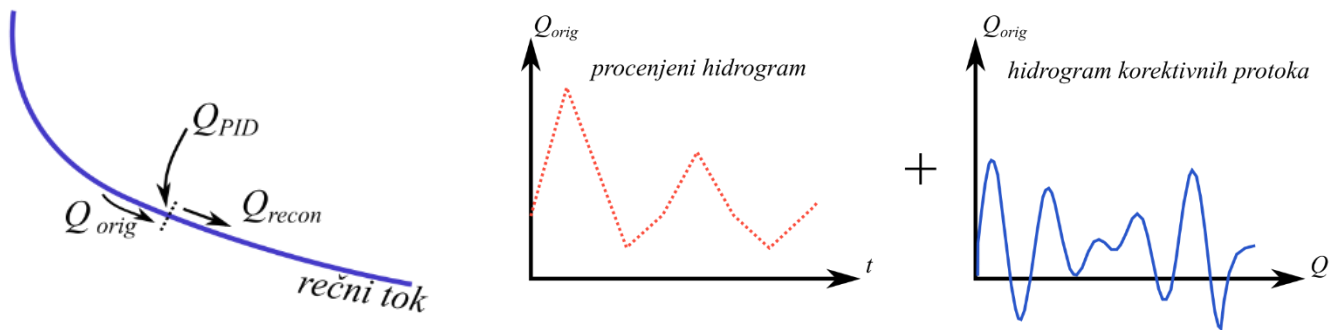
- Implementacija PID kontrolera – dodatne mogućnosti
- **Rezultat rada dobro implementiranih PID kontrolera u hidraulički model → hidrogram korektivnih dotoka → kako ga dodatno iskoristiti?**



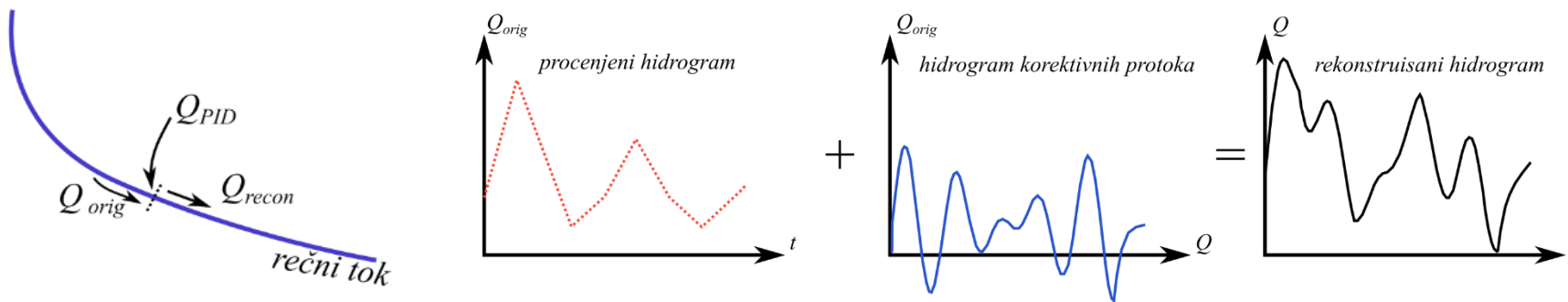
- Implementacija PID kontrolera – dodatne mogućnosti
- **Rezultat rada dobro implementiranih PID kontrolera u hidraulički model → hidrogram korektivnih dotoka → kako ga dodatno iskoristiti?**



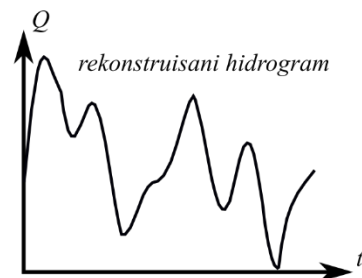
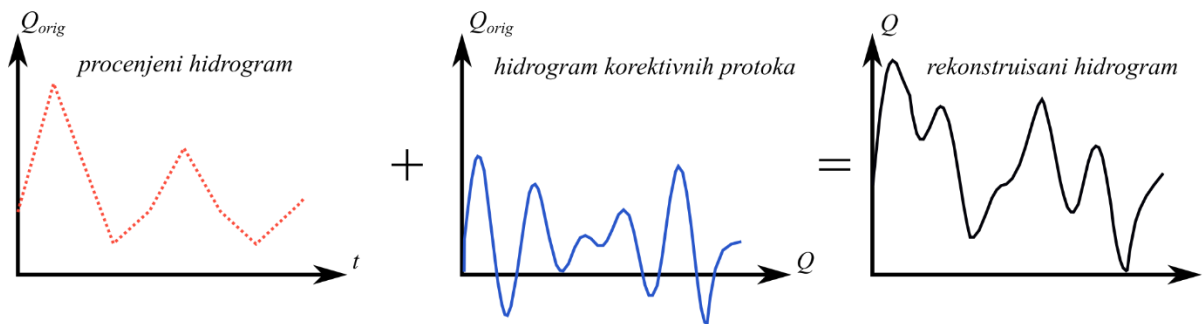
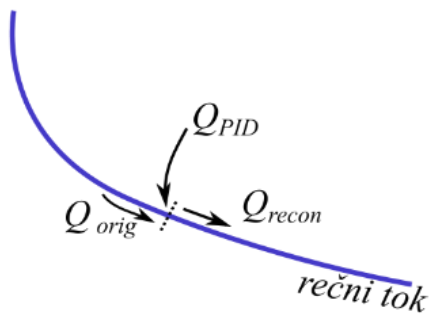
- Implementacija PID kontrolera – dodatne mogućnosti
- **Rezultat rada dobro implementiranih PID kontrolera u hidraulički model → hidrogram korektivnih dotoka → kako ga dodatno iskoristiti?**



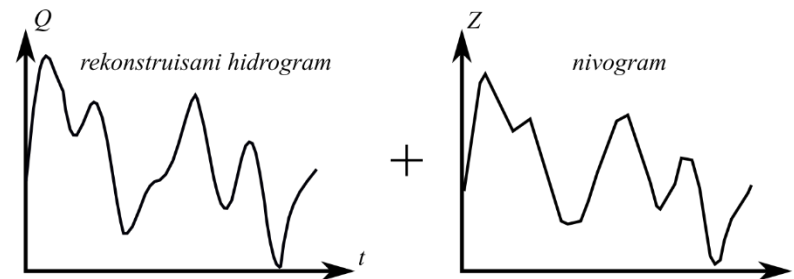
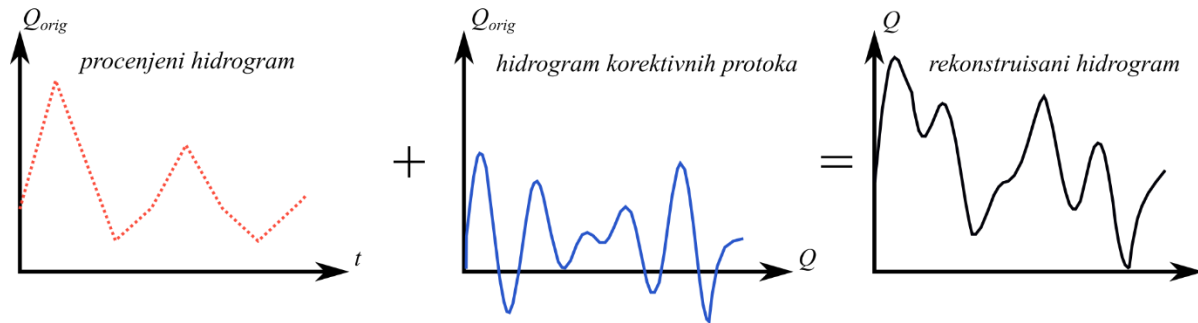
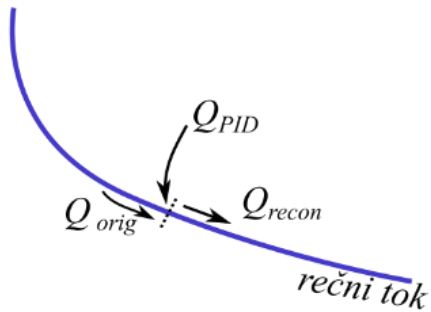
- Implementacija PID kontrolera – dodatne mogućnosti
- **Rezultat rada dobro implementiranih PID kontrolera u hidraulički model → hidrogram korektivnih dotoka → kako ga dodatno iskoristiti?**



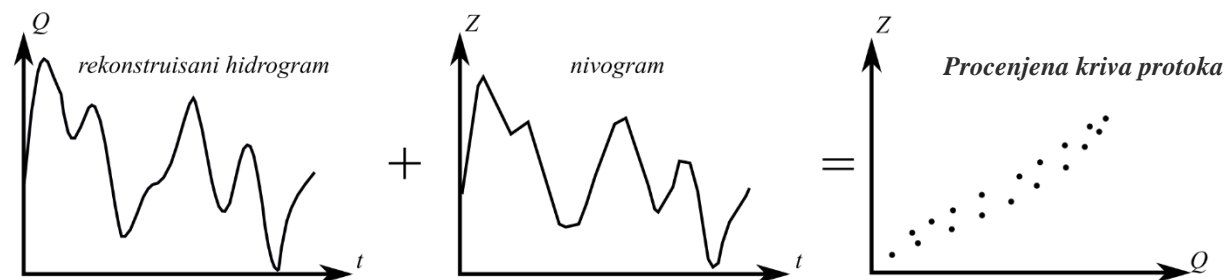
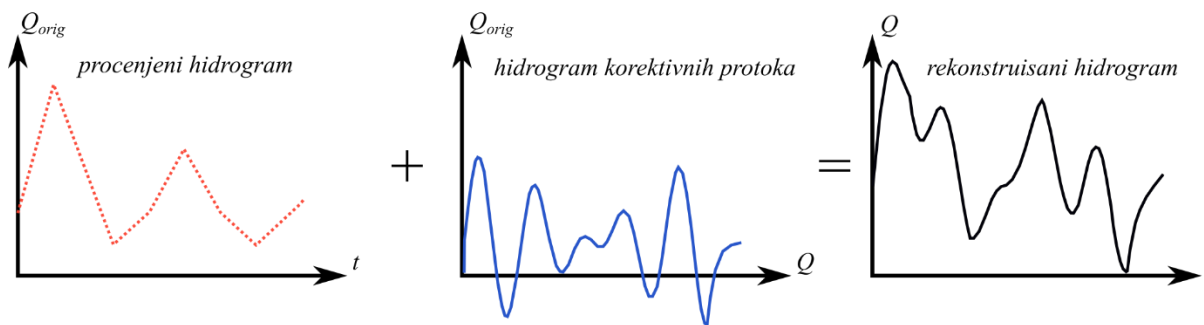
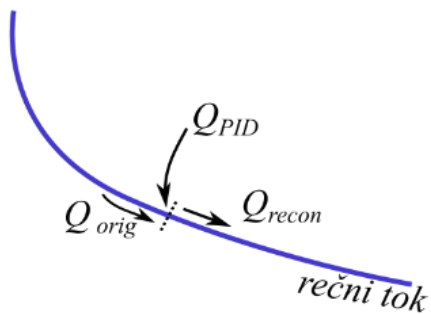
- Implementacija PID kontrolera – dodatne mogućnosti
- **Rezultat rada dobro implementiranih PID kontrolera u hidraulički model → hidrogram korektivnih dotoka → kako ga dodatno iskoristiti?**



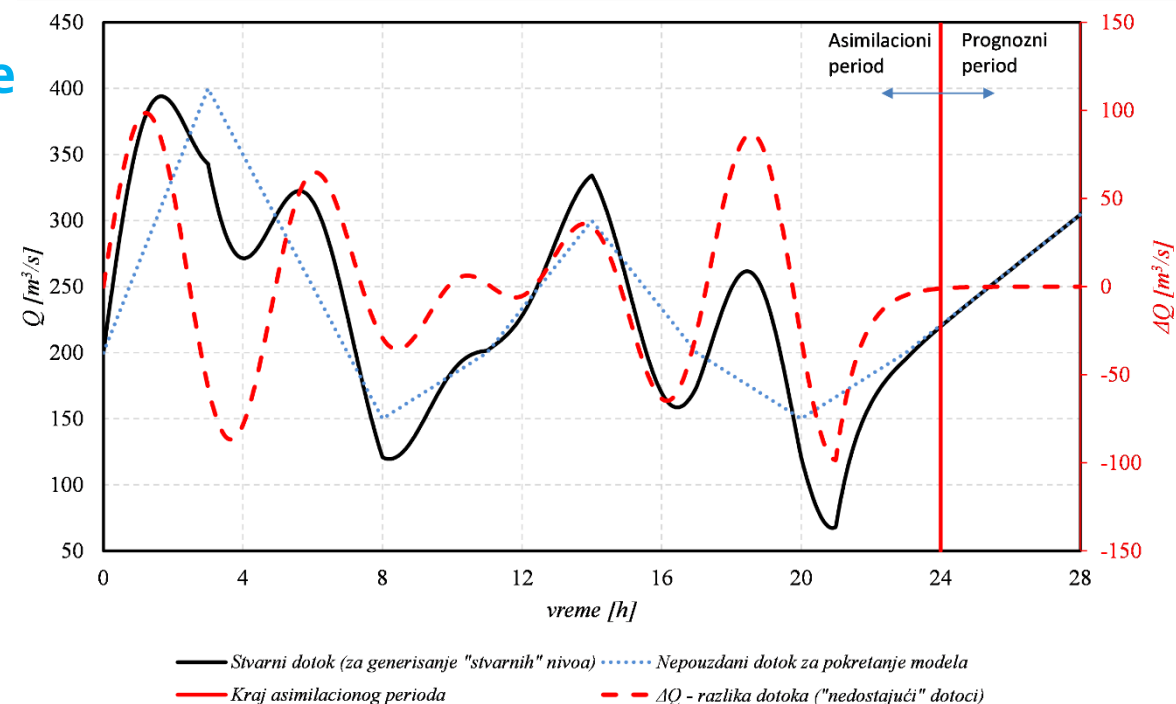
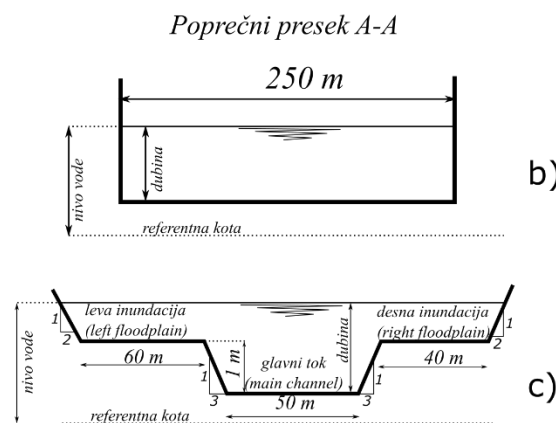
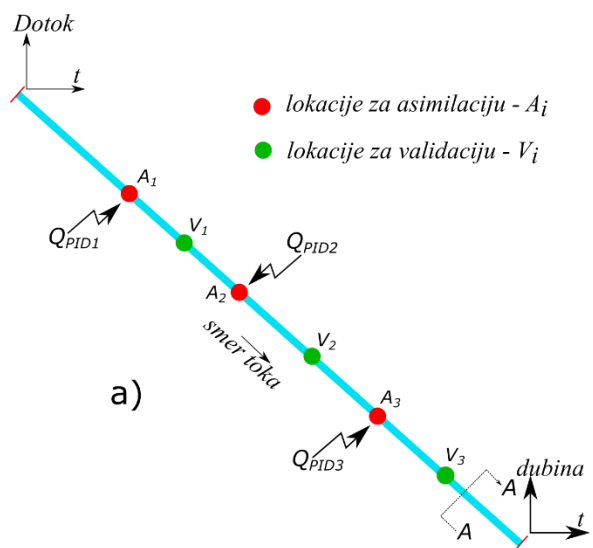
- Implementacija PID kontrolera – dodatne mogućnosti
- **Rezultat rada dobro implementiranih PID kontrolera u hidraulički model → hidrogram korektivnih dotoka → kako ga dodatno iskoristiti?**



