

UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Miloš R. Milašinović

Metodologija za brzu asimilaciju podataka u
modelima otvorenih tokova

doktorska disertacija

Beograd, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Miloš R. Milašinović

Fast data assimilation methodology for open
channel flow models

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020.

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

prof. dr Dušan Prodanović, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Članovi komisije:

dr Dušan Prodanović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

dr Dragan Savić, redovni profesor, Univeristy of Exeter i KWR Water Research Institute

dr Miloš Stanić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

dr Budo Zindović, docent, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

dr Nikola Milivojević, naučni saradnik, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi

Datum odbrane: _____

Zahvalnica

Prvenstveno se zahvaljujem mentoru prof. dr Dušanu Prodanoviću za posvećenost, podršku i usmeravanje tokom istraživanja i pisanja disertacije. Takođe, zahvaljujem se mentoru na podršci, usmeravanju ali i davanju slobode tokom čitavih doktorskih studija. Njegovi saveti, iskustvo i insistiranje na praktičnoj primeni istraživanja u velikoj meri su uticali na moje profilisanje u oblasti naučno-istraživačkog rada.

Zahvaljujem se prof. Draganu Saviću na korisnim sugestijama na početku rada na disertaciji, tokom pisanja disertacije ali i na radionicama za pisanje naučnih radova na kojima je nesebično delio svoje iskustvo sa mladim istraživačima. V. prof. Milošu Staniću se zahvaljujem na spremnosti za saradnju i na praktičnim savetima za rešavanje problema na koje sam nailazio tokom rada na disertaciji ali i tokom ostatka doktorskih studija. Doc. Budi Zindoviću sam zahvalan na komentarima i sugestijama tokom pisanja disertacije. Takođe, moram da izrazim neizmernu zahvalnost na angažovanju tokom zajedničkih projekata čiji je cilj bila praktična primena istraživanja iz ove disertacije. Dr Nikoli Milivojeviću se zahvaljujem na korisnim savetima i na saradnji tokom projekata koji su za cilj imali implementaciju istraživanja iz disertacije na realnim vodoprivrednim sistemima.

Zahvaljujem se svim kolegicama i kolegama sa Katedre i Instituta za Hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo za razne vrste pomoći i na stvaranju osećaja porodične atmosfere na poslu što je omogućilo lakši pristup svim obavezama. Zahvaljujem se Željku Vasiliću i Robertu Ljubičiću, sa kojima delim radni prostor, na bezbroj „brainstorming-a“ koji su mi pomogli pri istraživanjima. Posebno bih se zahvalio Anji Ranđelović na „zaraznom“ entuzijazmu za istraživanja, savetima, drugarskom a opet profesionalnom odnosu i bezrezervnom zalaganju za nabavku istraživačkih sredstava sa kojima je ovo istraživanje značajno lakše išlo.

Na kraju, ogromnu zahvalnost dugujem svojoj porodici. Svojim roditeljima Snežani i Radoslavu i sestri Mariji večno ću biti zahvalan na odricanju i bezrezervnoj podršci tokom celog svog školovanja. Sve ovo je nezamislivo bez moje supruge Vesne koja mi je oslonac od ranih studentskih dana i bez koje sve ne bi imalo istu draž.

Naslov doktorske disertacije: Metodologija za brzu asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova

Sažetak: 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. Kontinualna 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. Ova usaglašavanja se sprovode za već prikupljene podatke, u vremenskom periodu neposredno pre trenutka od koga se želi izvršiti prognoza. Taj period usaglašavanja naziva se asimilacioni period. Na kraju asimilacionog perioda model bolje oslikava trenutno stanje na celom domenu i može se iskoristiti za prognozu.

U ovom istraživanju prikazana je nova asimilaciona metoda za modele otvorenih tokova korišćenjem indirektnog, fizički zasnovanog pristupa za usaglašavanje nivoa pomoću korektivnih dotoka. Korektivni dotoci se računaju koristeći teoriju Proporcionalno-Integrativno-Derivativnih (PID) kontrolera iz oblasti teorije upravljanja (eng. *control theory*). Metoda je razvijena u cilju primene jednostavnijeg i bržeg postupka asimilacije podataka u realnim sistemima otvorenih tokova. Nova asimilaciona metoda poredi se sa standardnom metodom asimilacije podataka (Ensemble Kalman Filter - EnKF) koja se najčešće koristi u sličnim istraživanjima. Poređenjem na hipotetičkim test primerima pokazano je da se primenom nove asimilacione metode dolazi do značajnog ubrzanja proračuna bez smanjenja kvaliteta asimilacije podataka. Primena ove metode na realne sisteme zahteva rešavanje problema određivanja optimalne konfiguracije (forme, strukture) i optimalnog podešavanja parametara PID kontrolera. Na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdap sprovedeno je detaljno ispitivanje optimalne konfiguracije na osnovu definisanih indikatora kvaliteta asimilacije podataka. Utvrđeno je da jednostavnija konfiguracija kontrolera, sastavljena od proporcionalnog i integrativnog faktora (PI kontroler) daje najbolje rezultate asimilacije. Optimalno podešavanje parametara kontrolera rešeno je višekriterijumskom optimizacijom pomoću genetskog algoritma sa nedominantnim sortiranjem (eng. Nondominated Sorting Genetic Algorithm II – NSGA-II). Utvrđeno je da se podešavanje kontrolera višekriterijumskom optimizacijom može uraditi koristeći neku od kombinacija sa 2 suprotstavljene kriterijumske funkcije. Dodatna ispitivanja pokazala su potencijal ove asimilacione metode za rekonstrukciju stvarnih hidrograma na osnovu zabeleženih nivograma, kao alata za rekonstrukciju poplavnih talasa i smanjivanje neodređenosti krivih protoka.

Ključne reči: Prognoze vođene modelima, Asimilacija podataka, linijski (1D) modeli otvorenih tokova, PID kontroleri, rekonstrukcija hidrograma

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uže naučne oblasti: Mehanika nestišljivih fluida i hidraulika i Hidroinformatika

UDK:

Doctoral thesis title: Fast data assimilation methodology for open channel flow models

Abstract: Water resources management (water supply, flood prevention, hydropower) requires many forecasts of the water available, as a decision-support tool. These forecasts are provided using physically based numerical models (model-driven forecasting) and can produce results of unsatisfying accuracy due to numerous uncertainties. When 1D open channel flow models are used, some of the dominating uncertainty sources are unreliable boundary conditions (inflow hydrograph, rating curves) and initial conditions. Continuous observations of the system state can be considered as a reliable representation of the true state but limited to the small domain. Hence, data assimilation is used for coupling the measurements and models. The goal of data assimilation is to reduce the difference between measured and modelled data (e.g. water levels) by continuous model results update (water level update). This update is conducted for the collected data in the period before the moment used for the start of the forecast, called assimilation period (assimilation window). Water level update provides improved initial conditions at the end of this period.

This research presents a novel data assimilation method based on the indirect, physically based approach by adding/subtracting correction flows from the model. These correction flows are calculated using the control theory, specifically Proportional-Integrative-Derivative (PID) controller theory. The aim of this method is to propose a simplified and faster assimilation procedure without sacrificing the accuracy. Proposed data assimilation method is compared to the widely used Ensemble Kalman Filter (EnKF). Benchmark test on hypothetical test cases shows substantial speed up when PID controllers are used as data assimilation method, without significant sacrifice of the accuracy. Further application of this method on real world problems required thorough investigation on optimal controllers' configuration and optimal tuning of the controllers. Phase analysis is conducted to determine optimal controllers' configuration, based on the data assimilation quality indicators. Analysis shows that proportional-integrative configuration (PI controller) of the controllers should be used only, without derivative gain. Research shows the potential of using multicriteria optimization for optimal tuning of the controllers' parameters, using Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) for the minimization of the criterias. Analysis also shows that multicriteria used for optimal tuning of the controllers should not consider more than two conflicting criterias. Further investigation shows the potential of using the novel data assimilation method for true flow hydrograph reconstruction. This algorithm could be used as a tool for inverse flood routing and uncertainty reduction of the existing rating curves.

Keywords: Model-driven forecasting, Data Assimilation, 1D open channel flow modelling, Proportional-Integrative-Derivative controllers, flow hydrograph reconstruction

Research area: Civil Engineering

Specific research area: Fluid mechanics and hydraulics, Hydroinformatics

UDC:

Radovi koji su proistekli iz ove disertacije

Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21a):

Milašinović M., Prodanović D., Zindović B., Rosić N., Milivojević N. (2020): Fast data assimilation for open channel hydrodynamic models using control theory approach, Journal of Hydrology, 584, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124661 (IF: 4.5)

Radovi na međunarodnim skupovima (M33):

Milašinović M., Zindović B., Rosić N., Prodanović D. (2019): PID controllers as data assimilation tool for 1D hydrodynamic models of different complexity, 5th International conference SimHydro 2019, Sophia Antipolis, Nice, France

Milašinović M., Prodanović D., Zindović B., Rosić N., Milivojević N. (2020): Control theory-based update of water levels in 1D hydrodynamic models, 10th International conference on Fluvial hydraulics – RiverFlow 2020, Delft, Netherlands

Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja (M51):

Milašinović M., Zindović B., Rosić N., Prodanović D. (2018): Analiza uticaja kompleksnosti 1D modela tečenja na postupak asimilacije podataka zasnovane na primeni PID kontrolera – preliminarni rezultati, VODOPRIVREDA 0350-0519, Vol. 50 (2018), No. 294-296, p. 245-254

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Pregled literature.....	5
2.1	Prognoze vođene modelima u oblasti upravljanja vodnim resursima.....	5
2.2	Metode asimilacije podataka.....	6
2.3	Primena metoda asimilacije u hidrološko-hidrauličkim modelima.....	7
2.4	Metode za brzu asimilaciju podataka.....	9
2.5	Predmet istraživanja i osnovne hipoteze za istraživanje.....	11
3	Metodologija.....	13
3.1	Formulacija problema – opšti prikaz.....	13
3.2	1D model tečenja.....	17
3.3	Standardna metoda za asimilaciju podataka – Ensemble Kalman Filter.....	18
3.4	Metoda asimilacije podataka zasnovana na primeni PID kontrolera.....	23
3.5	Indikatori kvaliteta (performansi) asimilacije podataka.....	26
3.6	Analiza strukture PID kontrolera.....	30
3.7	Podešavanje kontrolera u hidrauličkom modelu.....	31
3.8	Rekonstrukcija hidrograma.....	34
4	Testiranje metodologije.....	37
4.1	Benchmark test primeri za poređenje standardne asimilacione metode i brze asimilacije pomoću PID kontrolera.....	37
4.2	Primena PID kontrolera na realnim primerima – HE Đerdap.....	39
4.3	Primer za rekonstrukciju hidrograma.....	44
5	Rezultati i diskusija.....	47
5.1	Rezultati benchmarking-a.....	47
5.2	Analiza strukture kontrolera.....	58
5.3	Podešavanje kontrolera.....	64
5.4	Rekonstrukcija hidrograma.....	78
6	Zaključci i preporuke.....	85
6.1	Pregled urađenog.....	85
6.2	Odgovori na istraživačke zadatke.....	86
6.3	Buduća istraživanja.....	87
7	Reference.....	89
8	Prilozi.....	99
8.1	Prilog 1 – Tabela sa pregledom literature koja se odnosi na primenu metoda asimilacije podataka u hidrološko-hidrauličkom modeliranju.....	99
8.2	Prilog 2 – Rezultati simulacija kada se kao optimalne vrednosti parametara kontrolera koriste min, max i median vrednosti iz skupa nedominantnih rešenja.....	104

Lista slika

Slika 1. Procentulna zastupljenost istraživanja prema: a) užoj oblasti primene, b) tipu merenja koja se koriste za usaglašavanje rezultata modela i c) asimilacionoj metodi koja se koristi. Statistika je dobijena na osnovu uzorka od 85 istraživanja (radova) u periodu od 2003. do 2020.....	9
Slika 2. Početni uslovi na uzvodnom i nizvodnom kraju 1D modela u mirnom toku	13
Slika 3. Neslaganje procenjenih početnih uslova dobijenih standardnim postupkom sa izmerenim podacima na pojedinim lokacijama	13
Slika 4. Početni uslov nakon primenjene asimilacije podataka	14
Slika 5. (a) Procedura standardnih metoda asimilacije podataka (predikcija-korekcija) i (b) modifikovana procedura asimilacije (kontinualna korekcija).....	15
Slika 6. Opšti princip usaglašavanja rezultata modela i merenja primenom teorije upravljanja: a) algoritam, b) pseudokod.....	16
Slika 7. (a) Diskretizacija računskog domena na preseke i (b) smaknuta numerička shema.....	18
Slika 8. Shematski prikaz uticaja Kalmanovog doprinosa (Kalman gain) na korekciju rezultata modela	20
Slika 9. Definicija matrice mapiranja	21
Slika 10. Usaglašavanje nivoa u modelu i merenja dodavanjem korektivnog dotoka na mestu gde postoji merenje nivoa (Milašinović i ostali 2020)	23
Slika 11. 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).....	25
Slika 12. Detalj implementacije korektivnog dotoka u model u vidu fiktivnog bočnog dotoka.....	26
Slika 13. Transformacija vremenske serije greške (a) u krivu trajanja greške (b) sa koje je moguće odrediti vrednost indikatora AssimTRatio	28
Slika 14. Vizualizacija pojedinih indikatora koji opisuju odziv PID kontrolera	30
Slika 15. Shematski prikaz genetskog algoritma	33
Slika 16. Procesi selekcije, ukrštanja i mutacije u genetskom algoritmu (singleobjective optimization)	33
Slika 17. Pareto front za dve kriterijumske funkcije.....	34
Slika 18. Shematski prikaz rekonstruisanog hidrograma na mestu dodavanja/oduzimanja vode u modelu primenom PID kontrolera	35
Slika 19. Shematski prikaz poboljšane procene krive protoka na mestu asimilacije korišćenjem izmerenog nivograma i rekonstruisanog hidrograma.....	36
Slika 20. Benchmark test primeri za poređenje EnKF i asimilacione metode zasnovane na primeni PID kontrolera: a) rečna deonica sa 6 mernih lokacija, b) pravougaoni poprečni presek – Test Primer 1 i c) složeni poprečni presek – Test Primer 2	37
Slika 21. Stvarni i procenjeni hidrogram kao uzvodni granični uslovi za rečnu deonicu u test primerima.....	38
Slika 22. Hidrosistem Dunava sa označenim delom koji se analizira (Slika 23).....	40
Slika 23. Deo hidroenergetskog sistema Đerdap koji se analizira: deonica duga 170km uzvodno od brane i HE Đerdap 1 sa 6 mernih lokacija	41
Slika 24. 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.....	42
Slika 25. Nivoi na mernim stanicama dobijeni korišćenjem „stvarnog“ hidrograma dotoka (za sintetički scenario) za period od 7 dana	43
Slika 26. Izmereni nivoi na 6 mernih stanica u periodu od 23.11.2015. do 30.11.2015.....	44

Slika 27. Kriva protoka na vodomernoj stanici Novi Sad formirana na osnovu dnevnih osmatranja nivoa i protoka (zabeleženi uzorci) u periodu od 01.01.2012. do 31.12.2015.....	45
Slika 28. Vremenske serije nivoa na vodomernoj stanici Novi Sad i procenjenog dotoka na osnovu krive protoka za period od 25.03.2019. do 01.07.2019.....	45
Slika 29. Asimilacija nivoa na 6 mernih stanica test primera sa pravougaonim poprečnim presekom primenom PID kontrolera	48
Slika 30. Asimilacija nivoa na 6 mernih stanica test primera sa složenim poprečnim presekom primenom PID kontrolera	48
Slika 31. Razlike nivoa (error) pri asimilaciji nivoa primenom PID kontrolera na test primeru sa pravougaonim koritom.....	49
Slika 32. Razlike nivoa (error) pri asimilaciji nivoa primenom PID kontrolera na test primeru sa složenim koritom	49
Slika 33. Asimilacija nivoa na 6 mernih stanica test primera sa pravougaonim poprečnim presekom primenom metode EnKF.....	50
Slika 34. Asimilacija nivoa na 6 mernih stanica test primera sa složenim poprečnim presekom primenom EnKF metode.....	51
Slika 35. Razlike nivoa (error) pri asimilaciji nivoa primenom EnKF metode na test primeru sa pravougaonim koritom.....	51
Slika 36. Razlike nivoa (error) pri asimilaciji nivoa primenom EnKF metode na test primeru sa složenim koritom	52
Slika 37. Poređenje nivoa (najboljih rezultata) dobijenih primenom dve metode asimilacije podataka na 6 mernih lokacija test primera sa pravougaonim poprečnim presekom	53
Slika 38. Poređenje nivoa (najboljih rezultata) dobijenih primenom dve metode asimilacije podataka na 6 mernih lokacija test primera sa složenim poprečnim presekom.....	54
Slika 39. Indikatori performansi asimilacije podataka za test primer sa pravougaonim poprečnim presekom.....	54
Slika 40. Indikatori performansi asimilacije podataka za test primer sa složenim poprečnim presekom	55
Slika 41. Prosečno ubrzanje (utrošak računarskog vremena) primenom PID kontrolera kao asimilacione metode u odnosu na metodu EnKF (preuzeto iz Milašinović i ostali 2020).....	57
Slika 42. Korektivni dotoci dobijeni na tri asimilacione lokacije koristeći varijantu PID kontrolera test primeru sa pravougaonim poprečnim presekom	57
Slika 43. Korektivni dotoci dobijeni na tri asimilacione lokacije koristeći varijantu PID kontrolera koja je dala najbolje rezultate na test primeru sa složenim poprečnim presekom	57
Slika 44. Izmereni i nivoi dobijeni modelom (bez asimilacije podataka) na mernim stanicama Hidroenergetskog Sistema Đerdap za hipotetički scenario.....	59
Slika 45. Indikatori performansi asimilacije podataka u prvoj fazi ispitivanja optimalne strukture kontrolera usled povećanja proporcionalnog koeficijenta K_p ($K_i=0$, $K_d=0$)	60
Slika 46. Indikatori performansi asimilacije podataka u drugoj fazi ispitivanja optimalne strukture kontrolera usled povećanja integrativnog koeficijenta K_i ($K_p=10$, $K_d=0$).....	61
Slika 47. Indikatori performansi asimilacije podataka u trećoj fazi ispitivanja optimalne strukture kontrolera usled povećanja derivativnog koeficijenta K_d ($K_p=10$, $K_i=10$).....	62
Slika 48. Izmereni i nivoi dobijeni modelom (sa asimilacijom podataka koristeći PI kontroler kao optimalnu strukturu kontrolera) na mernim stanicama Hidroenergetskog Sistema Đerdap za hipotetički scenario	63
Slika 49. Korektivni dotoci dodati na asimilacionim lokacijama primenom PI kontrolera kao optimalne forme kontrolera ($K_p=10$, $K_i=10$, $K_d=0$)	63
Slika 50. Pareto front za različitu kombinaciju kriterijumskih funkcija i za različitu veličinu populacije	65
Slika 51. Opseg optimalnih vrednosti proporcionalnog koeficijenta K_p po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 30 jedinki	66