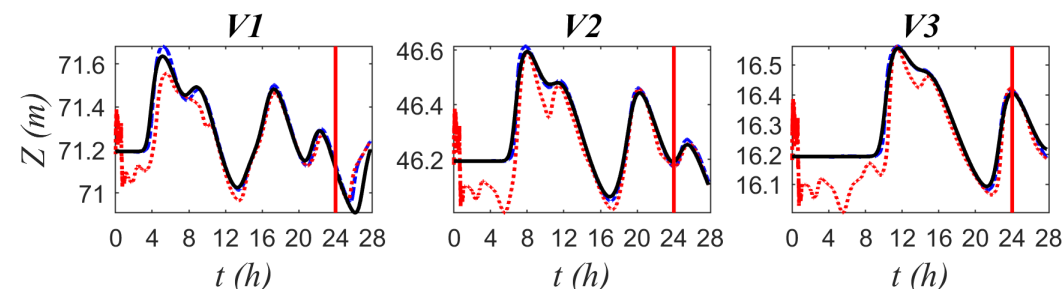
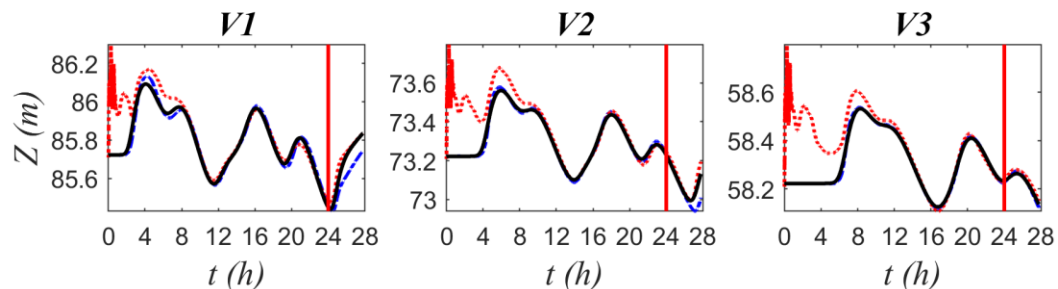
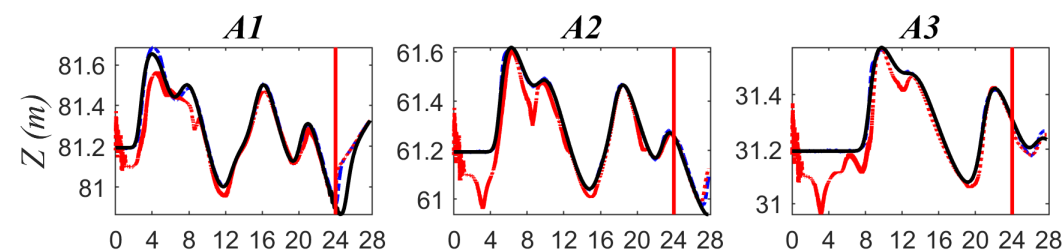
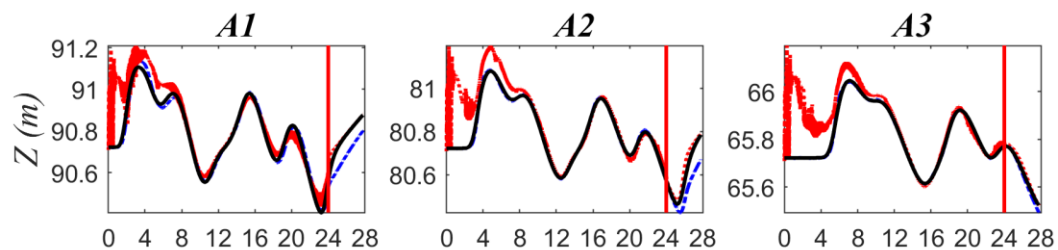
- Implementacija PID kontrolera – dodatne mogućnosti
- **Rezultat rada dobro implementiranih PID kontrolera u hidraulički model → hidrogram korektivnih dotoka → kako ga dodatno iskoristiti?**



- Benchmark asimilacionih metoda – hipotetički test primer
- Kanali dugački 50 km i 100 km
- Vremenski korak modela $\Delta t=10$ s, korak merenih podataka $\Delta t_{obs}=60$ s
- PID kontroleri podešeni ručno
- **Cilj: pokazati računarsku efikasnost nove metode**

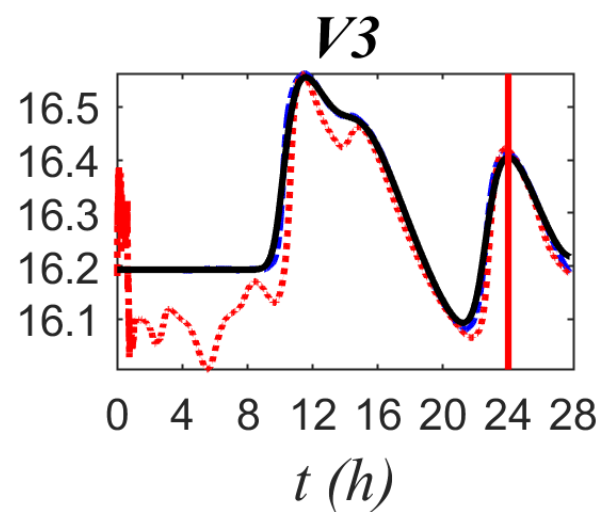
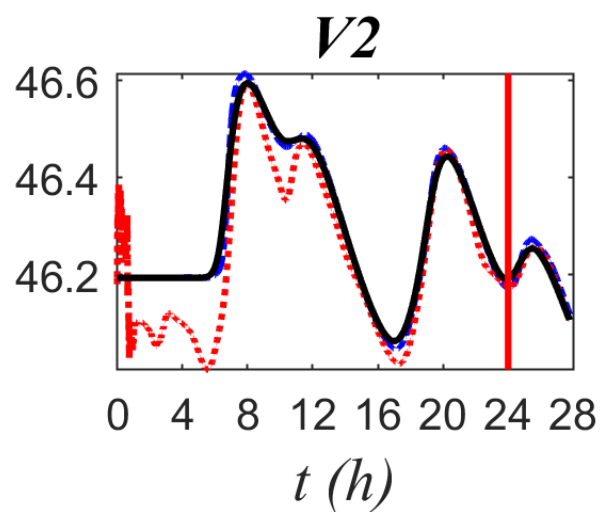
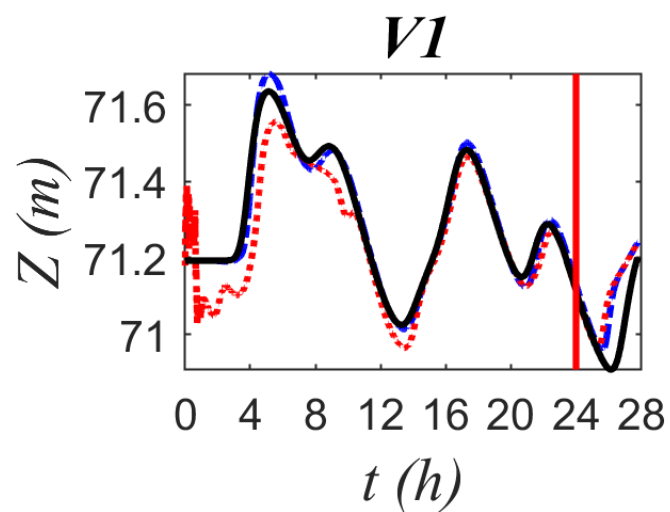
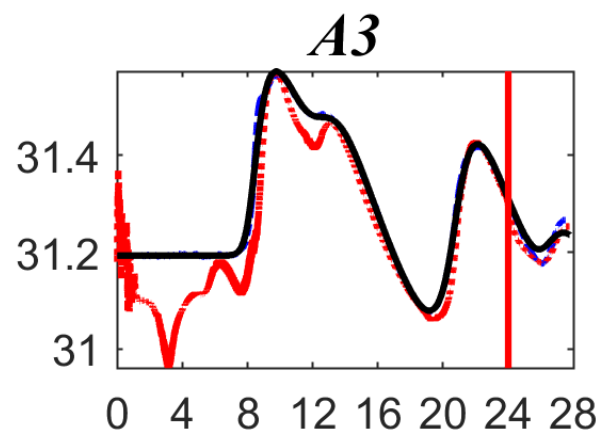
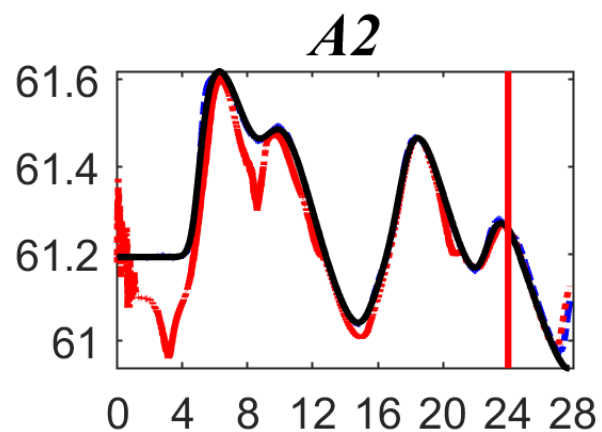
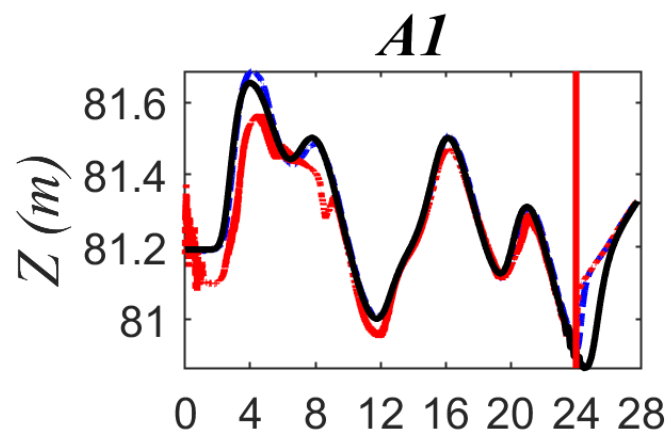


- Dostizanje izmerenih nivoa
- Po 3 varijante parametara PID kontrolera za oba tipa kanala (R_1, R_2, R_3 i C_1, C_2, C_3)
- Najbolji rezultati se postižu kada je $K_p=10$ i $K_i=1$ (slučajevi R_3 i C_3)
- Ispitane 3 varijante veličine ansambla u EnKF: 50, 100, 200 (R_4, R_5, R_6 i C_4, C_5, C_6)



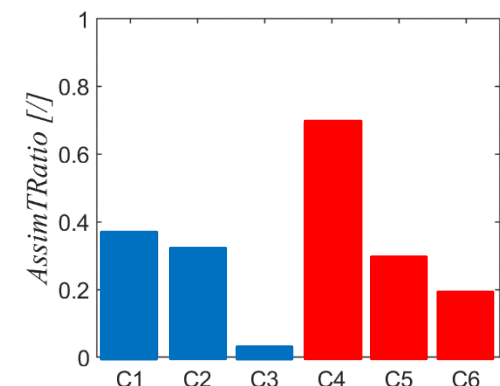
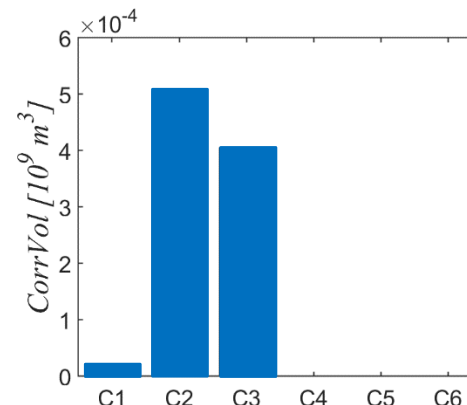
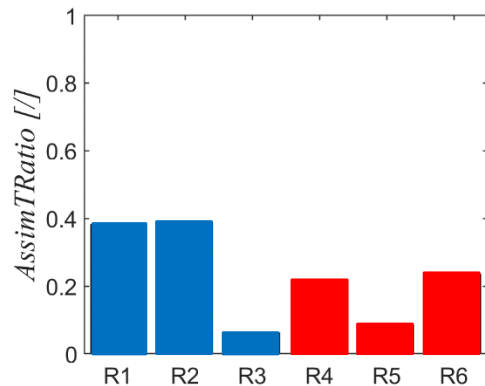
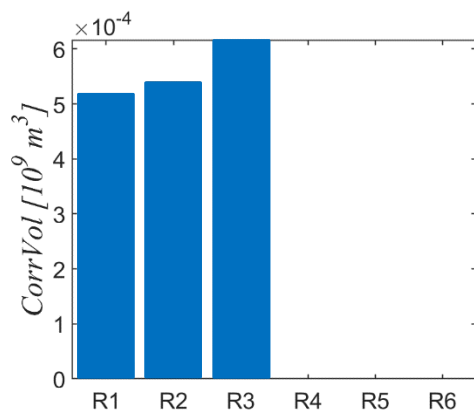
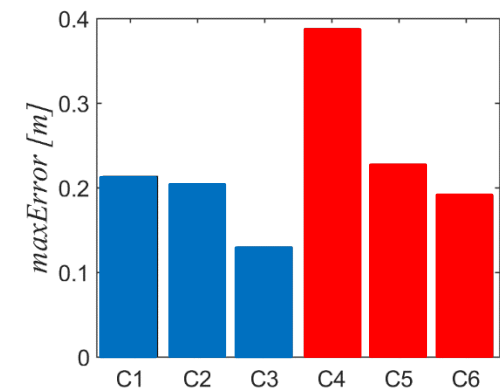
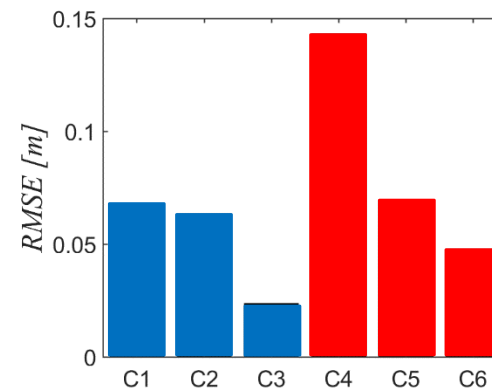
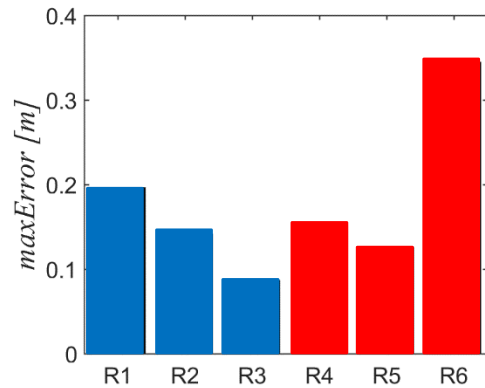
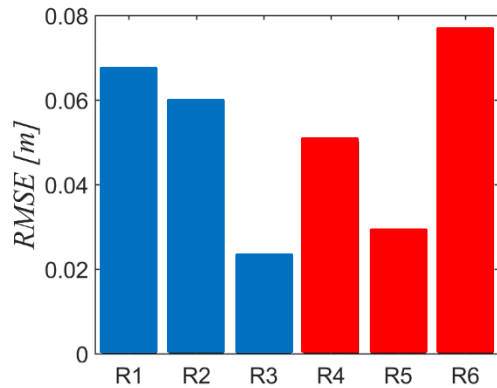
— R3 — R6 — Stvarno stanje — Kraj asimilacije

— C3 — C6 — Stvarno stanje — Kraj asimilacije



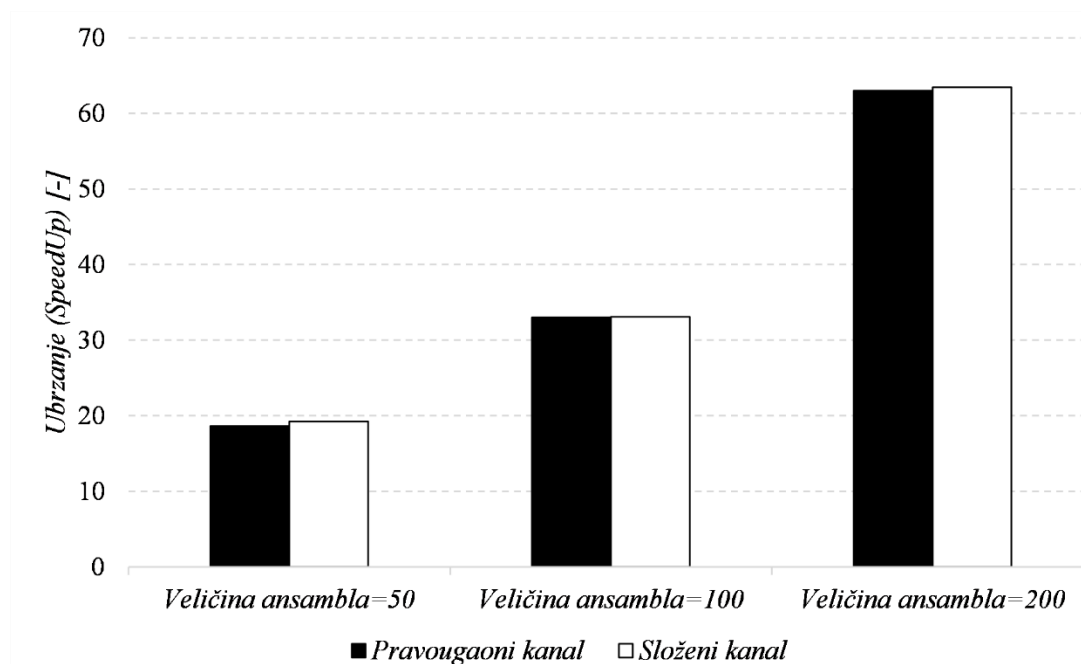
— C3 — C6 — Stvarno stanje — Kraj asimilacije