Slika 52. Opseg optimalnih vrednosti integrativnog koeficijenta K_i po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 30 jedinki	67
Slika 53. Opseg optimalnih vrednosti proporcionalnog koeficijenta K_p po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 50 jedinki	67
Slika 54. Opseg optimalnih vrednosti integrativnog koeficijenta K_i po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 50 jedinki	68
Slika 55. Opseg optimalnih vrednosti proporcionalnog koeficijenta K_p po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 100 jedinki	68
Slika 56. Opseg optimalnih vrednosti integrativnog koeficijenta K_i po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 100 jedinki	69
Slika 57. Indikatori performansi kada se srednja vrednost (mean) koristi kao optimalna vrednost za parametre kontrolera dobijena optimizacijom sa veličinom populacije od 100 jedinki	74
Slika 58. Indikatori performansi kada se medijana koristi kao optimalna vrednost za parametre kontrolera dobijena optimizacijom sa veličinom populacije od 100 jedinki	74
Slika 59. Nivoi na vodomernim stanicama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja sa veličinom populacije 100 – sintetički scenario	76
Slika 60. Razlike nivoa (greške - errors) na vodomernim stanicama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja – sintetički scenario	76
Slika 61. Nivoi na vodomernim stanicama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja sa veličinom populacije 100 – stvarni scenario	77
Slika 62. Razlike nivoa (greške - errors) na vodomernim stanicama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja – stvarni scenario	77
Slika 63. Indikatori performansi kada se srednja vrednost koristi kao reprezent optimalne vrednosti – stvarni scenario	78
Slika 64. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja – sintetički scenario	79
Slika 65. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama Hidroenergetskog sistema Đerdap za hipotetički scenario kada su parametri kontrolera dobijeni kao srednje vrednosti pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	79
Slika 66. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao srednje vrednosti pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	80
Slika 67. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja – stvarni scenario	81
Slika 68. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama Hidroenergetskog sistema Đerdap za hipotetički scenario kada su parametri kontrolera dobijeni kao srednje vrednosti pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – stvarni scenario	81

Slika 69. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao srednje vrednosti pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija 1 i 3 – stvarni scenario.....	82
Slika 70. Hidrogram korektivnih dotoka (leva osa) i rekonstruisani hidrogram (desna osa) na mernoj stanici Novi Sad za period od 25.03.2019. do 01.07.2019. (dugoročna rekonstrukcija hidrograma).....	83
Slika 71. Smanjenje neodređenosti krive protoka za razmatrani period na mernoj stanici Novi Sad...	83
Slika 72. Nivoi na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	104
Slika 73. Odstupanja merenih i modeliranih nivoa (greške - errors) na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	104
Slika 74. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario.....	105
Slika 75. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija 1 i 3 – sintetički scenario.....	105
Slika 76. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario.....	106
Slika 77. Indikatori performansi asimilacije podataka na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	106
Slika 78. Nivoi na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario.....	107
Slika 79. Odstupanja merenih i modeliranih nivoa (greške - errors) na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	107
Slika 80. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	108
Slika 81. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	108
Slika 82. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	109
Slika 83. Indikatori performansi asimilacije podataka na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario.....	109
Slika 84. Nivoi na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario.....	110
Slika 85. Odstupanja merenih i modeliranih nivoa (greške - errors) na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	110

Slika 86. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	111
Slika 87. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	111
Slika 88. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario	112
Slika 89. Indikatori performansi asimilacije podataka na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario.....	112

Lista tabela

Tabela 1. Kombinacije kriterijumskih funkcija koje će se koristiti za višekriterijumsko podešavanje parametara PID kontrolera	32
Tabela 2. Slučajevi koji se analiziraju u okviru benchmarkinga EnKF i asimilacione metode zasnovane na PID kontrolerima	39
Tabela 3. Rezultati poređenja asimilacionih metoda na test primerima	56
Tabela 4. Skup optimalnih vrednosti parametara kontrolera za različite kombinacije kriterijumskih funkcija kada je veličina populacije 30	69
Tabela 5. Skup optimalnih vrednosti parametara kontrolera za različite kombinacije kriterijumskih funkcija kada je veličina populacije 50	70
Tabela 6. Skup optimalnih vrednosti parametara kontrolera za različite kombinacije kriterijumskih funkcija kada je veličina populacije 100	70
Tabela 7. Vrednosti indikatora performansi asimilacije podataka za nekoliko varijanti optimalnih vrednosti parametara kontrolera (kada se za vrednost parametara usvaja srednja vrednost i veličina populacije 100)	72
Tabela 8. Vrednosti indikatora performansi asimilacije podataka za nekoliko varijanti optimalnih vrednosti parametara kontrolera (kada se za vrednost parametara usvaja medijana i veličina populacije 100)	73
Tabela 9. Vrednosti indikatora performansi asimilacije podataka za nekoliko varijanti optimalnih vrednosti parametara kontrolera (kada se za vrednost parametara usvaja minimalna vrednost i veličina populacije 100)	113
Tabela 10. Vrednosti indikatora performansi asimilacije podataka za nekoliko varijanti optimalnih vrednosti parametara kontrolera (kada se za vrednost parametara usvaja maksimalna vrednost i veličina populacije 100)	114

1 Uvod

Tekuće klimatske promene uzrokuju intenzivniju pojavu ekstremnih hidroloških scenarija poput poplava i suša, koje direktno utiču na svakodnevni život ljudi, ugrožavajući njihove živote i imovinu, pri čemu se rizik svakodnevno povećava sa porastom broja stanovnika na planeti. Upravljanje rizikom od poplava je veoma zahtevan zadatak koji je praktično nemoguće zamisliti bez upotrebe pomoćnih alata koji se tiču prikupljanja i obrade podataka, modeliranja prirodnih procesa i davanja prognoza. Sa druge strane, moderan način života koji je praćen tehnološkim razvojem, zahteva velike količine električne energije za svakodnevne aktivnosti. Usled konstantnog povećanja emisije štetnih gasova koji doprinose globalnom otopljavanju i klimatskim promenama, tendencija u 21. veku je da se fokus energetske resursa premesti sa fosilnih na obnovljive izvore energije. Na taj način pojačavaju se pritisci na oblast upravljanja vodnim resursima za potrebe energetike, pogotovo u onim delovima sveta gde je hidroenergetika dominantan oblik proizvodnje električne energije. Dodatno, korišćenje vodnih snaga za proizvodnju električne energije predstavlja, trenutno, obnovljivi izvor energije koji je najupravljiviji, što zajedno sa ekonomskom isplativošću, stavlja hidroenergetiku u prvi plan obnovljivih izvora energije (EURELECTRIC 2011). Svakodnevno upravljanje velikim hidroenergetskim sistemima zahteva relativno pouzdane procene dostupnosti vode. Zbog toga se i u ovoj oblasti pravilno upravljanje ne može zamisliti bez pouzdanih računskih alata. Upotreba vodnih resursa za vodosnabdevanje stanovništva i poljoprivrede, kao esencijalni vid korišćenja vode za čoveka, takođe je na udaru usled povećanja broja stanovnika i konstantne degradacije kvaliteta vode. Upravljanje količina vode za vodosnabdevanje, ali i kvalitetom, takođe zahteva upotrebu računskih modela za analize najrazličitijih scenarija i donošenje optimalnih odluka.

Pored opisanih problema u upravljanju vodnim resursima, često se ovaj vid posla dodatno komplikuje u slučajevima kada postoji više „korisnika“ istog resursa, sa suprotno orijentisanim ciljevima. Jedan oblik ovog problema javlja se u slučajevima kada su „suprotstavljene“ strane različite grane vodoprivrede. Tako se, na primer, dešava da se jedan vodoprovodni sistem koristi i za hidroenergetiku i za eventualnu odbranu od polava. Upravljanje ovakvim sistemom je jednostavnije u „normalnim“ situacijama kada nema poplavnih talasa. Tada se najveća pažnja može posvetiti jednom korisniku (u ovom slučaju hidroenergetici). Problem nastaje kada se javljaju ekstremni hidrološki scenariji (poplavni talasi) koji su sve učestaliji usled klimatskih promena. Tada je cilj jednog „korisnika“ suprotstavljen cilju drugog i neophodno je doneti upravljačke odluke koje su kompromisne za sve. Dodatni primeri suprotstavljenih ciljeva se vide i u slučajevima kada se neki vodoprivredni sistem koristi i za vodosnabdevanje i za hidroenergetiku, dok se sve češće javljaju i problemi upravljanja manjim sistemima gde se lako može narušiti postojeći ekosistem (npr. neadekvatno upravljanje malim hidroelektranama). Donošenje odluka se dodatno komplikuje sa povećanjem broja „korisnika“. Drugi primer složenih vodoprivrednih sistema su veliki međunarodni sistemi gde su korisnici različite države (pr. HE Đerdap na Dunavu). Više međunarodnih korisnika istog resursa, takođe dovodi do neslaganja i komplikovanja pri upravljanju ovim resursima.

Zbog svih opisanih problema, stručnjaci zaduženi za upravljanje vodnim resursima, se svakoga dana suočavaju sa izazovima i često nerešivim problemima. Zbog toga, kako bi se obezbedilo pouzdanije i unapređeno upravljanje nekim vodnim resursom, stručnjaci imaju potrebu za alatima koji će omogućiti prognoze na kratkoročnom i/ili dugoročnom planu kao podršku u odlučivanju (eng. *decision support*). Ti prognostički alati se pre svega odnose na prognoze količine dostupne vode i kvaliteta vode. Da bi se to obezbedilo koriste se simulacioni modeli, zasnovani na fizičkim zakonima, različitih nivoa složenosti (u zavisnosti od potreba), koje opisuju različite procese. Ovaj postupak naziva se prognoza vođena modelima (eng. *model-*

driven forecasting) ili prognoza vođena (fizičkim) procesima (eng. *process-driven forecasting*). Međutim, upotreba modela sa sobom donosi nove probleme koje je potrebno rešiti. Pre svega, modeli koji se koriste zahtevaju kalibraciju kako bi verno reprezentovali stanja sistema koji se analiziraju. Ovaj postupak sprovodi se koristeći istorijske podatke čime se parametri modela podešavaju tako da rezultati dobijeni modelom u zadovoljavajućoj meri reprezentuju izmerena stanja. Kasnija upotreba ovako kalibrisanih modela u praksi često pokazuje nezadovoljavajuće rezultate, tj. razlika između rezultata modela i onih izmerenih je značajno veća nego u kalibracionom periodu. Ovaj problem uslovljen je, između ostalog, sezonskom varijacijom parametara modela, trajnim promenama parametara usled prirodnih i veštačkih aktivnosti na domenu koji se modelira, nedovoljno dugim kalibracionim periodom, nepouzdanim graničnim uslovima, nepouzdanim postupkom za procenu početnih uslova na celom domenu itd. Takođe, veoma bitan faktor koji utiče na neslaganja rezultata, čak i u slučajevima dobro kalibrisanih modela, je različita prostorna pokrivenost. Računski modeli najčešće pokrivaju značajno veći deo nekog sistema nego što je to slučaj sa mernim lokacijama. Prema tome, proces kalibracije podrazumeva da se u modelu podešavaju vrednosti velikog broja parametara na osnovu nekoliko merenih podataka, što lako može dovesti do kasnijih neslaganja rezultata. Čak i da se ovaj problem nekako prevaziđe, postoje dodatni problemi koji će usloviti pomenuta neslaganja rezultata. Za prognoze stanja sistema, potrebne za pravilno upravljanje istim, čak i u slučaju najbolje kalibrisanih modela, i dalje su prisutni različiti problemi. Jedan od najdominantnijih problema uslovljen je nepouzdanošću graničnih uslova. Ova nepouzdanost automatski se prenosi i na početne uslove (koji su neophodni za proces prognoze) a samim tim se povećava i nepouzdanost prognoznih rezultata. Sve to na kraju loše utiče na upravljačke odluke i dovodi do upravljanja sistemom koje nije optimalno.

Na sistemima na kojima postoje osmatranja stanja u dužem vremenskom periodu, pri čemu računski modeli ne pružaju zadovoljavajuće rezultate, moguće je prognozu unaprediti korišćenjem postupka asimilacije podataka (eng. *data assimilation*). Ovaj postupak generalno predstavlja predmet istraživanja u okviru ove disertacije. Ovim alatom moguće je kombinovati računске modele, tačnije njihove rezultate (pokrivaju veću oblast) i izmerene podatke (pokrivaju malu oblast) u cilju bolje procene stanja sistema na celom domenu, tj. u cilju smanjenja razlike između podataka dobijenih modelom i izmerenih podataka. Generalno, ovaj alat podrazumeva kontinualno podešavanje stanja modela sa ciljem usaglašavanja rezultata modela i izmerenih podataka, uzimajući u obzir pouzdanost i rezultata modela i izmerenih podataka.

Sama disertacija će se baviti specifičnim problemom asimilacije 1D linijskih modela tečenja u otvorenim tokovima. Cilj disertacije je uvođenje nove metode asimilacije koja treba značajno da ubrza postupak i omogući njenu primenu u redovnim inženjerskim zadacima. Nova metoda će se uporediti sa standardnim postupcima asimilacije i kroz disertaciju će se dati predlog izbora optimalne strukture i podešavanja asimilacionog modela. Nova metoda će biti testirana, pored hipotetičkih primera, i na realnom hidrauličkom modelu akumulacije HE Djerdap 1.

Opšte informacije o postupku asimilacije podataka i njenom doprinosu u oblasti upravljanja fizičkim sistemima prikazane su u okviru pregleda literature (Poglavlje 2.2). U ovom poglavlju date su informacije o začecima razvoja i primene metoda asimilacije podataka u širem opsegu oblasti. Pošto je ova disertacije orijentisana na prirodne i veštačke sisteme otvorenih tokova, dalji pregled literature odnosi se na primenu asimilacionih metoda u oblasti hidrološko-hidrauličkog modeliranja (Poglavlje 2.3). U skladu sa tim urađen je detaljan pregled sa fokusom na konkretnu oblast primene, primenjene asimilacione metode i tipove merenih podataka koji se koriste u asimilaciji (Prilog 8.1). Ovaj pregled literature ima za cilj da jasno definiše probleme prilikom primene standardnih metoda asimilacije podataka u oblasti

hidrološko-hidrauličkog modeliranja. Takođe, cilj je i da se odredi referentna metoda asimilacije podataka sa kojom će se porediti nova asimilaciona metoda razvijena u okviru ovog istraživanja. Nakon utvrđenih najčešćih problema koji se javljaju kod primene standardnih, statistički zasnovanih asimilacionih metoda, prelazi se na pregled istraživanja koja se odnose na razvoj i primenu novih, mahom uže profilisanih metoda asimilacije podataka (Poglavlje 2.4). Ove metode fokusiraju se na uštedu računarskog vremena kao jednog od najčešćih problema pri primeni asimilacije podataka. Principi postavljeni u pojedinim istraživanjima poslužiće za razvoj nove, fizički zasnovane metodologije za brzu asimilaciju podataka koja je predmet istraživanja u ovoj disertaciji. Na osnovu toga definisani su jasni istraživački zadaci na koja je potrebno rešiti i dati odgovore i definisane su polazne hipoteze koje će poslužiti za razvoj nove metodologije za brzu asimilaciju podataka (Poglavlje 2.5).

Nakon pregleda literature prelazi se na opis metodologije za brzu asimilaciju podataka koja se primenjuje na modelima otvorenih tokova. Prvi deo metodologije (Poglavlje 3.1) odnosi se na opis principa po kom radi asimilaciona metoda koja se razvija i na opis suštinskih razlika između te metode (fizički zasnovane) i metoda asimilacije podataka koje su u široj upotrebi (standardne, statistički zasnovane asimilacione metode). Dalji opis metodologije odnosi se na detaljan opis matematičkog i numeričkog modela tečenja koji će se koristiti u procesu asimilacije podataka (Poglavlje 3.2). Nakon opisa hidrauličkog modela u narednom poglavlju (Poglavlje 3.3) detaljno se prikazuje standardna asimilaciona metoda nazvana Ensemble Kalman Filter (EnKF). Ova metoda za asimilaciju podataka usvojena je za referentnu metodu, kao najzastupljenija u dosadašnjim istraživanjima. Opisan je kompletni matematički aparat koji stoji iza ove metode. Takođe, uz opis osnovnih jednačina koje čine ovu metodu jasno su predočeni problemi koji se sreću pri primeni ove metode. Na osnovu toga, opis matematičkog aparata referentne asimilacione metode upotpunjen je alatima, preuzetih iz različitih istraživanja, koji se mogu koristiti za rešavanje pomenutih problema.

Posle opisa referentne asimilacione metode, prelazi se na prikaz nove asimilacione metode koja je generalno predmet istraživanja ove disertacije (Poglavlje 3.4). U ovom poglavlju detaljno se opisuje nova metoda za brzu asimilaciju podataka čiji je opšti princip rada predstavljen u okviru Poglavlja 3.1. Nova asimilaciona metoda zasnovana je na teoriji upravljanja, tačnije na teoriji Proporcionalno-Integrativno-Derivativnih (PID) kontrolera. Ovaj pristup koristi se za definiciju asimilacionog elementa kojim se ažuriraju stanja sistema koristeći indirektni, fizički zasnovani pristup, za razliku od standardnih, statistički zasnovanih asimilacionih metoda. Asimilacioni element u novoj novorazvijenoj metodi na stanje modela utiče dodavanjem ili oduzimanjem određene količine vode. Implementiran je u vidu korektivnog dotoka, tačnije korektivnog bočnog dotoka. Jednačine teorije PID kontrolera koriste se za računanje tog korektivnog dotoka koji se u hidraulički model implementira u vidu bočnog dotoka u okviru jednačine održanja mase.

Neophodan korak u primeni asimilacije podataka, posebno u slučajevima kada je potrebno uporediti različite metode, je ocena kvaliteta sprovedene asimilacije. U tu svrhu, u okviru Poglavlja 3.5 definišu se indikatori kvaliteta asimilacije podataka ili indikatori performansi. U ovom istraživanju koristiće se četiri indikatora, od kojih se tri mogu primeniti na obe asimilacione metode, dok je jedan indikator definisan samo u slučajevima kada se koristi indirektna, fizički zasnovana metoda asimilacije podataka.

Primena teorije PID kontrolera, u različitim oblastima, podrazumeva da se problem upravljanja sistemom može izvršiti upotrebom različitih konfiguracija ovih kontrolera. To praktično znači da se u nekim slučajevima mogu izostaviti pojedini elementi koji ne utiču na proces upravljanja, odnosno kontrole. Prema tome, istraživanje u okviru ove disertacije kao naredni korak u implementaciji nove asimilacione metode analizira optimalnu strukturu (konfiguraciju,

formu) PID kontrolera (Poglavlje 3.6). Ova analiza sprovodi se faznim ispitivanjem detaljno opisanim u pomenutom poglavlju. Optimalna struktura kontrolera predlaže se na osnovu indikatora performansi asimilacije podataka definisanim u Poglavlju 3.5. Rezultat ovog ispitivanja daće inicijalne podatke za naredni korak u implementaciji nove asimilacione metode, a koji se tiče optimalnog podešavanja usvojenih kontrolera (Poglavlje 3.7). Ovaj proces podrazumeva pronalaženje optimalnih vrednosti parametara kojima se definiše kontroler. Proces se sprovodi višekriterijumskom optimizacijom koristeći genetski optimizacioni algoritam. Kao kriterijum za optimizaciju, odnosno podešavanje kontrolera, koriste se indikatori kvaliteta asimilacije podataka.

Pomenuti indirektni, fizički zasnovani pristup asimilaciji podataka omogućava dodatne korisne alate pri upotrebi ove metode. U ovom istraživanju prikazuje se potencijal ove metode za rekonstrukciju hidrograma na lokacijama gde postoje zabeleženi samo nivogrami. U Poglavlju 3.8 prikazuje se postupak za rekonstrukciju hidrograma koristeći rezultate korektivnih dotoka dobijene u procesu asimilacije podataka. Na taj način moguće je proceniti (ili smanjiti nepouzdanost postojećih) krive protoka koje mogu biti od velikog značaja u oblasti hidrauličkog modeliranja i upravljanja rečnim sistemima (pre svega u oblasti prognoze i odbrane od poplava).

Nakon detaljnog prikaza metodologije koja se odnosi na matematički aparat nove asimilacione metode u Poglavlju 4 opisuju se test primeri na kojima će ova metodologija biti primenjena. Prvi je opis hipotetičkog rečnog sistema (Poglavlje 4.1) na kom će se vršiti poređenje (eng. *benchmark*) nove i referentne asimilacione metode. Nakon primera za poređenje ove dve asimilacione metode prelazi se na opis realnog rečnog sistema (Poglavlje 4.2) na kome će se vršiti detaljna implementacija nove asimilacione metode i ispitati potencijal ove metode za rekonstrukciju hidrograma. Detaljna implementacija ove metode podrazumeva i određivanje optimalne konfiguracije PID kontrolera prema postupku opisanom u Poglavlju 3.6 i optimalno podešavanje parametara kontrolera prema algoritmu opisanom u Poglavlju 3.7. Takođe, na jednom delu posmatranog rečnog sistema (Poglavlje 4.3) testiraće se i algoritam za rekonstrukciju hidrograma i procenu krivih protoka opisan u Poglavlju 3.8.