- Indikatori kvaliteta asimilacije
- Relativno dobro podešeni PID kontroleri (■) vs. EnKF (■) → bolji indikatori kvaliteta asimilacije

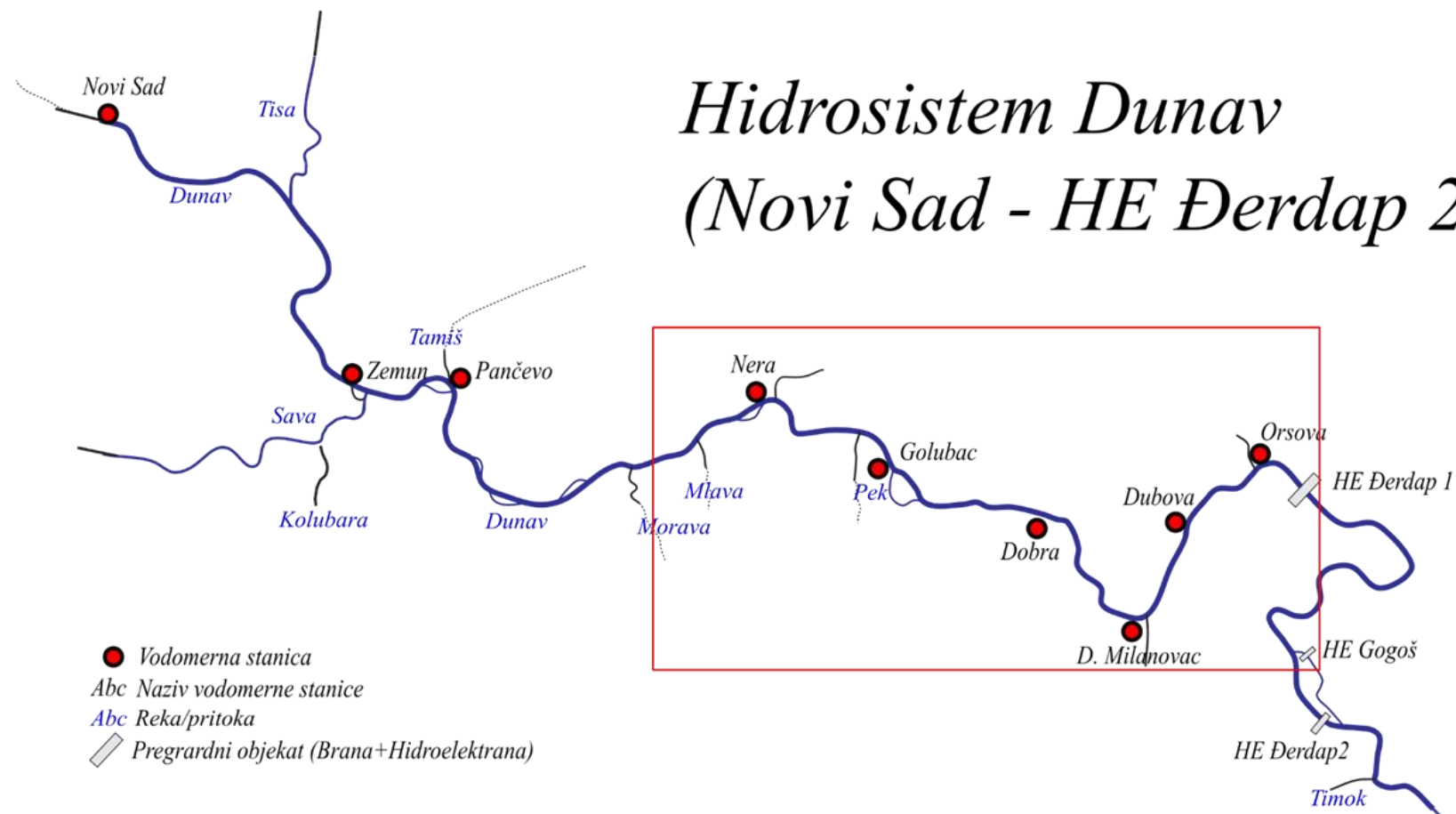


- Ubrzanje proračuna
- Relativno dobro podešeni PID kontroleri vs. EnKF → značajno ubrzanje proračuna

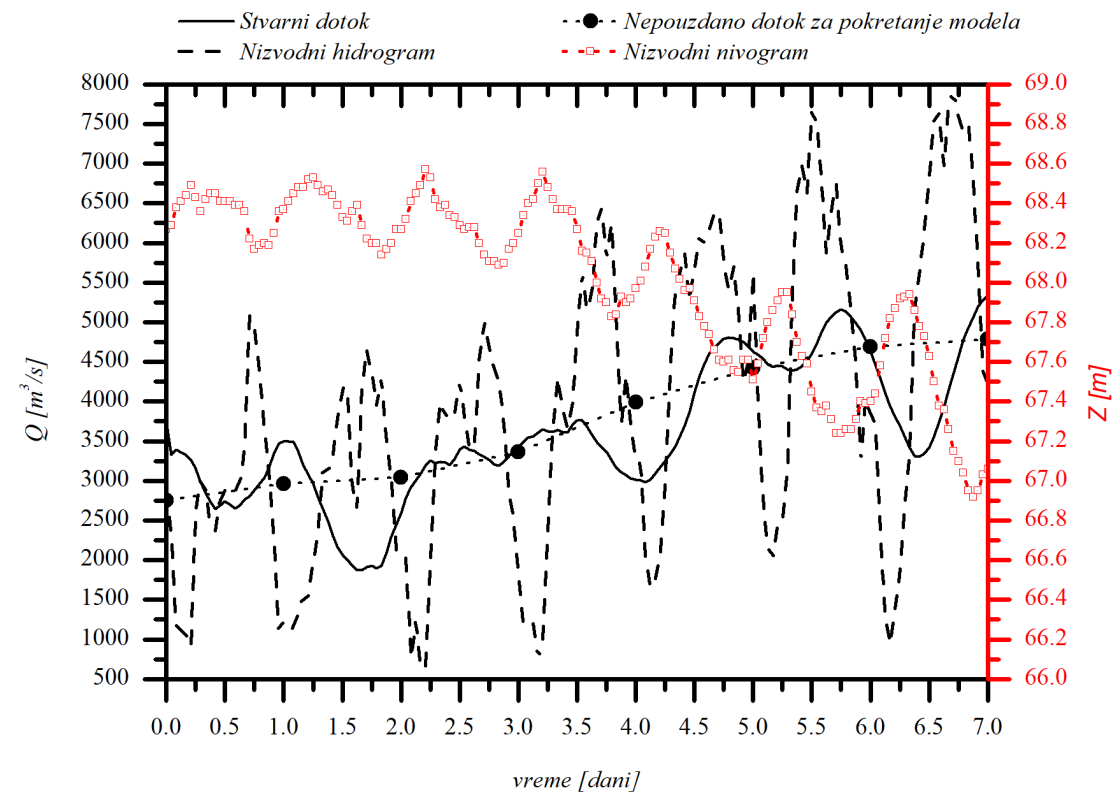
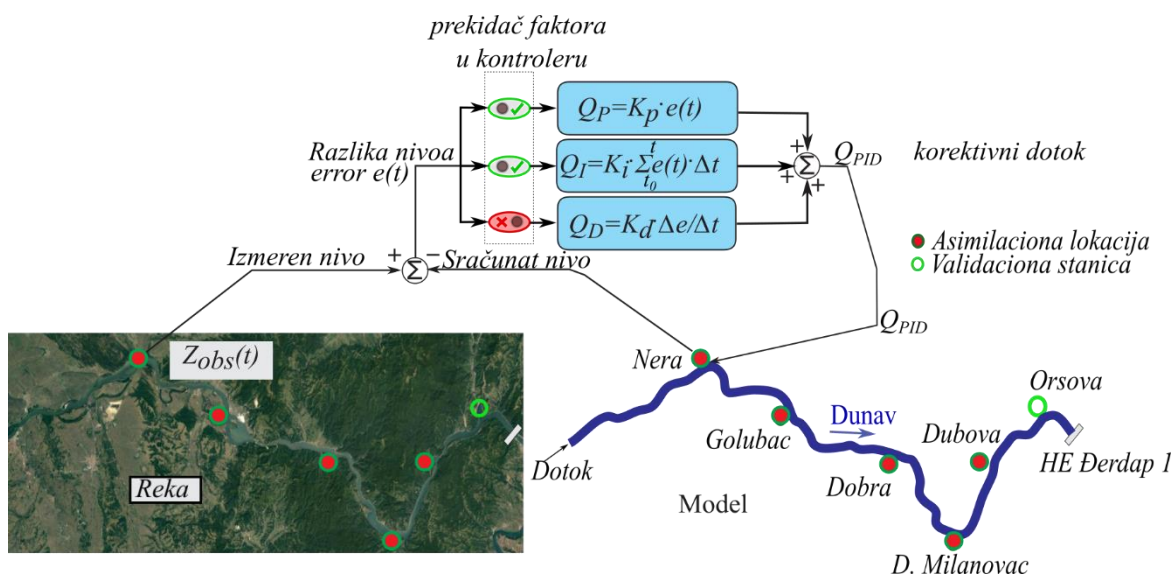
$$Speed\ up = \frac{Runtime_{EnKF}}{Runtime_{PID-DA}}$$



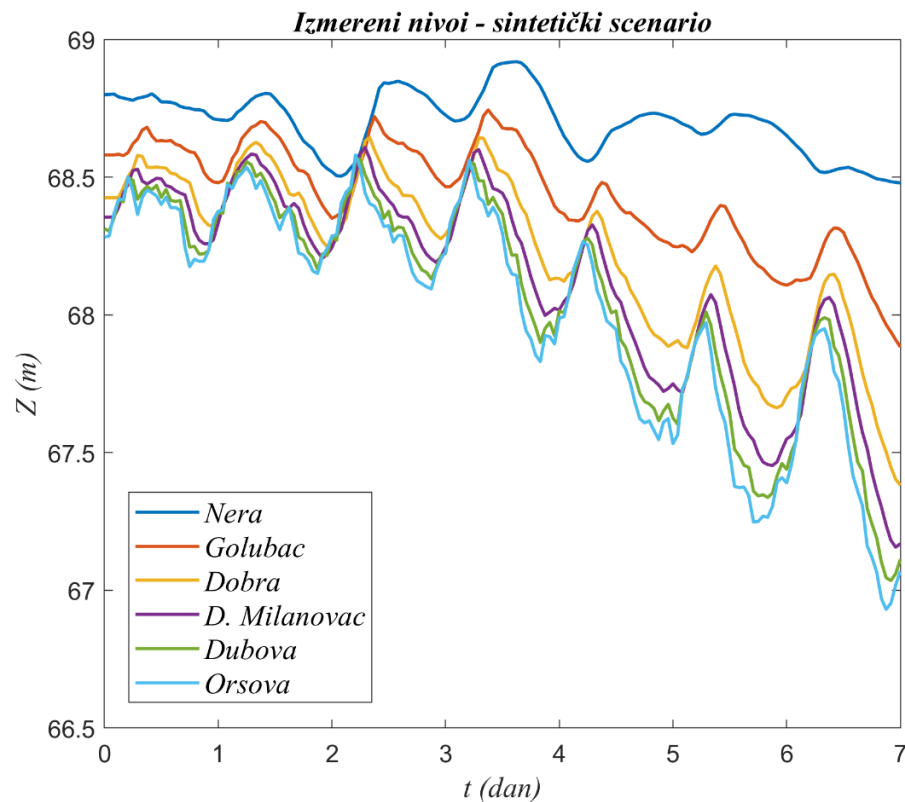
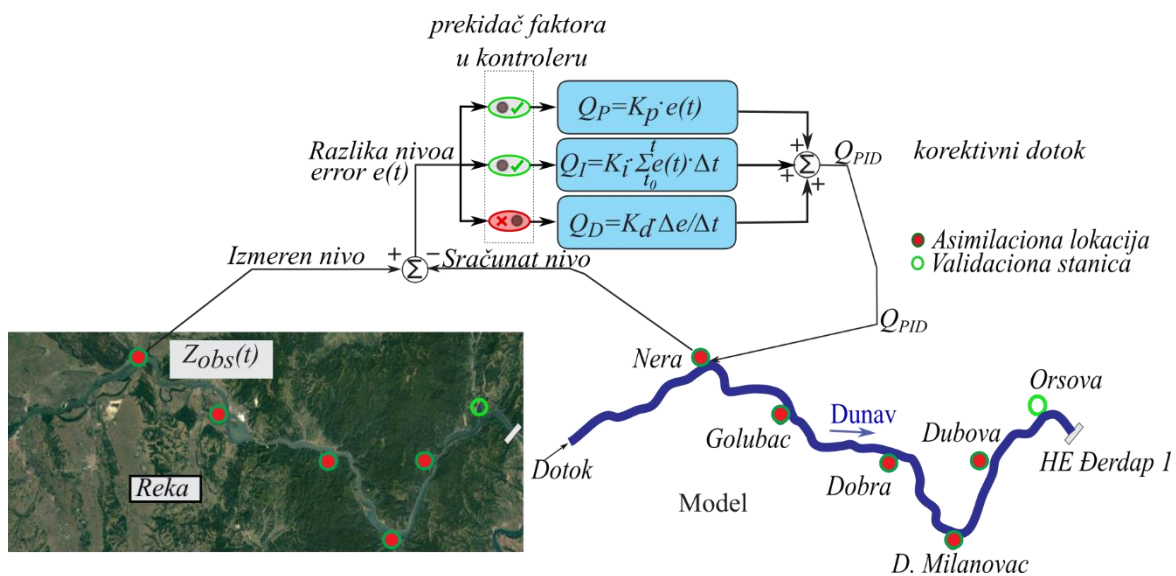
- Primena na realnom test primeru
- Ukupna deonica oko 300 km, predmet istraživanja deonica 170 km pod uticajem HE Đerdap 1
- Potreba za prognozom nivoa usled upravljanja hidroelektranom
- Scenario trajanja 7 dana
- Korak modela – 1 min
- Korak merenja – 60 min



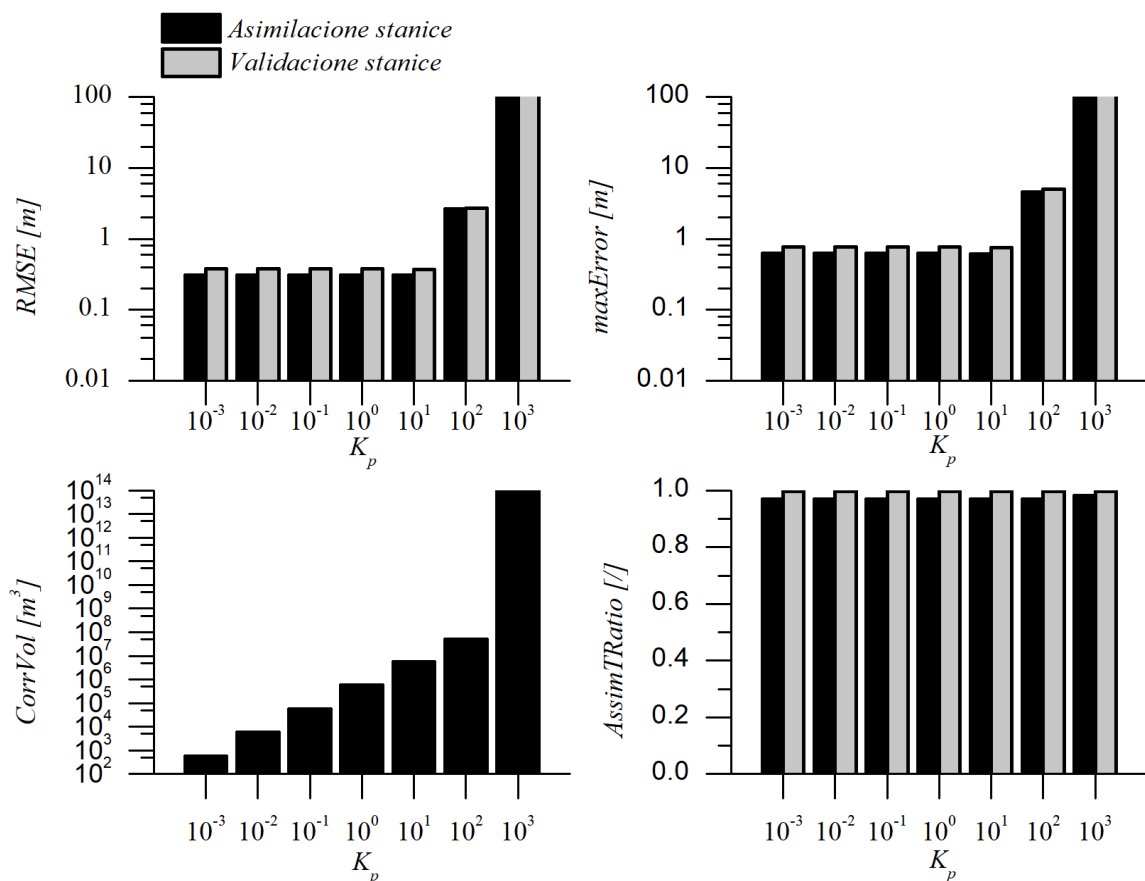
- Primena na realnom test primeru – optimalna konfiguracija i optimalno podešavanje
- Za usvojeni scenario određuje se optimalna konfiguracija predloženom faznom analizom
- Diskretne vrednosti parametara kontrolera: $10^n, n=\{-4,-3,-2,-1,0,1,2,3\}$