Poglavlje 5 prikazuje rezultate svih testova i analiza sprovedenih u okviru istraživanja. U Poglavlju 5.1 prikazani su rezultati benchmarkinga na hipotetičkom test primeru. Nakon toga, u Poglavljljima 5.2 i 5.3 prikazuju se rezultati implementacije PID kontrolera kao asimilacionog elementa u hidraulički model. U poslednjem delu (Poglavlje 4.3) prikazani su rezultati primene nove asimilacione metode u svrhu rekonstrukcije hidrograma i procene krivih protoka. Na osnovu rezultata prikazanih u celom Poglavlju 5 i datih odgovora na istraživačka pitanja prelazi se na Poglavlje 6. U ovom poglavlju izvode se jasni zaključci i preporuke za primenu nove metode za asimilaciju podataka, na osnovu analize rezultata i odgovora na konkretna istraživačke zadatke. Pored zaključaka i preporuka, u ovom poglavlju jasno se izdvajaju nedostaci predložene asimilacione metode uočeni tokom istraživanja. Prema uočenim nedostacima predlažu se i dalja rešenja u vidu planova za buduća istraživanja. Na kraju disertacije, u Poglavlju 7 data je lista svih referenci koje su poslužile za formiranje istraživačkih zadataka i, konkretno, za razvoj metodologije za brzu asimilaciju podataka. Treba još pomenuti da se u poglavlju sa priložima (Poglavlje 8) nalazi i tabela sa detaljnim pregledom literature koja se tiče primene asimilacije podataka u oblasti hidrološko-hidrauličkog modeliranja (Poglavlje 8.1), kao i dodatni rezultati za različite test varijante i scenariji koji nisu ušli u osnovni tekst (Poglavlje 8.2).

2 Pregled literature

2.1 Prognoze vođene modelima u oblasti upravljanja vodnim resursima

Generalno, postoje dva pristupa za prognoziranje veličina potrebnih za upravljanje vodnim resursima (npr. nivoa i protoka). Jedan pristup naziva se prognoziranje vođeno podacima (eng. *data driven forecasting*) i u ekspanziji je poslednjih godina sa povećanjem dostupnosti podataka (eng. *Big Data*). Ovakav pristup zasniva se na upotrebi samo merenih podataka koji predstavljaju izmereno stanje sistema. Koristeći različite tehnike mašinskog učenja, npr. veštačke neuronske mreže (eng. *artificial neural networks*) ili metod podržavajućih (potpornih) vektora (eng. *support vector machines*) uspostavlja se regresiona veza između pojedinih veličina (npr. nivoa na različitim lokacijama ili nivoa i protoka). Ovakav način prognoziranja za potrebe upravljanja vodnim resursima bio je predmet mnogih istraživanja. Npr. prognoza protoka na pojedinim delovima reka u cilju odbrane od poplava zasnovana na primeni veštačkih neuronskih mreža prikazana je u brojnim radovima (Campolo i ostali 2003; Hu i ostali 2005; Pramanik i ostali 2010; Huo i ostali 2012; Zhang i Lou, 2016; Dariane i Azimi 2017; Alizadeh i ostali 2018). Chau i Yang (1992), Abraham i See (2000), Coulibaly i ostali (2000), Li i ostali (2014), Hammid i ostali (2016), Ruslan i ostali (2017), Niedzielski i Miziński (2017), Hong (2017), Zamani Sabzi i ostali (2017) i Yan i ostali (2018) primenjuju metod potpornih vektora za rešavanje problema prognoze protoka na pojedinim rečnim deonicama. U većini ovakvih istraživanja kontinualno mereni podaci pojedinih hidrološko-hidrauličkih veličina se koriste kako bi se istrenirali veštački sistemi i uspostavila korelacija između odabranih veličina. Ovakav pristup omogućava da se prognoze vrše bez uvida u neku fizičku zavisnost između odabranih veličina, već se ona podrazumeva. Ovakvi sistemi, vođeni podacima, mogu obezbediti relativno pouzdane prognoze ali samo kada su ulazni podaci, na osnovu kojih se vrši prognoza, u istom opsegu kao i podaci koji su služili za trening. U slučaju kada ovo nije ispoštovano, postoji opasnost da veličine koje se prognoziraju imaju nelogične vrednosti, što može prouzrokovati dodatne probleme. Sa druge strane, često se, usled nedostatka merenih podataka, kao podaci za treniranje veštačkih sistema, koriste podaci generisani kroz matematičke modele koji se pokreću za više hipotetičkih scenarija (Aichouri i ostali 2015; Alexander i ostali 2018; X. Li i ostali 2018). Na ovaj način kreiraju se tzv. surogat (zamenski) modeli (veštačka inteligencija trenirana pomoću modela koja se kasnije koristi umesto modela) ili hibridni (simultano se koriste i fizički zasnovani modeli i alati veštačke inteligencije). Opisani problemi u oblasti prognoza vođenih podacima govore u prilog tome da su fizički zasnovani modeli i dalje neizostavni deo u alatima za prognozu. Zbog toga, istraživanje u okviru ove disertacije fokusira se na rešavanje problema prisutnih u prognozama zasnovanim na fizički zasnovanim modelima.

Prognoze vođene modelima, u izvornom obliku, zahtevaju korišćenje nekog modela zasnovanog na fizičkim zakonima. Jednačine koje opisuju matematičke modele koji se koriste najčešće u sebi sadrže različita pojednostavljena stvarnih procesa (fenomena), i to najčešće parametrizacijom jednačina (uvođenje parametara, npr. koeficijenti trenja, kojima se opisuje ovaj proces). Ovakav postupak za sobom povlači potrebu da se vrednosti tih parametara pravilno procene. Samim tim, javlja se i mogućnost nedovoljno dobre procene parametara čime se povećava neodređenost modela. Kvalitet rezultata dobijenih primenom simulacionih modela zavisi (i često je umanjen) od različitih izvora neodređenosti koji postoje u modelima (Vrugt i ostali 2006; Bozzi i ostali 2015). Kao što je već pomenuto, parametri koji se uvode u jednačine matematičkih modela zahtevaju da se te veličine procene u postupku kalibracije modela. Kalibracija se sprovodi za izabrane podatke iz prošlosti, pri čemu taj proces nikada nije savršen. Tako kalibrisan model koristi se za analizu novih scenarija, koji ne garantuju da se parametri određeni u procesu kalibracije neće promeniti u budućnosti. Sa druge strane, korišćenje

matematičkih modela za vremenske simulacije, za neki period, zahteva i procenu početnih i graničnih uslova. Neodređenost graničnih uslova koji se koriste, npr. krive protoka, značajno utiče na neodređenost modela (Ocio i ostali 2017). Početni uslovi na celom domenu koji se razmatra najčešće se procenjuju na osnovu početnih vrednosti koje se zadaju na granicama domena (hidrogrami, nivogrami). Ako je poznato da granični uslovi sami po sebi unose neodređenost, onda se ta neodređenost dodatno povećava i kroz početne uslove. Na osnovu svega navedenog, može se shvatiti da modeli, kada se primenjuju na realnim scenarijima mogu da daju nezadovoljavajuće rezultate. Zbog toga, svaka upravljačka odluka na nekom sistemu, zasnovana samo na rezultatima modela nije pouzdana.

Jedini pravi uvid u odgovor sistema na neki scenario je kontinualno merenje različitih hidrološko-hidrauličkih veličina (npr. nivoi, protoci). Problem sa merenjima je taj što njih najčešće nije moguće sprovesti na čitavom domenu koji se analizira (uglavnom zbog ekonomskih ograničenja) i što se ne može lako proceniti šta će pokazivati merni uređaji u budućem periodu. Sa druge strane, kao što je već pomenuto, prognoza hidrauličkih veličina, na čitavom domenu koji je od značaja, može se sprovesti samo primenom nekog modela, koji u sebi nose mnoštvo neodređenosti. Kako bi se prevazišao ovaj problem, moguće je upariti matematičke modele i merenja u postupku koji se naziva *asimilacija podataka* (eng. *Data Assimilation*).

2.2 Metode asimilacije podataka

U opštem slučaju, postupak prognoze vođene modelima, kada se koriste samo matematički modeli za prognozu, podrazumeva da se simulacija odvija od nekog početnog trenutka pa za neki period u budućnost. Kao što je već rečeno, ovde se javljaju različiti problemi, pre svega vezani za nepouzdanost granične i početne uslove. Asimilacija podataka podrazumeva da se model pokreće za neki period u prošlosti (npr. par dana unazad od trenutka od kog se žele raditi prognoze, a koji se može nazvati asimilacioni period/prozor), pri čemu je neophodno imati izmerena stanja na pojedinim lokacijama na sistemu koji se modelira (npr. izmerene nivoe ili protoke). Proces asimilacije podataka podrazumeva poboljšanu procenu stanja sistema usaglašavanjem stanja dobijenih modelom i izmerenih stanja, u asimilacionom periodu. Na taj način, na kraju dovoljno dugog asimilacionog perioda dobija se bolje početno stanje koje omogućava poboljšanu prognozu.

Postupak usaglašavanja stanja modela i merenja zavisi od neodređenosti rezultata modela i neodređenosti izmerenih podataka. U svakom trenutku kada su dostupni izmereni podaci stanja modela se usaglašavaju sa merenjima računajući odnos neodređenosti rezultata modela i neodređenosti izmerenih podataka. Ukoliko je neodređenost merenih podataka manja od neodređenosti modela, veća težina se daje izmerenim podacima i rezultati dobijeni modelom se prilagođavaju izmerenim podacima. U suprotnom, ukoliko se desi da je izmereni podatak nepouzdan, odnosno ima veću neodređenost nego model, veća težina se daje modelu i rezultat stanja modela se ne menja jer se mereni podaci praktično zanemaruju zbog prevelike nepouzdanosti. Ovakav postupak omogućava smanjenje neodređenosti modela na kraju asimilacionog perioda i omogućava bolje procenjene početne uslove za dalju prognozu (Habert i ostali 2016).

Prvobitno su se metode asimilacije podataka, u modeliranju prirodnih fizičkih procesa, koristile u oblasti okeanografije i meteorologije (Miller i ostali 1994; Geir Evensen 1994; 2003), ali se poslednjih dvadesetak godina, sa sve većim uticajem klimatskih promena na (kopnene) vodne resurse, sve intenzivnije koriste i u oblasti hidrološko-hidrauličkog modeliranja. U primeni, najzastupljenija asimilaciona metoda je Kalmanov filter (Kalman 1960). Ovaj metod ima mogućnost primene samo u linearnim modelima, stoga je oblast primene ove metode veoma

sužena. Kako bi se prevazišao ovaj problem, izvršene su modifikacije ove metode kako bi ona mogla da se koristi i za nelinearne modele (kojih je u praksi znatno više od linearnih). Tako je prvo razvijena metoda koja se naziva Extended Kalman Filter – EKF (G. Evensen 1992). Za korišćenje ove metode potrebno je izvršiti linearizaciju jednačina matematičkog modela, što nije uvek jednostavno uraditi. Zbog toga se otišlo dalje u poboljšavanje metode Kalmanovog filtera, i razvijena je metoda nazvana Ensemble Kalman Filter – EnKF koja se može koristiti za izrazito nelinearne modele (Geir Evensen 1994; 2003; 2007), i omogućava značajno poboljšanje (Reichle i ostali 2002). U metodi EnKF, svako stanje dobijeno modelom predstavljeno je skupom (eng. *ensemble*) na osnovu čije statistike (srednja vrednost, varijansa) se računa neodređenost modela. Ovaj pristup zahteva upotrebu višestrukih pokretanja modela kako bi se formirali pomenuti skupovi i na osnovu njih sračunala neodređenost modela koja se poredi sa neodređenošću izmerenih podataka. Ovo često može iziskivati značajan utrošak računarskog vremena, što se može podvesti pod jednu od mana ove metode. Takođe, važi i pretpostavka da svi skupovi (ansamblovi) prate normalnu, odnosno gausovsku raspodelu, što u prirodi često nije slučaj. Pojedini istraživači razvili su metode kojima se prevazilazi pretpostavka o gausovskoj raspodeli (ne uzimajući u obzir utrošak računarskog vremena), pa je tako razvijena metoda nazvana Particle Filter (Del Moral 1997), čija je primena (Matgen i ostali 2010; Xu i ostali 2017; Chen i ostali 2018) dala poboljšanje u proceni neodređenosti modela, ali i značajno povećala utrošak računarskog vremena. Pored metode Particle filter mogu se sresti i varijacione metode, 3Dvar i 4Dvar (Seo i ostali 2009; Kabir, Appiah Assumaning, i Chang 2017), kao i relativno nova, složenija, metoda, nazvana Ensemble Smoother (L. Li i ostali 2018; L. Li, Puzel, i Davis 2018).

2.3 Primena metoda asimilacije u hidrološko-hidrauličkim modelima

Metode asimilacije podataka, prvenstveno metoda EnKF, imaju široku primenu u oblasti hidrološko-hidrauličkog modeliranja za potrebe upravljanja rizicima od poplava ili upravljanja vodnim resursima za potrebe hidroenergetike ili vodosnabdevanja, o čemu svedoči i značajan broj istraživanja na ovu temu.

U značajnom broju istraživanja različiti hidrološko-hidraulički modeli kombinovani (upareni) su sa EnKF metodom za potrebe prognoze i najave poplava. U istraživanju Madsen i ostali (2003) asimilaciona metoda EnKF je uparena sa hidrauličkim modelom MIKE 11 za prognozu nivoa vode u regionu Piemont u severozapadnom delu Italije, pri čemu je pokazano osetno poboljšanje u prognozi poplava. Istraživanje Romanowicz-a i ostalih (2006) pokazalo je da uparivanje kvazi-disrtibuiranog hidrološkog modela sa EnKF metodom za prognozu promene nivoa vode na reci Severn u Ujedinjenom Kraljevstvu takođe daje osetno poboljšanje. Slično tome, kombinacija SAC-SMA (SACramento Soil Moisture Accounting) konceptualnog hidrološkog modela i metode EnKF iskorišćena je za potrebe prognoze protoka na vodotocima i za uspostavljanje sistema za najavu poplava (Vrugt i ostali 2006; Weerts i El Serafy 2006; Clark i ostali 2008).

Pored uparivanja hidroloških modela i EnKF metode za asimilaciju podataka, podjednako je zastupljeno i korišćenje hidrauličkih modela tečenja, zajedno sa metodama za asimilaciju podataka. Za razliku od hidroloških modela, modeli tečenja, upareni sa metodama za asimilaciju podataka su značajni za prognoze na većim tokovima, kada se propagacija talasa ne može zanemariti a upotreba hidroloških modela zahteva podatke o ogromnoj površini sliva (npr. sliv Dunava) čime se nepouzdanost hidrološkog modela višestruko uvećava. Prema tome, primena metoda asimilacije podataka uz modele tečenja u otvorenim tokovima je predmet brojnih istraživanja. J. C. Neal i ostali (2007) su predstavili istraživanje u kome je model

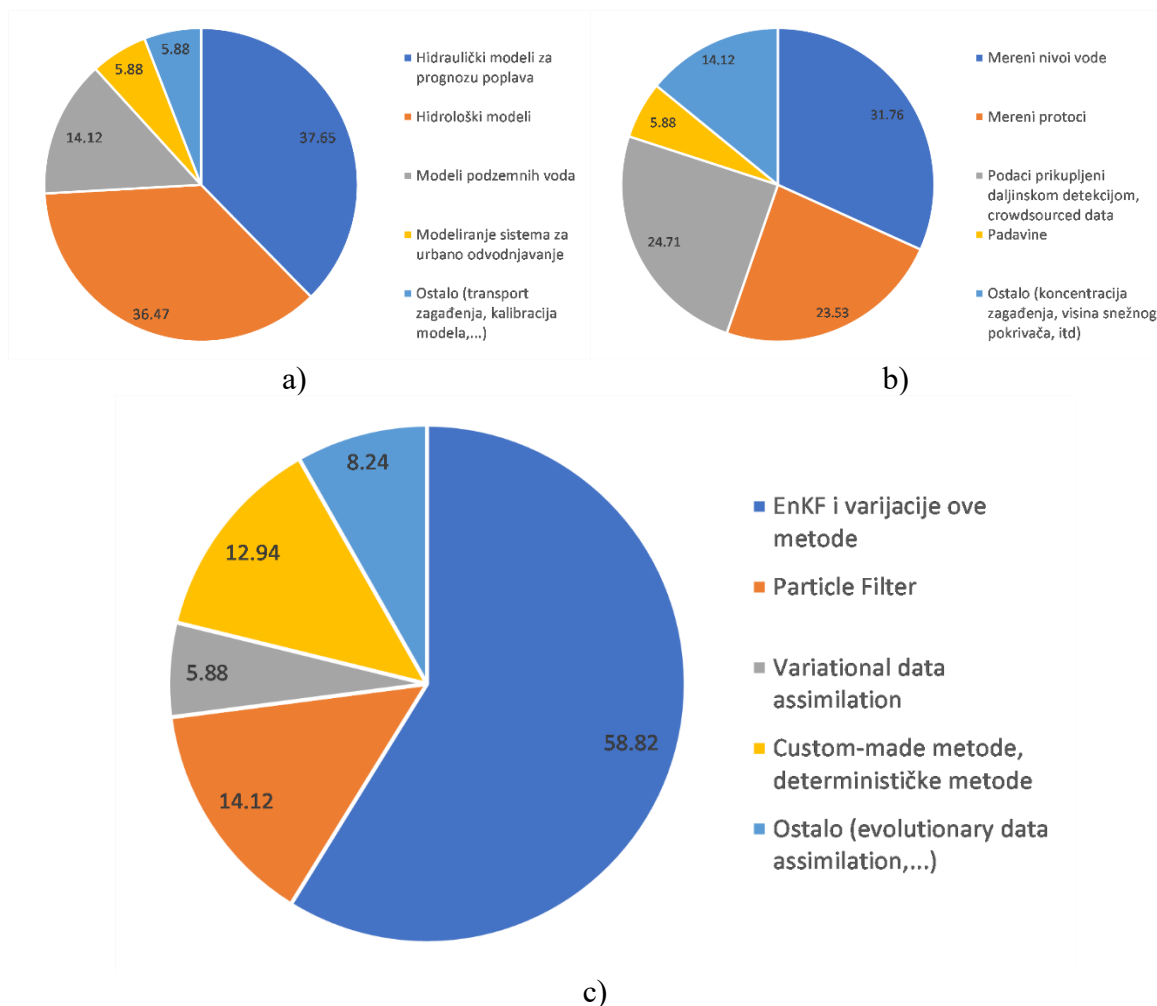
zasnovan na Sen-Venanovim jednačima uparen sa EnKF asimilacionom metodom. Ovo istraživanje omogućilo je povećanje tačnosti u prognozi za 50-70%. Kombinacija modela LISFLOOD-LP (razvijen u istraživanju Bates i Roo 2000) i EnKF metode prikazana je u istraživanjima Andreadis i ostali (2007), Andreadis i Schumann (2014) i Munier i ostali (2014), gde je takođe dokazano poboljšanje u određivanju početnih uslova za proces prognoze. Dalje, kombinacija HEC-RAS modela tečenja (Brunner 2010) i EnKF metode, za potrebe procene protoka na neosmotrenom slivu prikazana je u istraživanju J. Neal i ostali (2009). Značaj primene asimilacionih metoda u oblasti najave poplava dodatno potvrđuje i istraživanje Barthélémy i ostali (2017), u kom se MASCARET hidraulički model (Goutal i Maurel 2002) koristi sa EnKF metodom za poboljšanje najave poplava na reci Adour-Maritime u Francuskoj. Pored primene asimilacionih metoda za poboljšanje početnih uslova u prognozi poplava, ove metode se često koriste i za potrebe operativnog upravljanja rečnim sistemima. Tako, u slučajevima kada postoji velika nepoznanica u prognozi dotoka u neku sistem, asimilacione metode mogu pomoći korekciji ulaznih veličina (Ricci i ostali 2011; Gragne i ostali 2015), čime se smanjuje nepouzdanost graničnih uslova. Iako se metode asimilacije podataka najčešće koriste za usaglašavanje rezultata modela (npr. nivoa vode), one se paralelno mogu koristiti i za podešavanje parametara modela (Cooper i ostali 2018), što bi se moglo okarakterisati kao dinamička (re)kalibracija modela, ali i za korekciju geometrije deonice koja se modelira (Yoon i ostali 2012).