- Primena na realnom test primeru – optimalna konfiguracija i optimalno podešavanje
- Za usvojeni scenario određuje se optimalna konfiguracija predloženom faznom analizom
- Diskretne vrednosti parametara kontrolera: $10^n, n=\{-4,-3,-2,-1,0,1,2,3\}$



- Optimalna konfiguracija kontrolera
- Na svim mernim stanicama postavljeni isti kontroleri (svuda iste vrednosti K_p , K_i i K_d)

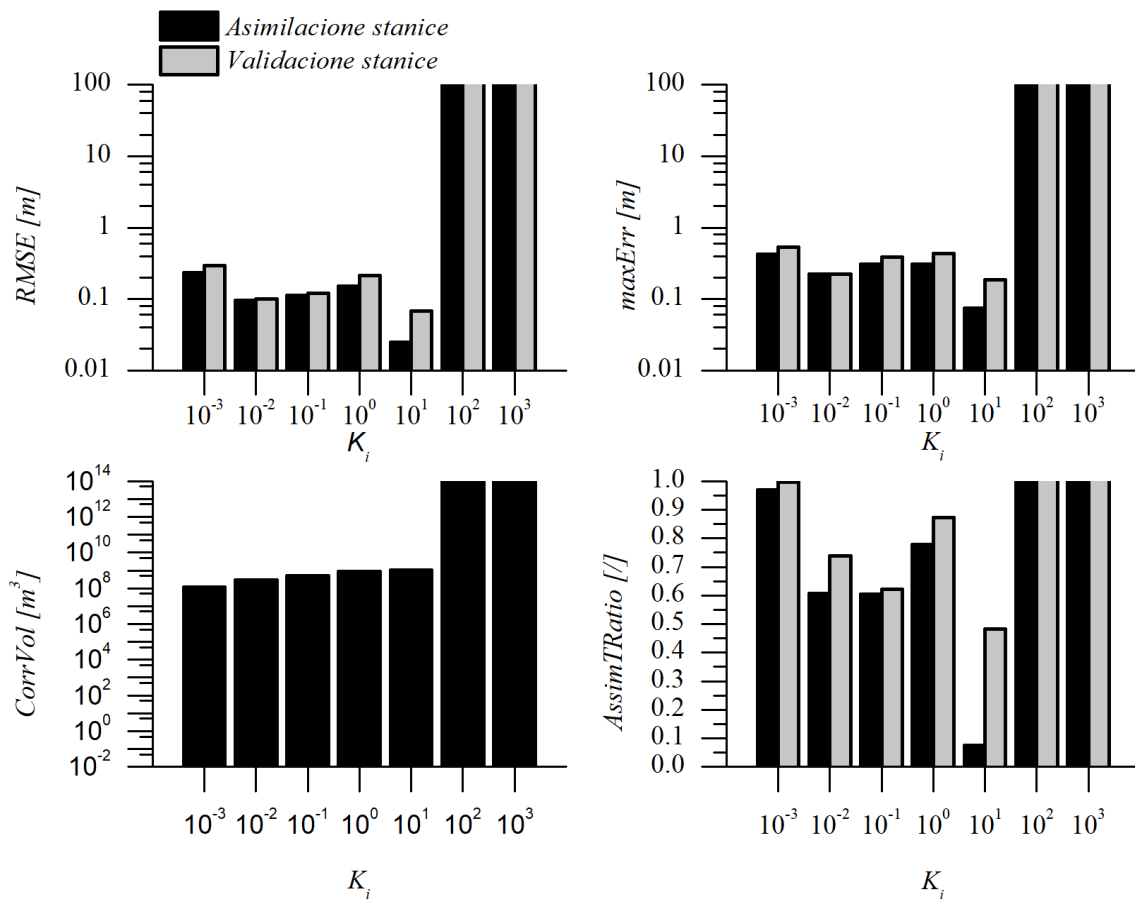


Najmanje vrednosti *RMSE* i *maxError* indikatora se dobijaju kada je $K_p=10$

Nedovoljno dobro kada se pogleda i *AssimTRatio*!

Neophodno uvesti i integrativni element u kontroler!

- Optimalna konfiguracija kontrolera
- Na svim mernim stanicama postavljeni isti kontroleri (svuda iste vrednosti K_p , K_i i K_d)

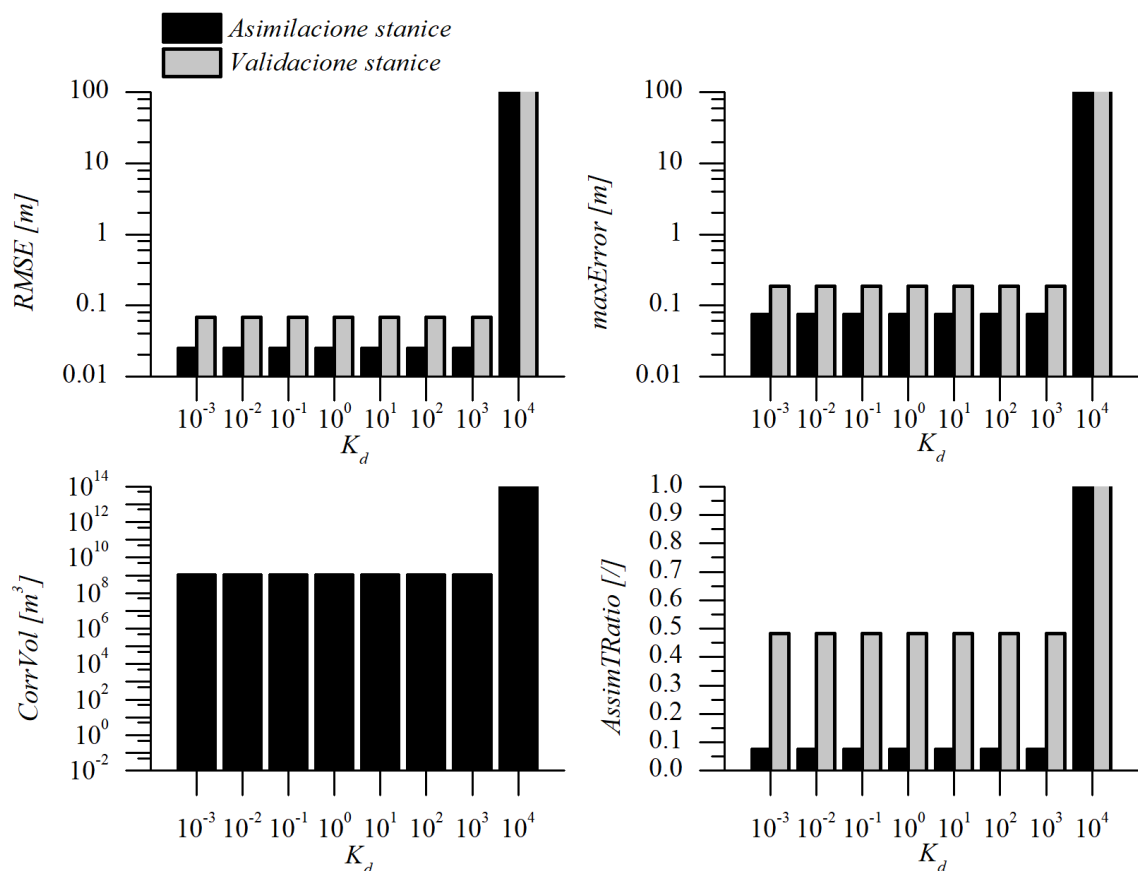


Vidno smanjenje vrednosti *RMSE* i *maxError* indikatora se dobija za $K_i=10$

Značajno smanjenje i indikatora *AssimTRatio*!

Proveriti da li derivativni element donosi još poboljšanja!

- Optimalna konfiguracija kontrolera
- Na svim mernim stanicama postavljeni isti kontroleri (svuda iste vrednosti K_p , K_i i K_d)



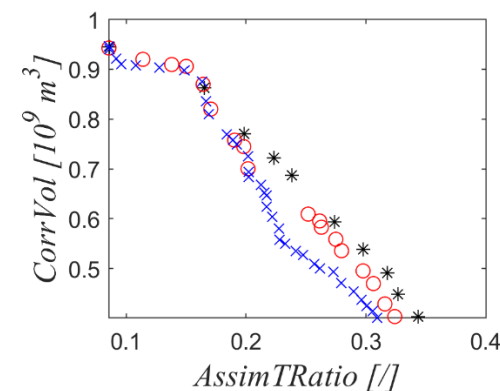
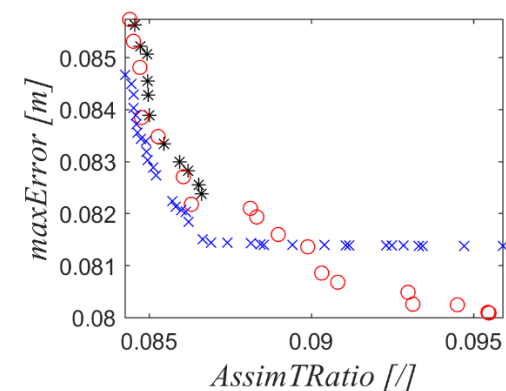
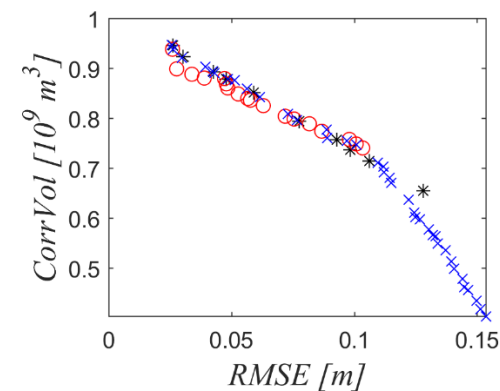
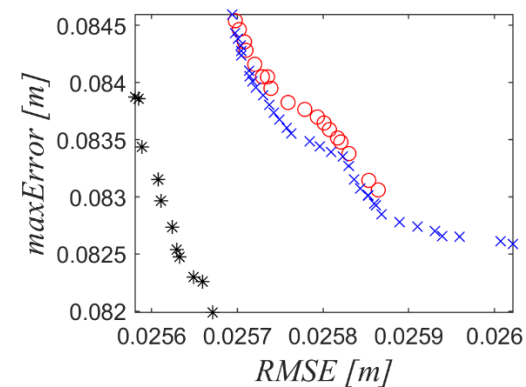
Vrednosti svih indikatora se praktično ne menjaju dodavanjem derivativnog elementa

U ovom primeru nije potreban derivativni element!

Optimalna konfiguracija kontrolera je PI kontroler

Vrednosti $K_p=10$ i $K_i=10$, za sve asimilacione lokacije poslužiće kao početne vrednosti za fino podešavanje kontrolera

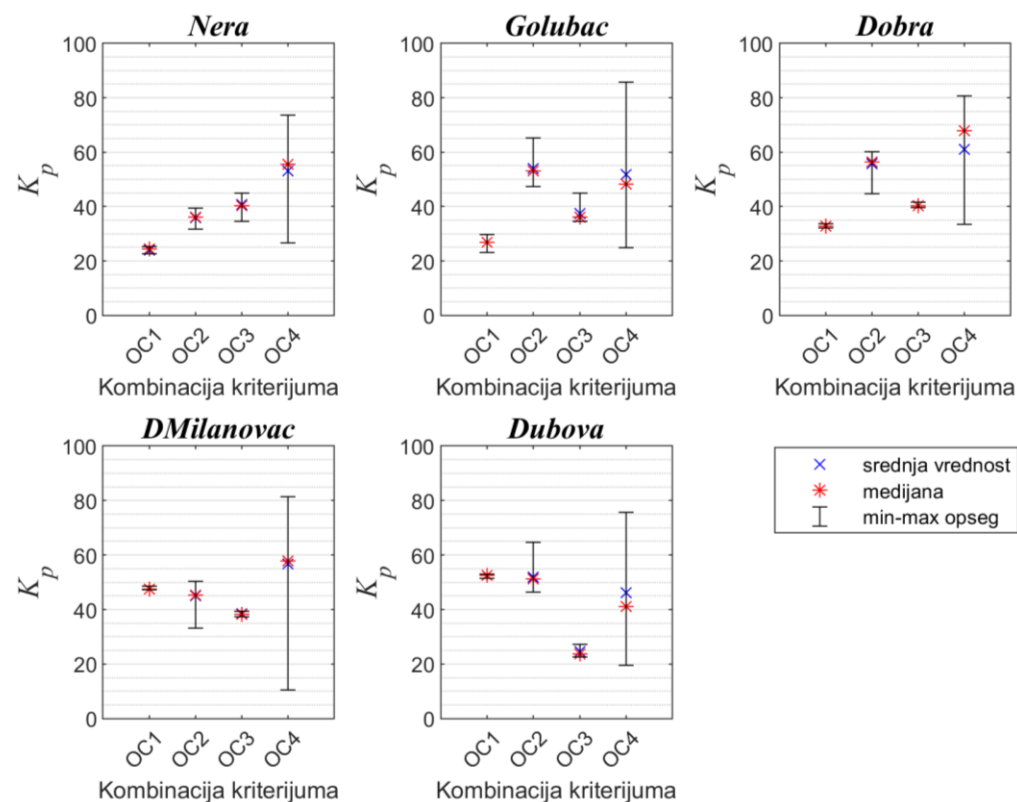
- Optimalno podešavanje kontrolera
- Kada je neophodno fino podešavanje parametara
- Podešavaju se samo K_p i K_i parametri svih kontrolera u modelu simultano
- Inicijalne vrednosti za sve kontrolere će biti $K_p=10$ i $K_i=10$
- Ispitivanje sa veličinom populacije u NSGA-II od 30, 50 i 100 jedinki



- * veličina populacije=30
- veličina populacije=50
- × veličina populacije=100

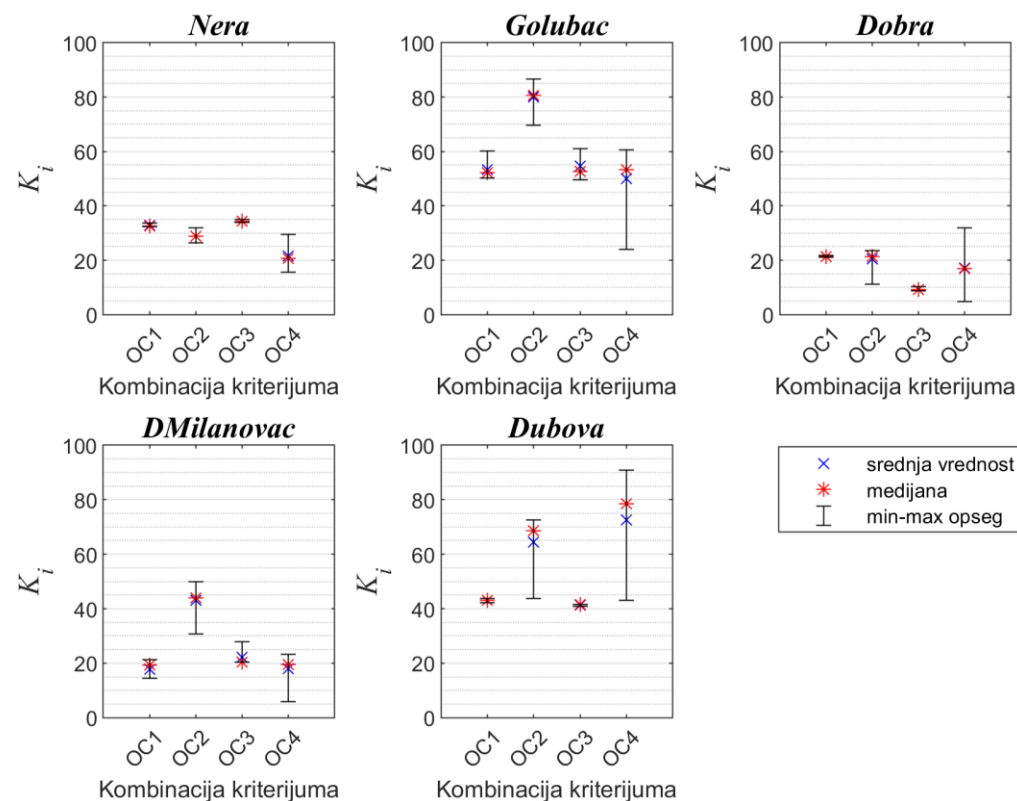
- Optimalno podešavanje kontrolera
- Kada je neophodno fino podešavanje parametara
- Podešavaju se samo K_p i K_i parametri svih kontrolera u modelu simultano
- Inicijalne vrednosti za sve kontrolere će biti $K_p=10$ i $K_i=10$
- Ispitivanje sa veličinom populacije u NSGA-II od 30, 50 i 100 jedinki

Kombinacija kriterijskih funkcija (objectives combination)	Kriterijumska funkcija 1	Kriterijumska funkcija 2
OC1	RMSE	maxError
OC2	RMSE	CorrVol
OC3	AssimTRatio	maxError
OC4	AssimTRatio	CorrVol



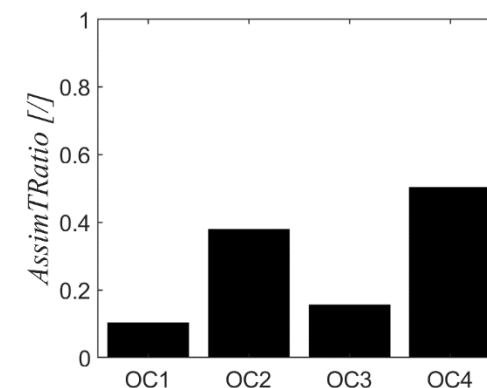
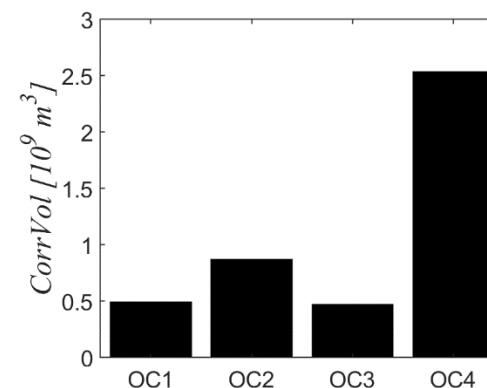
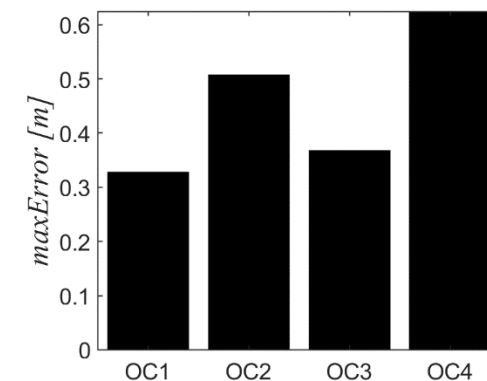
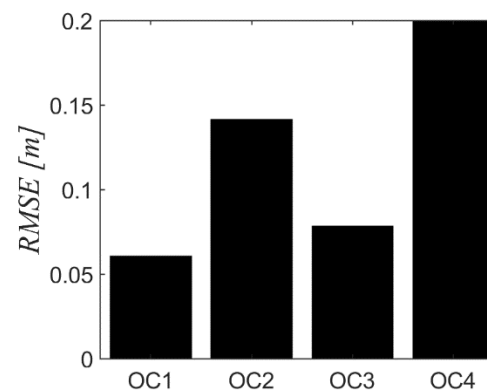
- Optimalno podešavanje kontrolera
- Kada je neophodno fino podešavanje parametara
- Podešavaju se samo K_p i K_i parametri svih kontrolera u modelu simultano
- Inicijalne vrednosti za sve kontrolere će biti $K_p=10$ i $K_i=10$
- Ispitivanje sa veličinom populacije u NSGA-II od 30, 50 i 100 jedinki

Kombinacija kriterijskih funkcija (objectives combination)	Kriterijumska funkcija 1	Kriterijumska funkcija 2
OC1	RMSE	maxError
OC2	RMSE	CorrVol
OC3	AssimTRatio	maxError
OC4	AssimTRatio	CorrVol



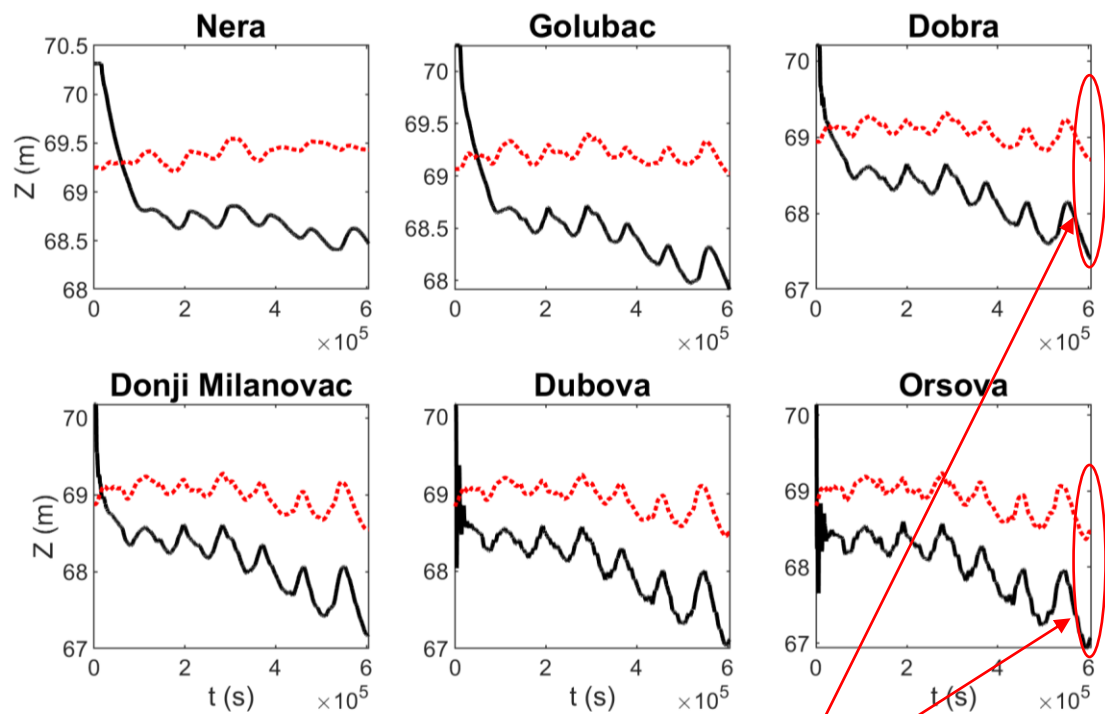
- Optimalno podešavanje kontrolera
- Kada je neophodno fino podešavanje parametara
- Podešavaju se samo K_p i K_i parametri svih kontrolera u modelu simultano
- Inicijalne vrednosti za sve kontrolere će biti $K_p=10$ i $K_i=10$
- Ispitivanje sa veličinom populacije u NSGA-II od 30, 50 i 100 jedinki
- Kada se koriste kombinacije kriterijuma OC1 i OC3 dobijaju se značajno bolji rezultati
- **CorrVol** indikator nije dobar kao kriterijumska funkcija

Kombinacija kriterijumskih funkcija (objectives combination)	Kriterijumska funkcija 1	Kriterijumska funkcija 2
OC1	RMSE	maxError
OC2	RMSE	CorrVol
OC3	AssimTRatio	maxError
OC4	AssimTRatio	CorrVol



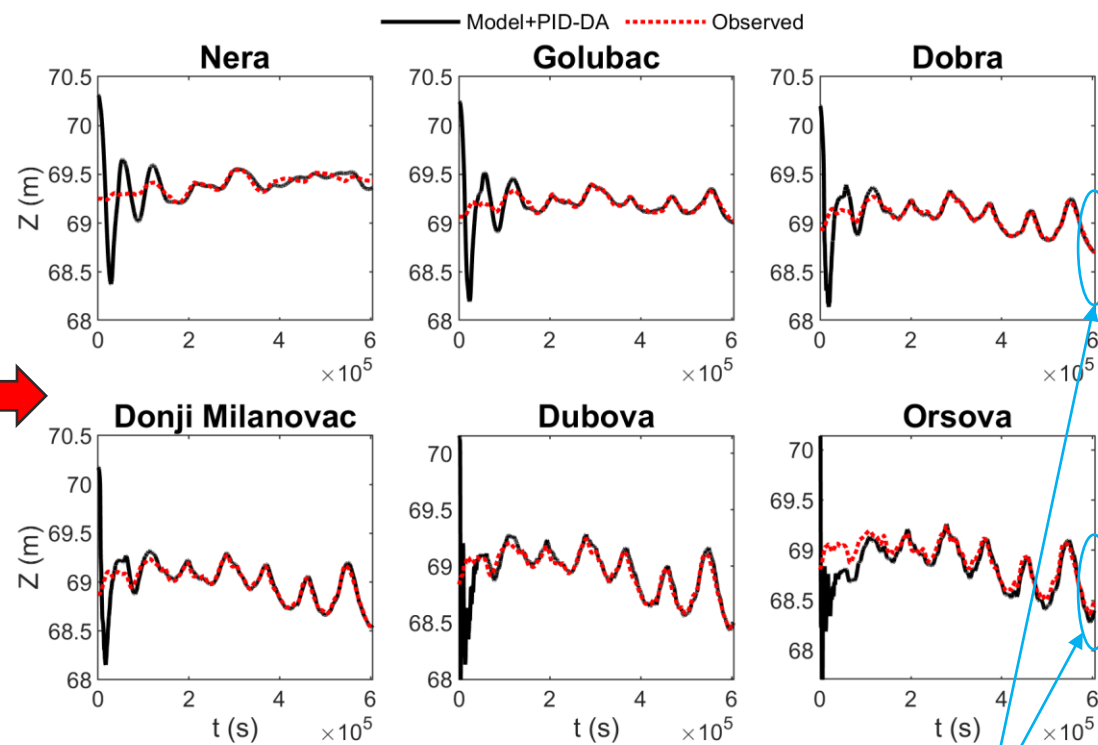
▪ Značaj primene dobro podešenih kontrolera

Nivoi bez asimilacije



Loši početni uslovi za dalju prognozu

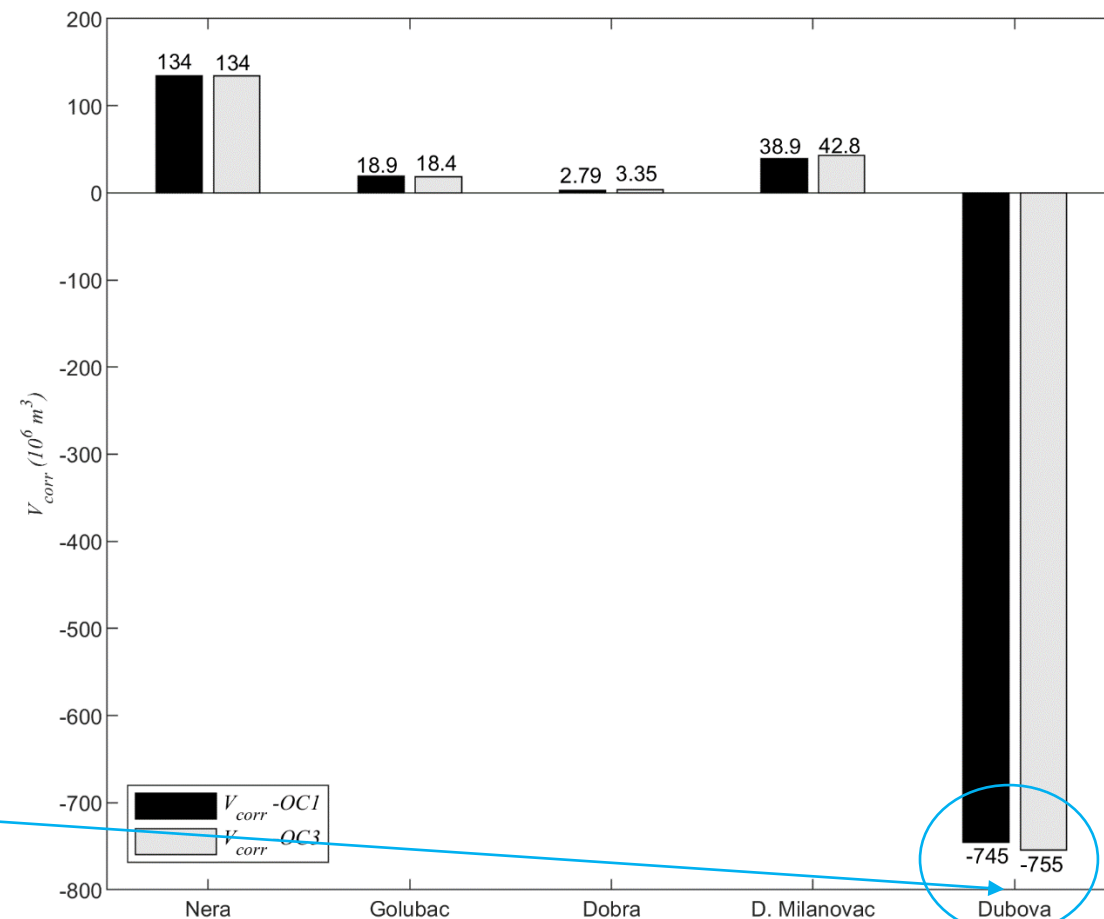
Nivoi nakon asimilacije



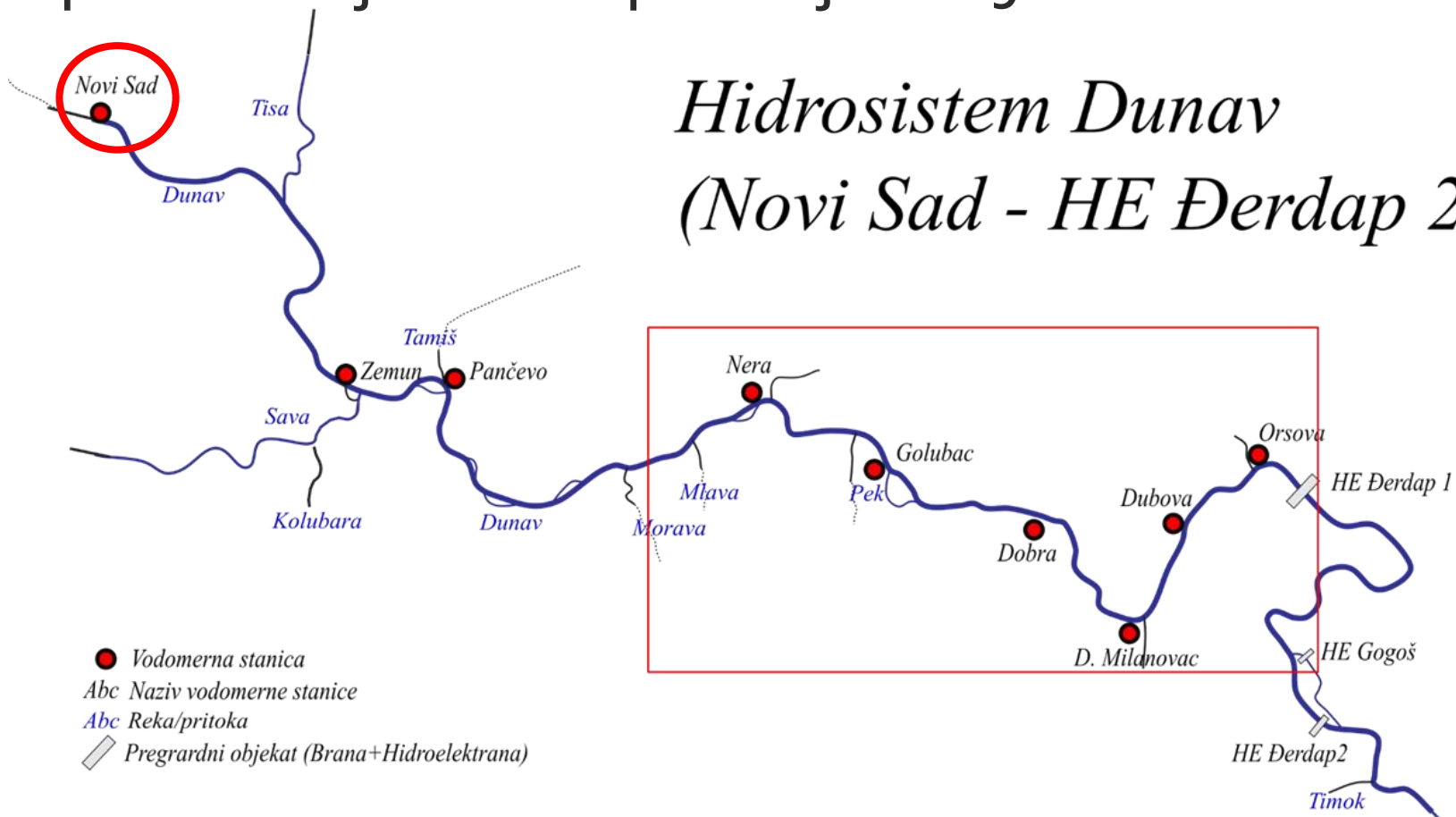
Poboljšani početni uslovi za dalju prognozu