Pored primene asimilacionih metoda na rečne sisteme, postoji značajan broj istraživanja na temu poboljšanja prognoze na urbanim slivovima i sistemima za odvođenje vode. Primena asimilacije podataka za poboljšanje prognoze oticaja na urbanim slivovima prikazana je u istraživanjima poput Lund i ostali (2018) i (2019), zatim Branisavljevic i ostali (2014), dok je primena ovih metoda, zajedno sa modelima tečenja u sistemima za odvođenje voda u urbanim sredinama prezentovana u istraživanjima Borup i ostali (2014) i (2018). Sva ova istraživanja govore o širokoj mogućnosti za upotrebu asimilacionih metoda zajedno sa različitim hidrološko-hidrauličkim modelima.

Prethodno navedena istraživanja govore o primeni asimilacionih metoda za usaglašavanje rezultata različitih modela i merenja. Druga strana primene metoda asimilacije podataka odnosi se na vrste merenja koja se koriste za potrebe ažuriranja modela. U najvećem broju slučajeva, kada se govori o hidrološko-hidrauličkim modelima za potrebe najave poplava ili operativnog upravljanja sistemima, koristi se mreža stanica za merenje nivoa vode (Romanowicz i ostali 2006; Hostache i ostali 2010; Jean-Baptiste i ostali 2011; Rakovec i ostali 2012) kao najpouzdaniji tip merenja. Pored merenih nivoa, u nekim istraživanjima koriste se mereni protoci (Thirel i ostali 2010; Randrianasolo i ostali 2014; Dumedah i Coulibaly 2014a; Y. Sun i ostali 2014) koji imaju veću neodređenost od merenja nivoa. U novijim istraživanjima, kako raste dostupnost daljinski detektovanih podataka, za asimilaciju podataka, na mestima gde ne postoje sistemi za monitoring, često se koriste podaci o hidrološko-hidrauličkim veličinama na osnovu satelitskih snimaka (Matgen i ostali 2010; Giustarini i ostali 2011; Yoon i ostali 2012; García-Pintado i ostali 2013; Andreadis i Schumann 2014; Garambois i ostali 2020), ili podaci dobijeni korišćenjem bespilotnih letelica – dronova (Tang i ostali 2018). Dodatno, u novijim istraživanjima sve se češće postavlja pitanje upotrebe podataka koji se mogu dobiti od „običnih ljudi“ (eng. *crowdsourced data*), obzirom na široku dostupnost interneta (Mazzoleni, Cortes Arevalo, i ostali 2017; Mazzoleni, Verlaan, i ostali 2017; Mazzoleni i ostali 2018; Annis i Nardi 2019).

Detaljan pregled literature koja se tiče primene asimilacionih metoda u oblasti hidrološko-hidrauličkog modeliranja dat je u tabeli u prilogu 8.1. Ovde se prikazuje procentualna

zastupljenost istraživanja u zavisnosti od toga koja se asimilaciona metoda koristi, koji tipovi merenja i prema užoj oblasti primene (Slika 1).



Slika 1. Procentulna zastupljenost istraživanja prema: a) užoj oblasti primene, b) tipu merenja koja se koriste za usaglašavanje rezultata modela i c) asimilacionoj metodi koja se koristi. Statistika je dobijena na osnovu uzorka od 85 istraživanja (radova) u periodu od 2003. do 2020.

Na osnovu ovog pregleda literature može se zaključiti da je u oblasti hidrološko-hidrauličkog modeliranja metoda EnKF i varijacije ove teme najzastupljenija. Na osnovu toga se ova metoda usvoja kao referentna i sa njom će se porediti nova metoda za asimilaciju podataka koja se razvija u okviru ovog istraživanja.

2.4 Metode za brzu asimilaciju podataka

Sva prethodno pomenuta istraživanja u kojima se metode asimilacije podataka uparaju sa hidrološko-hidrauličkim modelima govore o potencijalu asimilacionih metoda da se poboljšaju početni uslovi na osnovu kojih se rade kratkoročne i/ili dugoročne prognoze. To dodaje na značaju asimilacije podataka kao alata za podršku u odlučivanju (za smanjenje rizika od poplava, upravljanje hidroenergetskim sistemima itd). Većina istraživanja bazirana je na primeni standardnih asimilacionih metoda (EnKF) koje su statistički zasnovane. Međutim, u različitim slučajevima primene standardnih metoda, 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 ovakve metode zaobilaze od strane inženjera u praksi. Zbog dinamičnosti sistema kojima se upravlja, često se postavlja zahtev da alati, kao što je asimilacija podataka, daju 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.

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 na svakom vremenskom koraku, sračunate vrednosti iz modela (npr. nivoi vode dobijeni Sen-Venanovim jednačinama) direktno se menjaju prema izmerenim vrednostima. To praktično znači da se vrednost te veličine dobijene modelom zameni nekom vrednošću koja odgovara izmerenom podatku. 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). Medjutim, 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 je pristup koji je korišćen uzet kao osnova za razvoj metodologije za brzu, fizički zasnovanu asimilaciju podataka u okviru ove disertacije.

Istraživanje u okviru ove disertacije predlaže metodu indirektno (posredno) asimilacije podataka u modelima tečenja u rekama. Pošto ovde nije u potpunosti moguće primeniti metodologiju razvijenu u radu Hansen i ostali (2014), detaljno je razvijena metodologija koja koristi sličan pristup ali je primenjiva i na rečne sisteme. Početna istraživanja na ovu temu

prikazana su u radovima Rosić, Jaćimović, i ostali (2017), Rosić, Prodanović, i ostali (2017) i Milašinović i ostali (2018) i (2019) gde je pokazano da nova metoda ima potencijal za primenu u rečnim sistemima. U okviru rada Milašinović i ostali (2020) detaljno je prikazana ova metodologija uz dokaz o uštedi računarskog vremena koja se dobija u odnosu na EnKF metodu. Ovo istraživanje predstavlja mogućnost upotrebe nestandardnih alata (algoritama) u asimilaciji podataka, kao što je teorija upravljanja (eng. *control theory*), kojim se rašava problem kontinualnog usaglašavanja rezultata modela prema merenjima, a sve za potrebe poboljšanja početnih uslova za prognozu a samim tim i bolji rezultata u prognozi.

2.5 Predmet istraživanja i osnovne hipoteze za istraživanje

Na osnovu prethodnog pregleda literature, jasno se vidi potreba, pre svega od strane inženjera iz prakse, za alatima koji omogućavaju bolju procenu početnih uslova, od kojih zavisi i kvalitet rezultata za prognozu. Drugim rečima, vidi se potreba za primenom metoda asimilacije podataka. Sa druge strane, ograničenje koje i dalje postoji u računarskim resursima stvara potrebu za brzim metodama, koje su pogodne za višestruke simulacije na dnevnoj ili satnoj bazi. Pošto trenutno ne postoji relativno jednostavna metoda za asimilaciju podataka, koja je dovoljno brza a opet primenljiva na širok spektar problema, razvijaju se pojedine metode za različite oblasti primene. Istraživanje u okviru ove disertacije bavi se novom metodom za asimilaciju podataka primenom teorije upravljanja. Ovo praktično znači da se teorija upravljanja, koja se najčešće primenjuje za automatsko upravljanje industrijskim procesima, koristi za kontrolu hidrauličkih modela tečenja u otvorenim tokovima, konkretno rečnim tokovima. Prema tome, glavni cilj ovog istraživanja je razvoj i primena brze i relativno jednostavne metodologije za asimilaciju podataka u hidrauličkim linijskim (1D) modelim otvorenih tokova (pre svega rečnih tokova). Kontrola i ažuriranje rezultata modela obaviće se primenom Proporcionalno-Integrativno-Derivativnih (PID) kontrolera (Karl Astrom 2002). Oni se često koriste u oblasti vodnih resursa za upravljanje hidrotehničkim objektima (Litrico i ostali 2003; Ding i ostali 2009; Schwanenberg i ostali 2015; Alarcón i ostali 2018), dok će u ovom istraživanju poslužiti za kontrolu i ažuriranje rezultata modela tečenja. Kako bi se ispunio cilj ovog istraživanja i razvijena metoda primenila, kroz rad je potrebno odgovoriti na sledeće istraživačke zadatke (istraživačka pitanja):

- Zadatak 1: Dati odgovor na pitanje da li predložena metodologija ispunjava postavljeni zahtev da proračuni budu brzi uz zadovoljavajuću tačnost i stabilnost? Odgovor na ovo istraživačko pitanje moguće je dati isključivo poređenjem sa nekom standardnom asimilacionom metodom (u ovom slučaju EnKF). Takođe, potrebno je detaljno opisati indirektni, fizički zasnovani pristup za asimilaciju podataka primenom PID kontrolera i definisati kriterijume prema kojima se poredi metode asimilacije podataka.
- Zadatak 2: Ispitati koja struktura PID kontrolera je odgovarajuća za primenu u modelima otvorenih tokova i kako do nje doći
- Zadatak 3: Prikazati kako optimalno podesiti parametre koji figurišu u PID kontrolerima i na osnovu kojih kriterijuma je to moguće uraditi

Kako bi se došlo do odgovora na ova istraživačka pitanja i razvila i primenila brza metodologija za asimilaciju podataka, potrebno je uvesti određene hipoteze na kojima je bazirana celokupna metodologija u ovom istraživanju. Polazne hipoteze su:

- Hipoteza 1: Model tečenja u otvorenim tokovima je dobro kalibrisan i zbog toga pri asimilaciji nije potrebno ažurirati parametre modela (Maningova hrapavost, lokalni