- Optimalno podešavanje kontrolera
- Kada je neophodno fino podešavanje parametara
- Podešavaju se samo K_p i K_i parametri svih kontrolera u modelu simultano
- Inicijalne vrednosti za sve kontrolere će biti $K_p=10$ i $K_i=10$
- Ispitivanje sa veličinom populacije u NSGA-II od 30, 50 i 100 jedinki
- Kada se koriste kombinacije kriterijuma OC1 i OC3 dobijaju se značajno bolji rezultati
- **CorrVol indikator nije dobar kao kriterijumska funkcija**

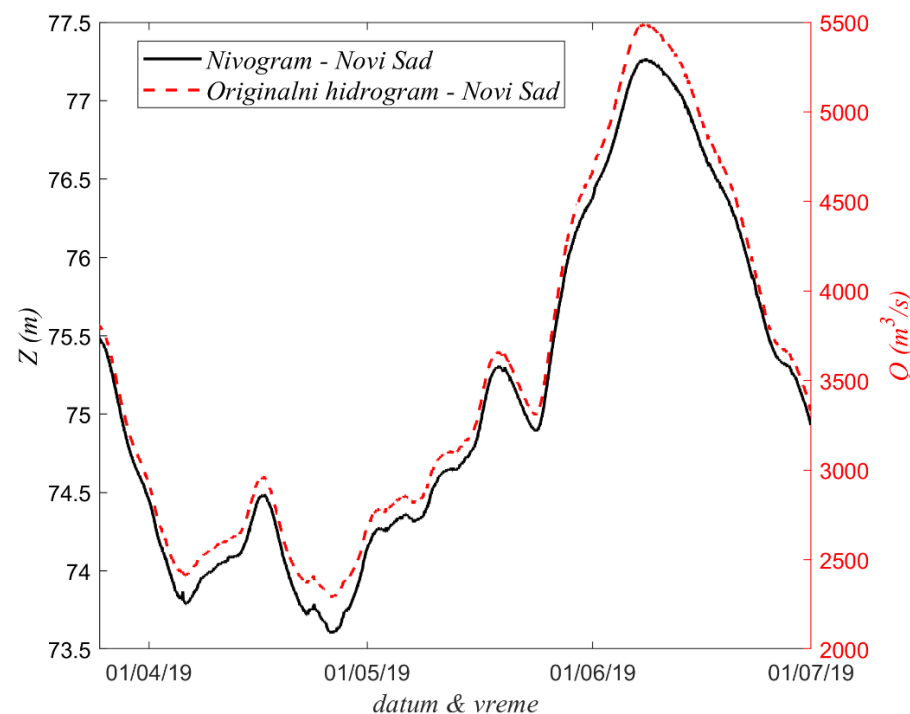
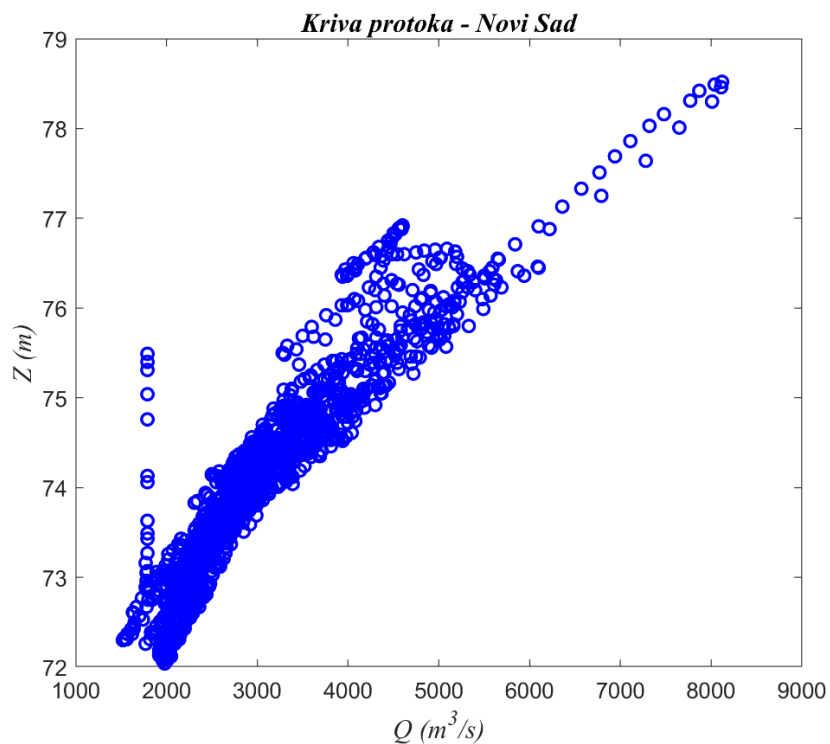
- Optimalno podešavanje kontrolera
- Kada je neophodno fino podešavanje parametara
- Podešavaju se samo K_p i K_i parametri svih kontrolera u modelu simultano
- Inicijalne vrednosti za sve kontrolere će biti $K_p=10$ i $K_i=10$
- Ispitivanje sa veličinom populacije u NSGA-II od 30, 50 i 100 jedinki
- Kada se koriste kombinacije kriterijuma OC1 i OC3 dobijaju se značajno bolji rezultati
- **CorrVol indikator nije dobar kao kriterijumska funkcija**
- **Može poslužiti za lociranje dominantnog izvora nepouzdanosti u modelu**



- Primena na realnom test primeru – rekonstrukcija hidrograma i procena krive protoka
- Vodomerna stanica Novi Sad
- Stvarni podaci - period od kraja marta do početka jula 2019.

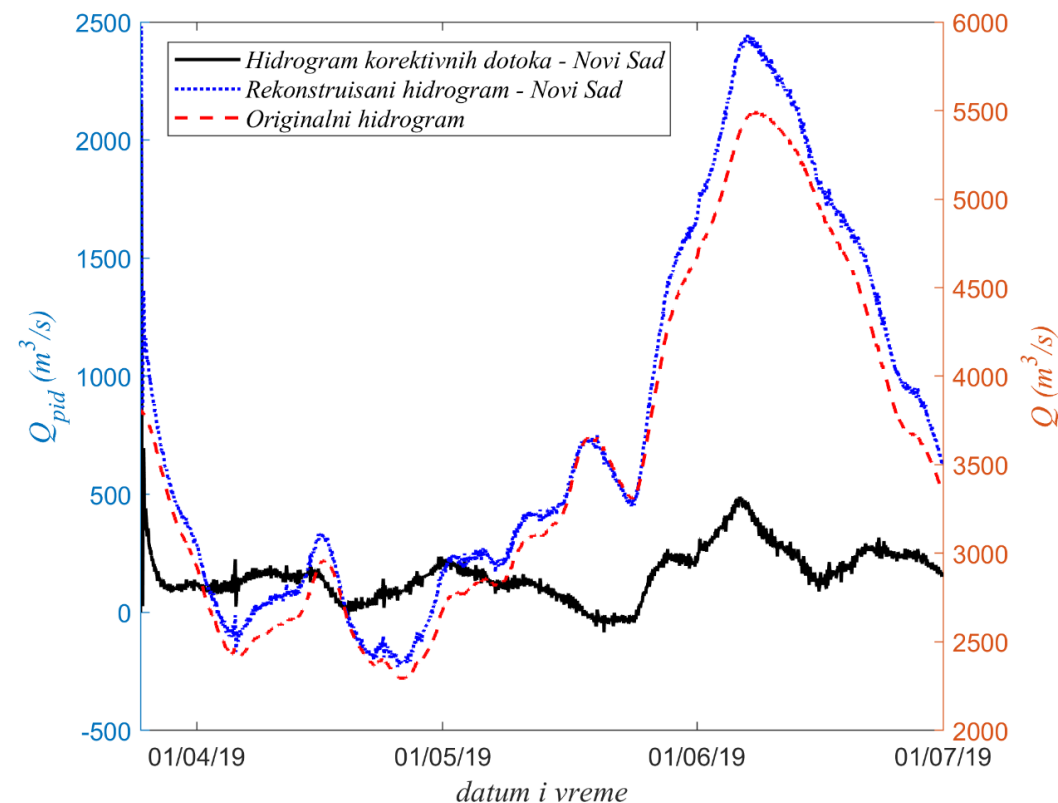
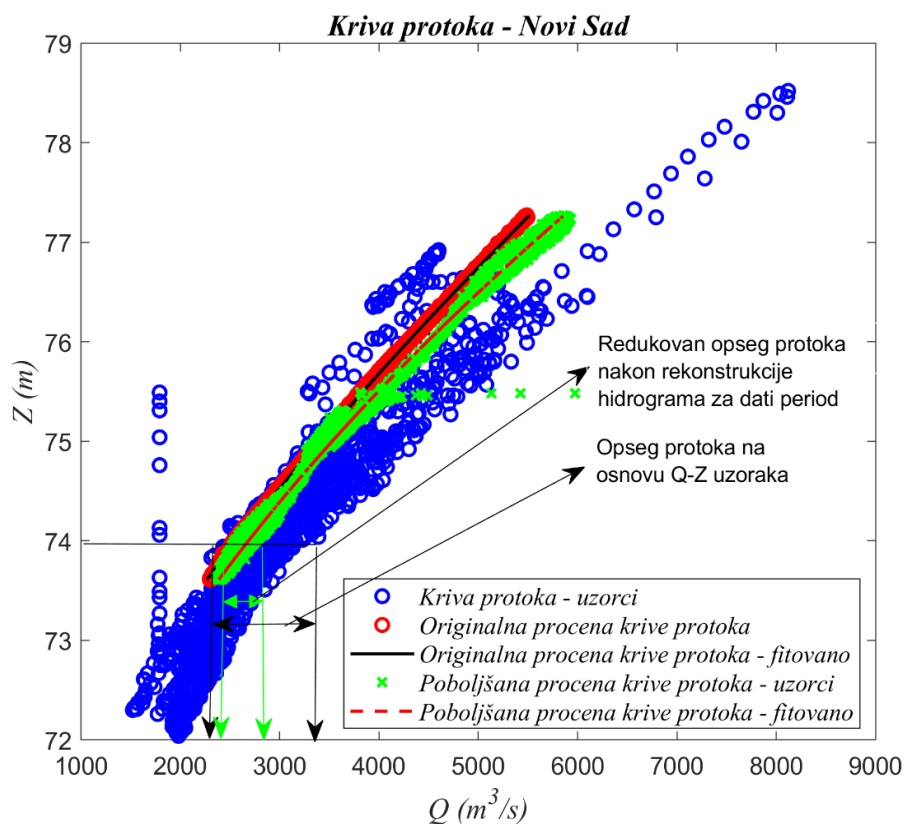


- Primena na realnom test primeru – rekonstrukcija hidrograma i procena krive protoka
- Vodomerica stanica Novi Sad
- Stvarni podaci - period od kraja marta do početka jula 2019.



- Rekonstrukcija hidrograma i procena krive protoka
- Implementiran PID kontroler na vodomenoj stanici Novi Sad
- Ručno podešen ($K_p=10$, $K_i=10$)

Preliminarni rezultati



- Analiza sprovedena u istraživanju dala je sledeće odgovore:

- PID kontroleri se jednostavno mogu implementirati kao asimilaciona metoda za linijske modele otvorenih tokova
- Značajno ubrzanje proračuna u odnosu na standardne metode
- Ne narušava se kvalitet asimilacije

Odgovor na zad. 1

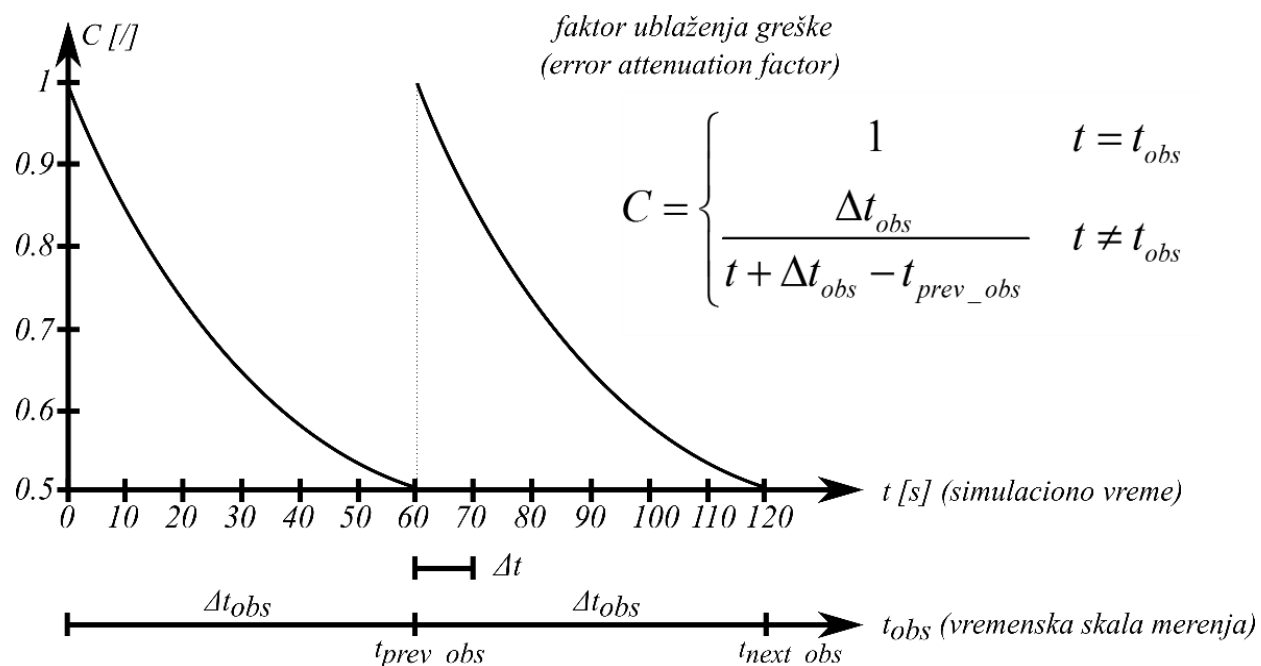
- Za procenu optimalne konfiguracije → fazni, multimetrički postupak sprovesti u potpunosti
- Procena inicijalnih vrednosti parametara kontrolera

Odgovor na zad. 2

- Kada je neophodno fino podešavanje parametara → višekriterijumska optimizacija *NSGA-II*
- Dovoljno koristiti kombinacije od po dve kriterijumske funkcije
- Indikator *CorrVol* ne koristiti kao kriterijumsku funkciju

Odgovor na zad. 3

- Implementacija merne neodređenosti u PID kontroler pomoću validacije podataka

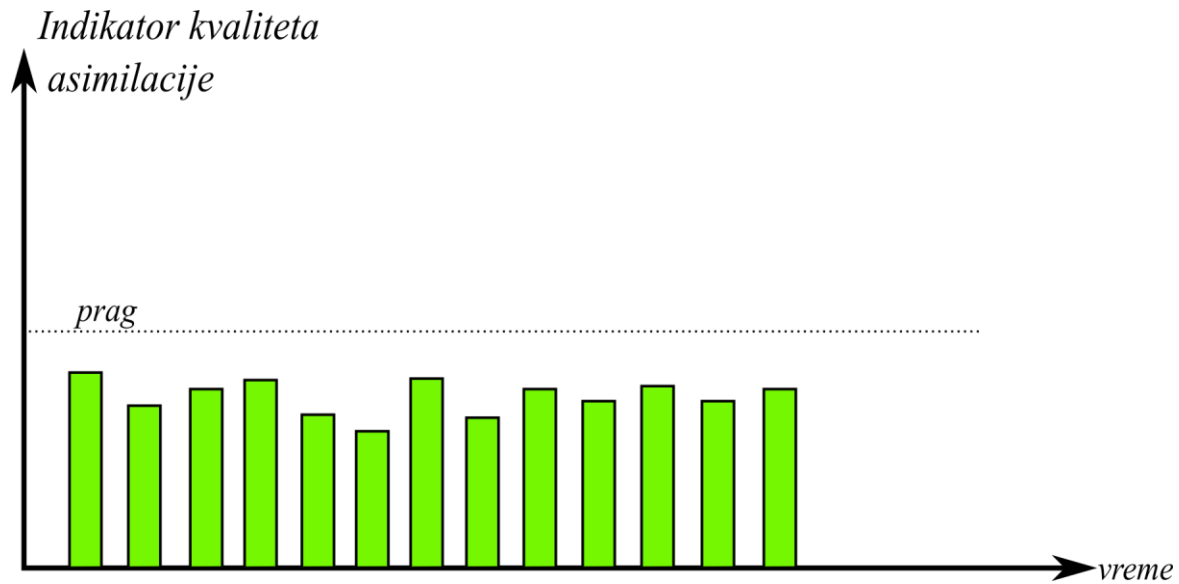


$$e(t) = [Z_{obs}^*(t) - Z_{model}(t)] \cdot C \cdot C_{obs}$$

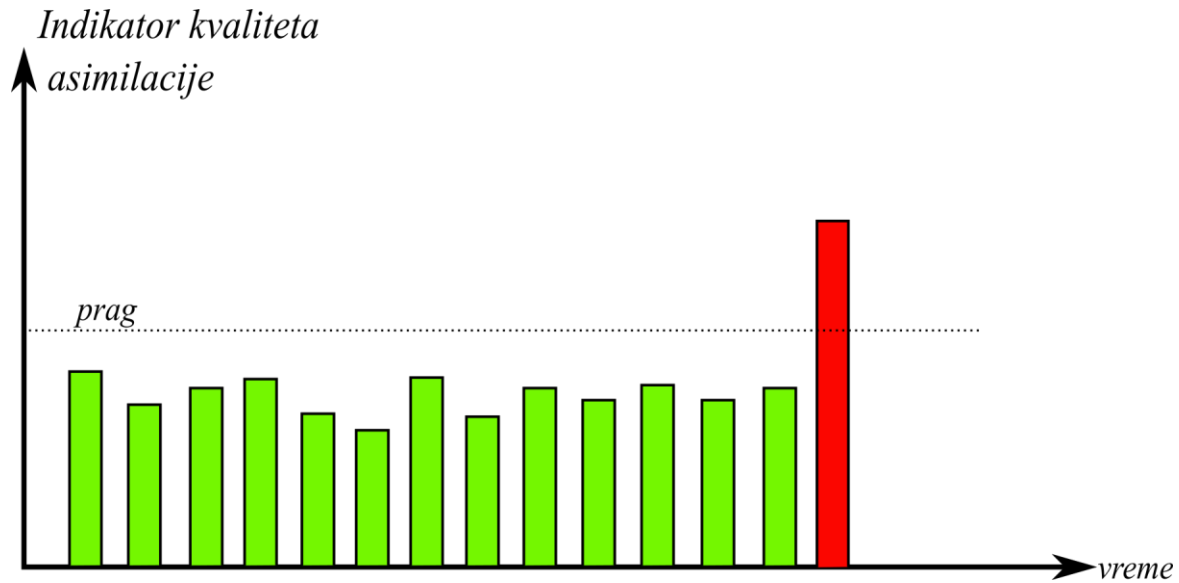
Ocena kvaliteta izmerenog podatka 0-1 (0 nepouzdan podatak, 1 – potpuno pouzdan podatak)

Neophodan efikasan algoritam za ocenu kvaliteta merenih podataka

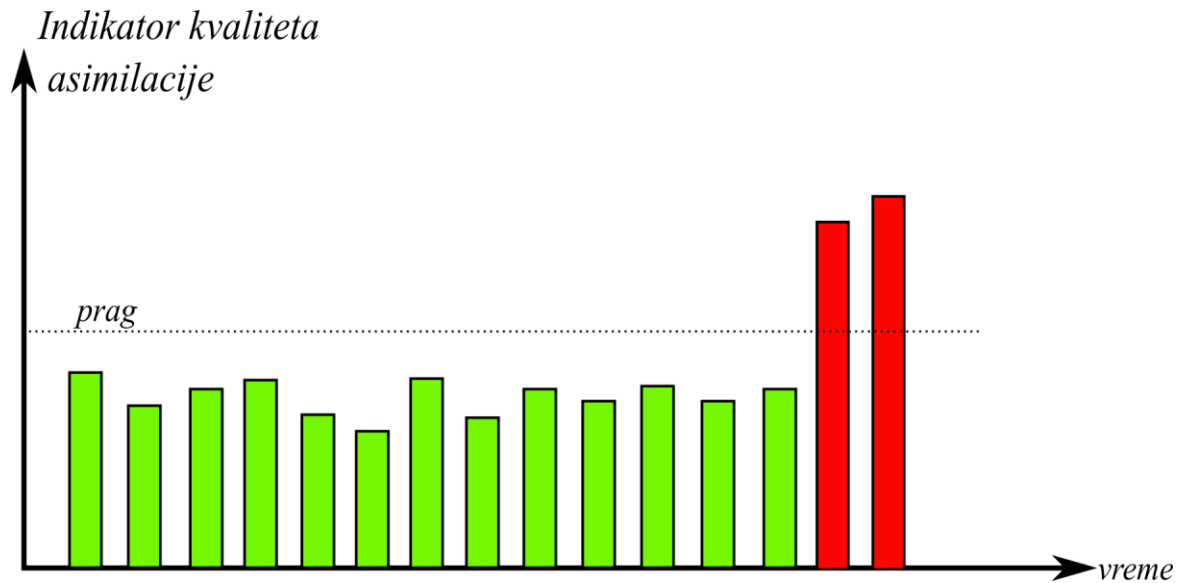
- **Optimalne vrednosti parametara kontrolera važe samo za razmatrani period** → za kontinualnu upotrebu neophodan efikasan algoritam za periodičnu popravku parametara (AI, Fuzzy)



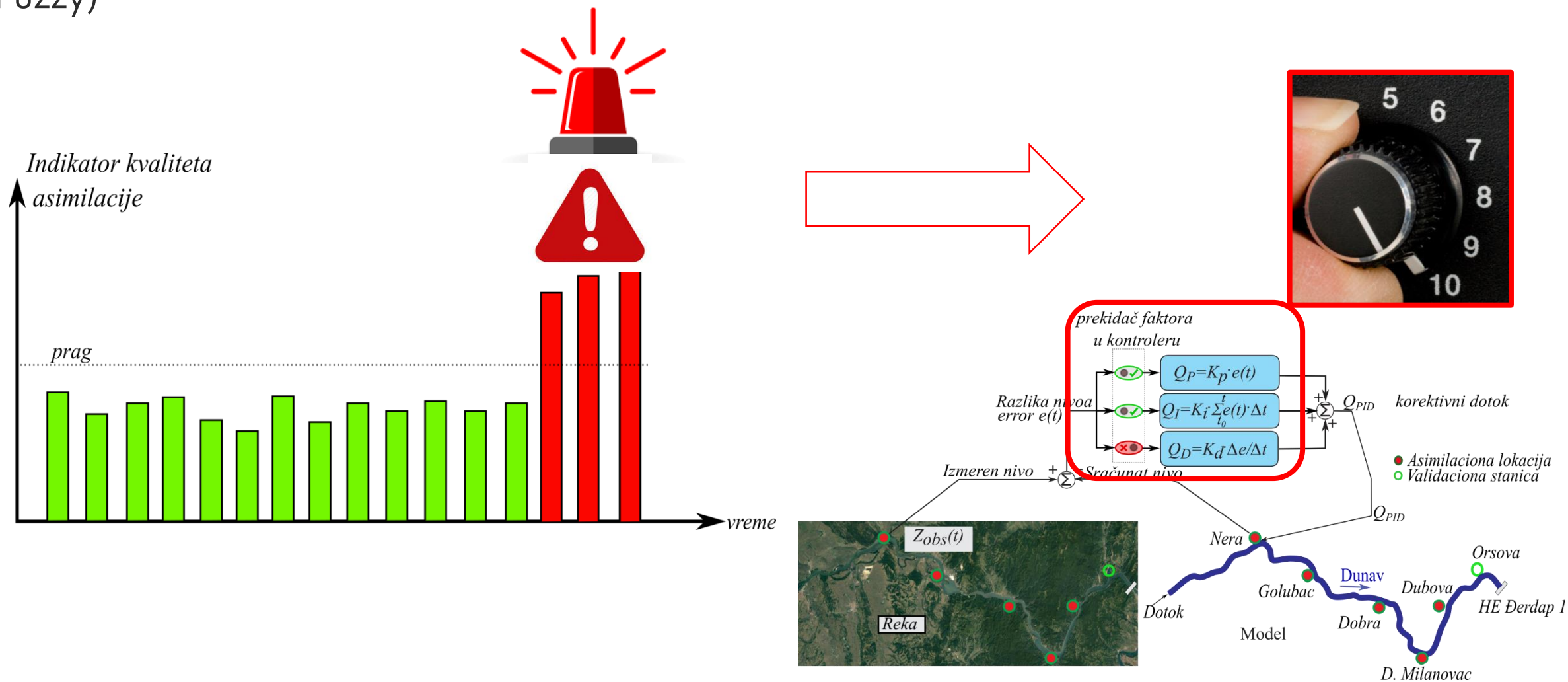
- **Optimalne vrednosti parametara kontrolera važe samo za razmatrani period** → za kontinualnu upotrebu neophodan efikasan algoritam za periodičnu popravku parametara (AI, Fuzzy)



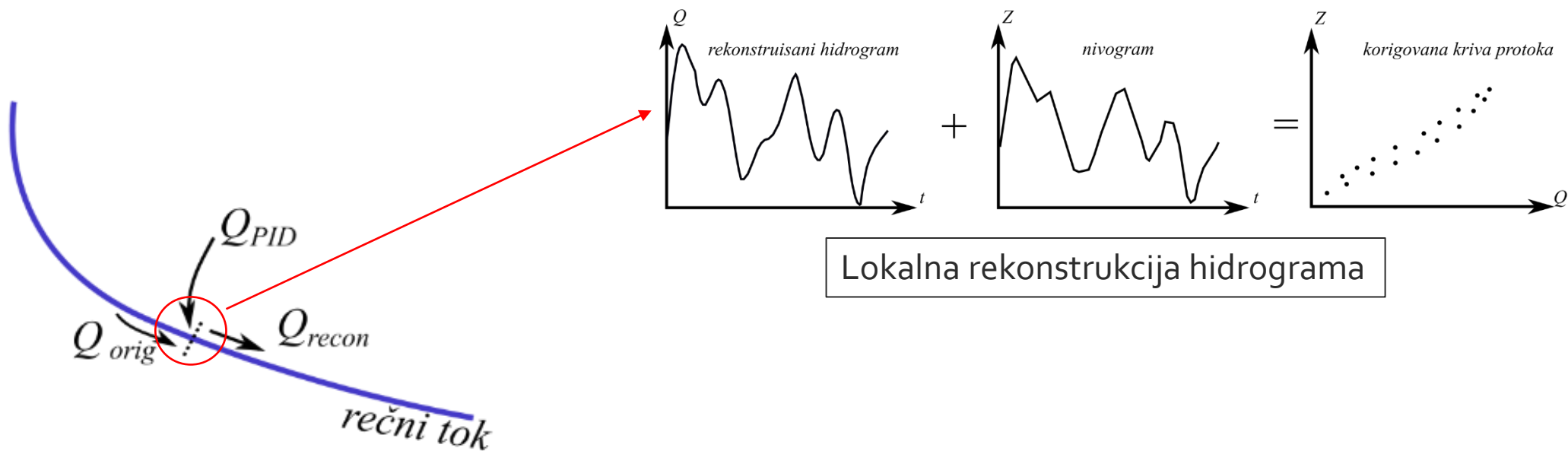
- **Optimalne vrednosti parametara kontrolera važe samo za razmatrani period** → za kontinualnu upotrebu neophodan efikasan algoritam za periodičnu popravku parametara (AI, Fuzzy)



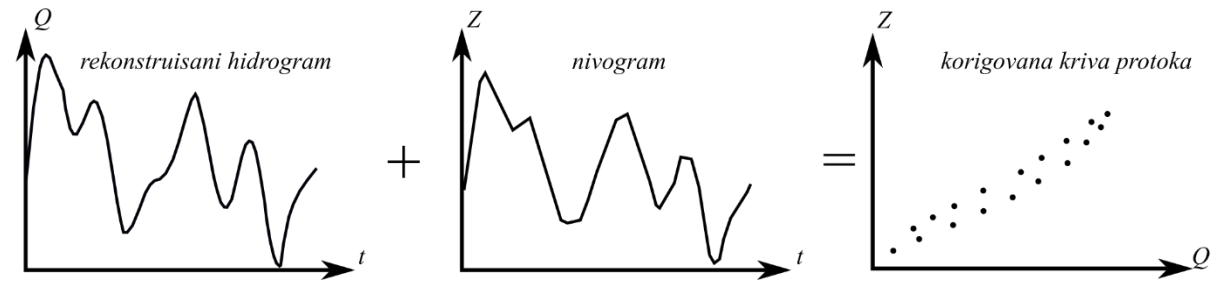
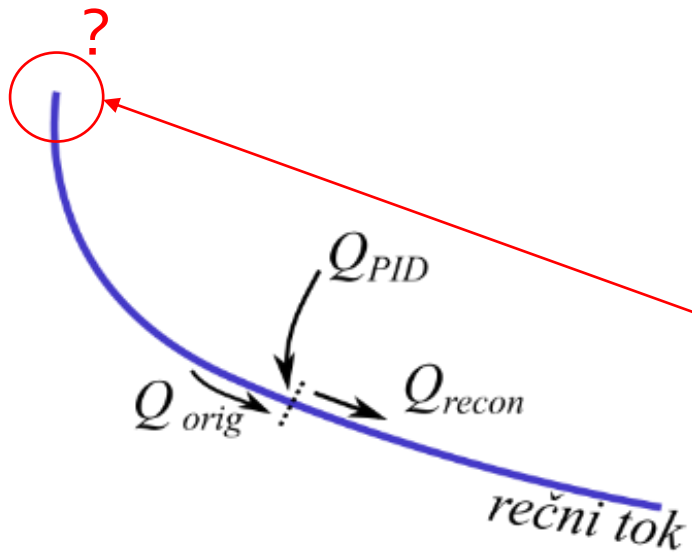
- Optimalne vrednosti parametara kontrolera važe samo za razmatrani period → za kontinualnu upotrebu neophodan efikasan algoritam za periodičnu popravku parametara (AI, Fuzzy)



- Dalja analiza mogućnosti rekonstrukcije hidrograma i procene krivih protoka



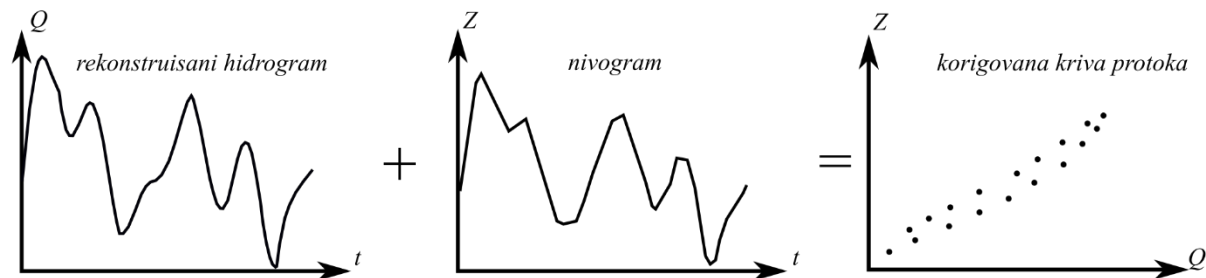
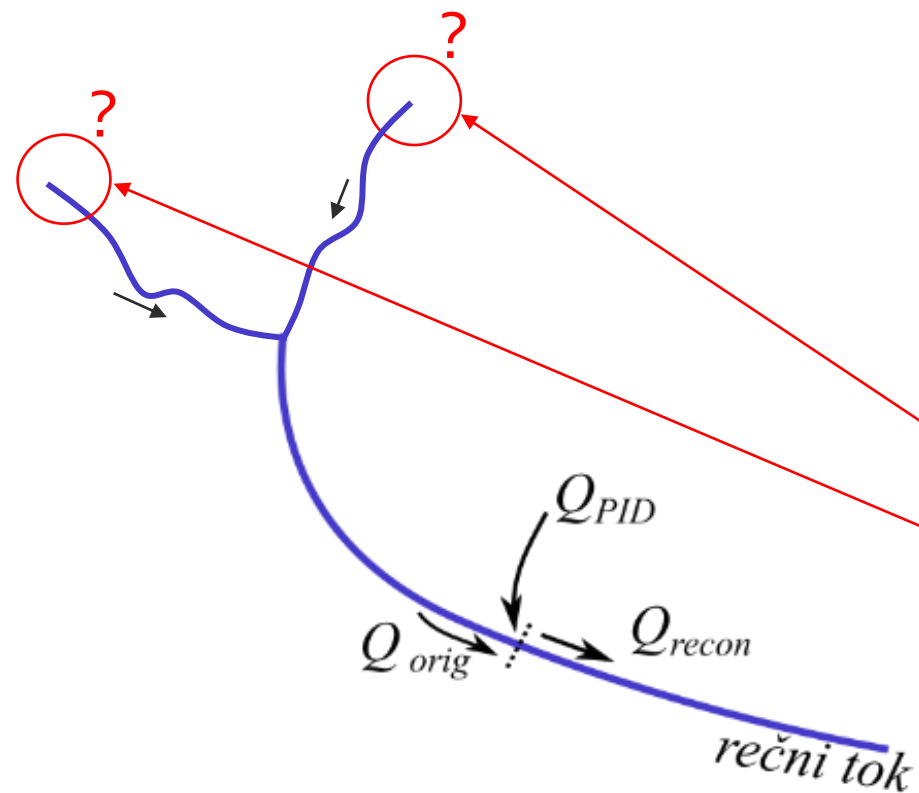
- Dalja analiza mogućnosti rekonstrukcije hidrograma i procene krivih protoka



Lokalna rekonstrukcija hidrograma

Kako rekonstruisati hidrogram
uzvodno od merne stanice?

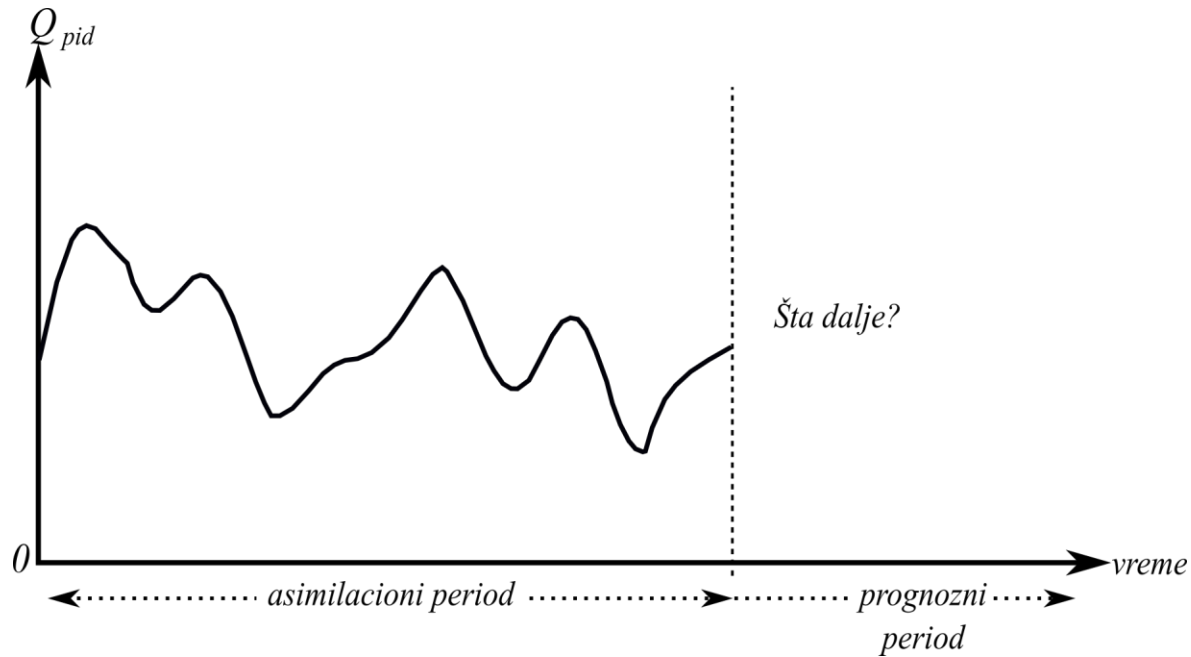
- Dalja analiza mogućnosti rekonstrukcije hidrograma i procene krivih protoka



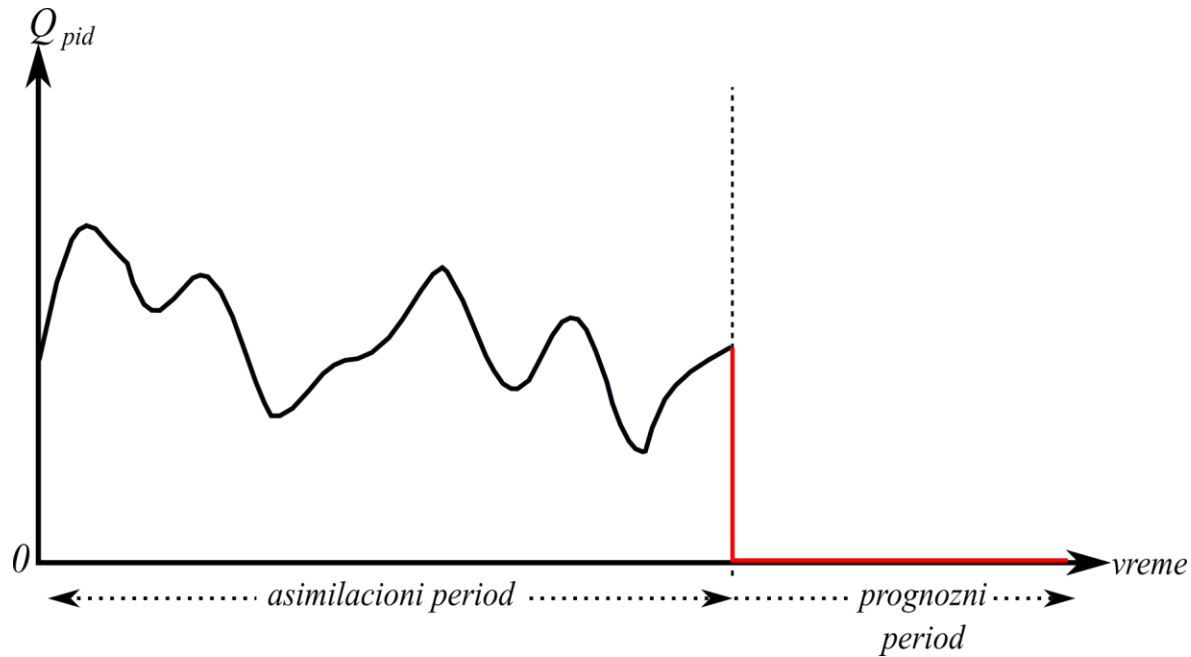
Lokalna rekonstrukcija hidrograma

Kako rekonstruisati hidrogram na
rečnoj mreži?

- Prikazan način rada PID kontrolera u asimilacionom periodu → neophodno istražiti način rada u prognoznom periodu

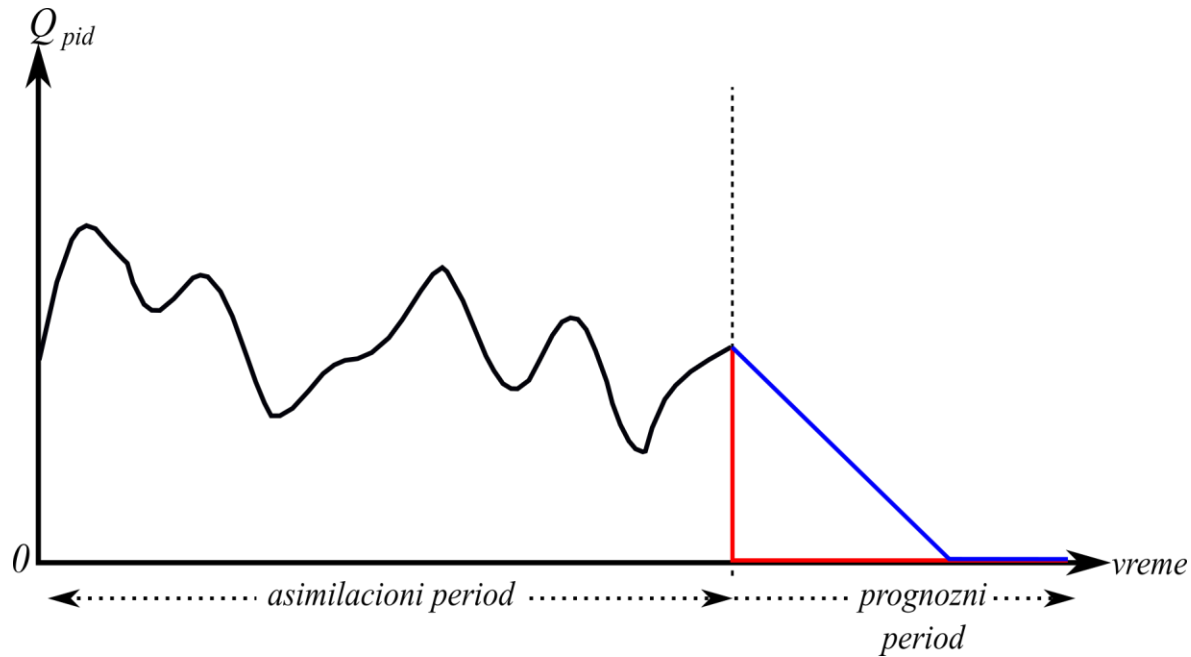


- Prikazan način rada PID kontrolera u asimilacionom periodu → neophodno istražiti način rada u prognoznom periodu



Naglo gašenje?

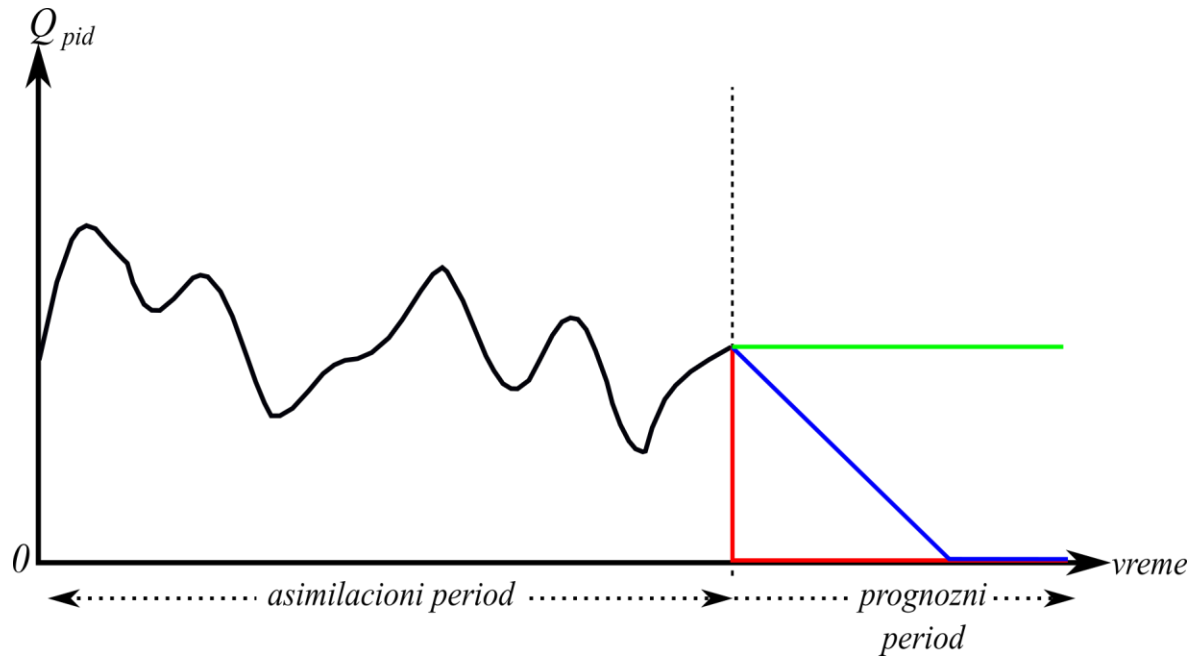
- Prikazan način rada PID kontrolera u asimilacionom periodu → neophodno istražiti način rada u prognoznom periodu



Naglo gašenje?

Postepeno gašenje?

- Prikazan način rada PID kontrolera u asimilacionom periodu → neophodno istražiti način rada u prognoznom periodu

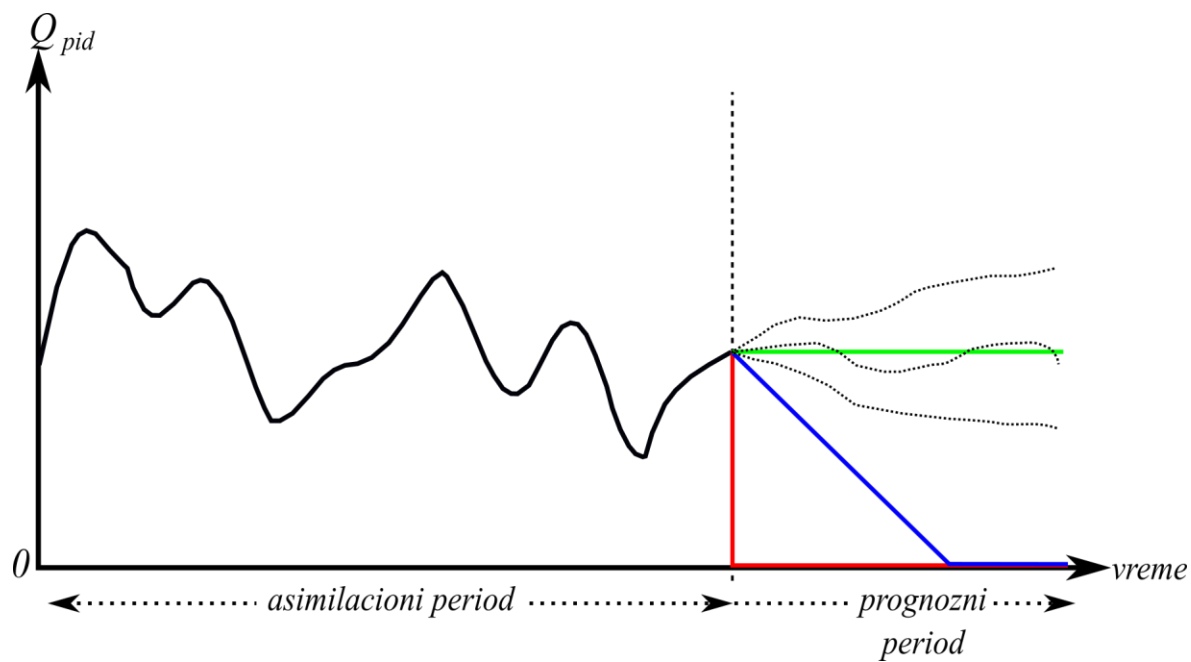


Naglo gašenje?

Postepeno gašenje?

Konstantan rad?

- Prikazan način rada PID kontrolera u asimilacionom periodu → neophodno istražiti način rada u prognoznom periodu



Naglo gašenje?

Postepeno gašenje?

Konstantan rad?

Rad prema nekom složenijem pravilu?

Mogućnost „upošljavanja“ AI!



Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

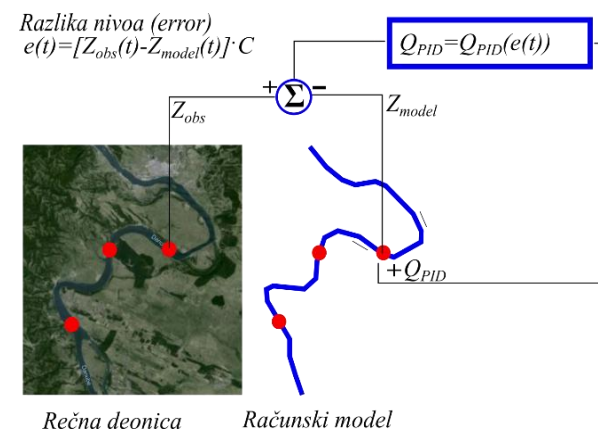


Metodologija za brzu asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova

-Doktorska disertacija-

Kandidat: Miloš R. Milašinović

Mentor: prof. dr Dušan Prodanović



Beograd, 19.02.2021.

Komisija za odbranu:

prof. dr Dušan Prodanović

prof. dr Dragan Savić

vprof. dr Miloš Stanić

doc. dr Budo Zindović

dr Nikola Milivojević