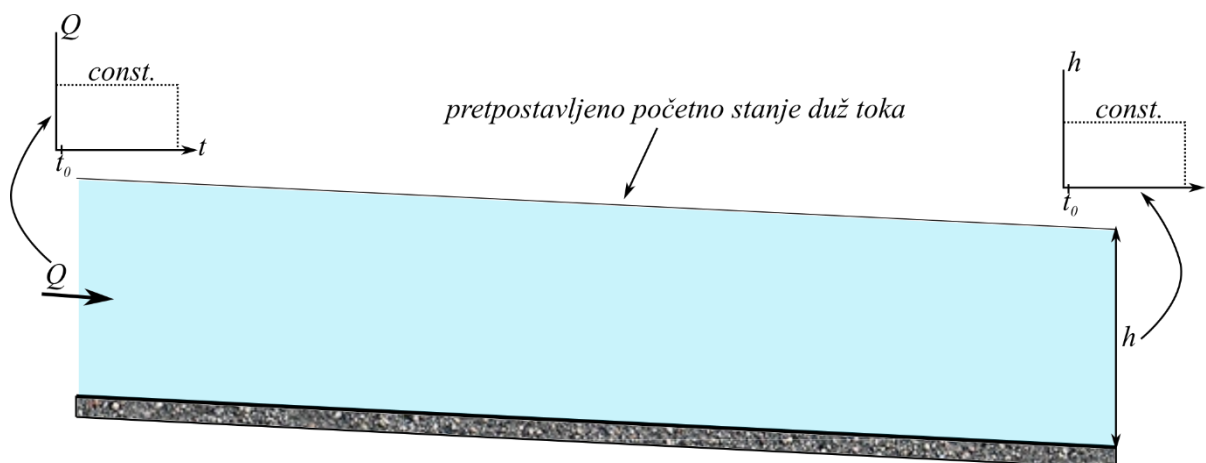
gubici). Na osnovu ovoga može se usvojiti da je jedini izvor neodređenosti modela neodređenost ulaznih podataka (početni i granični uslovi).

- Hipoteza 2: Nivoi vode su osnovni pokazatelj stanja otvorenog toka, čime se asimilacija podataka u ovom istraživanju svodi na usaglašavanje nivoa vode dobijenih modelom sa izmerenim nivoima vode na vodomernim stanicama. Na osnovu ovoga dodatno se može tvrditi da je merenjem nivoa vode, kao pokazatelja stanja sistema, moguće proceniti sve ostale veličine kojima se dodatno može opisati stanje sistema (npr. protok). Takođe, umesto standardnih, statistički zasnovanih metoda asimilacije podataka moguće je primeniti indirektni, fizički zasnovani pristup asimilaciji podataka korišćenjem teorije upravljanja (PID kontroleri)
- Hipoteza 3: Neodređenost merenih nivoa u sistemu (reka, kanal...) je višestruko manja od neodređenosti modela koja je uzrokovana neodređenošću graničnih uslova u modelu (ulazni hidrogrami, hidrogrami sa pritoka, bočni dotoci, krive protoka). Uvođenjem ove hipoteze, nije potrebno upoređivati neodređenost rezultata modela i neodređenost merenja (što je neizostavni korak standardnih asimilacionih metoda), čime se značajno može redukovati vreme proračuna.

3 Metodologija

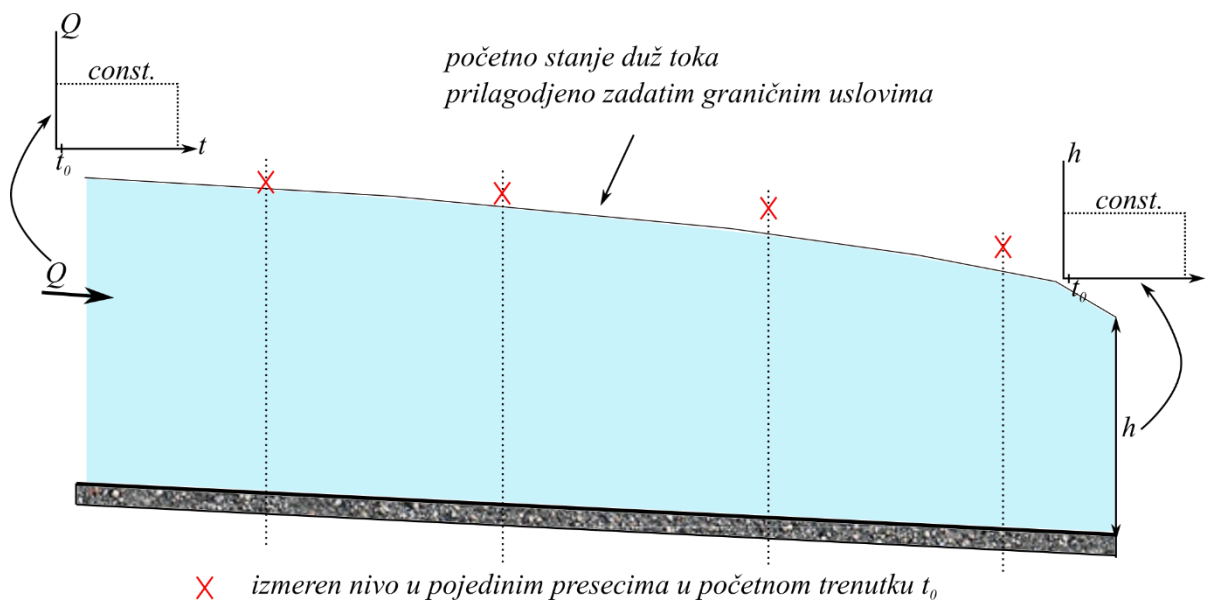
3.1 Formulacija problema – opšti prikaz

Dominantan izvor neodređenosti pri korišćenju hidrauličkih modela je procena početnih uslova, od koje dobrim delom zavise i rezultati (Hipoteza 1). Procena početnih uslova (inicijalizacija) podrazumeva da se odrede vrednosti svih promenljivih koje opisuju stanje na domenu koji se razmatra, u početnom trenutku t_0 . Kod linijskih (1D) modela sa mirnim tečenjem početni uslovi se najčešće dobijaju iz proračuna ustaljenog tečenja za date granične uslove: u modelu se najčešće zadaje konstantan protok na uzvodnom kraju i konstantan nivo na nizvodnom kraju (Slika 2) a zatim se modelom u više iteracija odredi odgovorajući ustaljeni režim. Kao rezultat, model konvergira ustaljenom režimu za koji se usvaja da je početno stanje (Slika 3).



Slika 2. Početni uslovi na uzvodnom i nizvodnom kraju 1D modela u mirnom toku

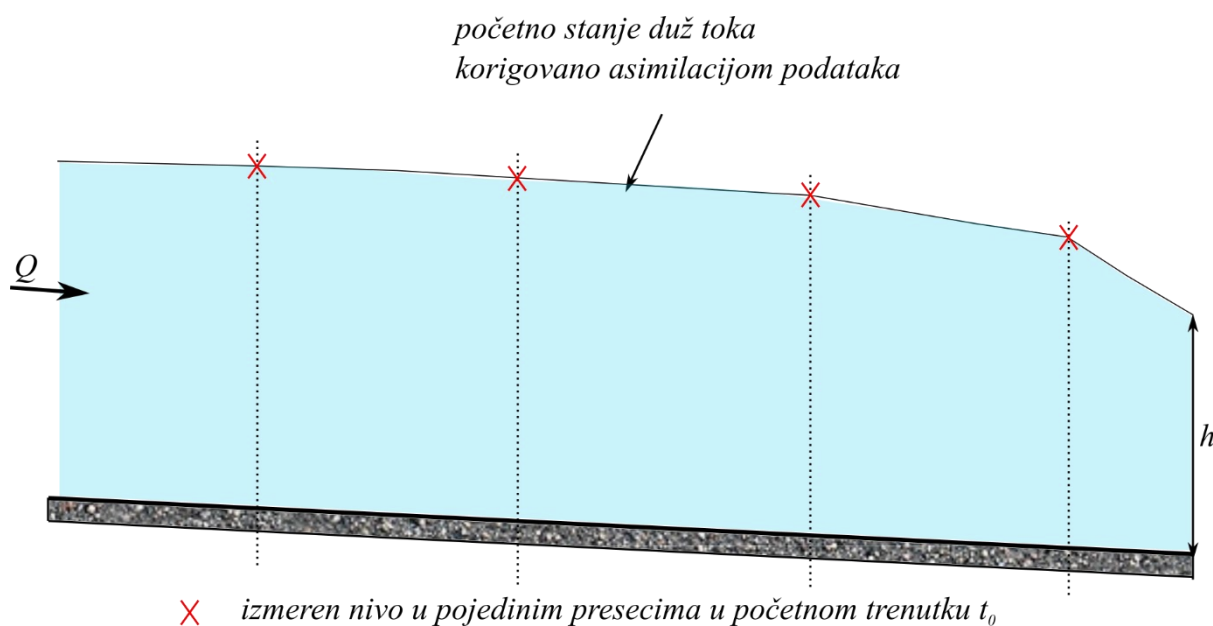
Problem kod ovakvog pristupa je što se zanemaruje to da li taj ustaljeni režim na celom domenu odgovara izmerenim podacima (nivoima ili protocima) na pojedinim lokacijama, što najčešće nije slučaj (Slika 3, sa X su označeni izmereni nivoi u početnom trenutku).



Slika 3. Neslaganje procenjenih početnih uslova dobijenih standardnim postupkom sa izmerenim podacima na pojedinim lokacijama

Takođe, na relativno velikim rečnim deonicama se ne može sa sigurnošću tvrditi da se ostvaruje ustaljeni režim. Ovo navodi na to da bi za početni uslov bolje bilo pronaći trenutak iz neustaljenog režima u kome stanja u modelu odgovaraju izmerenom, odnosno dovesti model do stanja (u neustaljenom režimu) koje odgovara izmerenom stanju.

Na osnovu toga, u slučajevima gde je to moguće, kada su dostupna prethodna merenja (neki period unazad od trenutka kada se radi prognoza) moguće je pokrenuti model ranije od traženog „nultog“ trenutka. Rezultati dobijeni modelom (npr. nivoi) mogu se prilagođavati prema izmerenim podacima tako što će se menjati prethodna stanja modela. Taj proces definiše se kao asimilacija podataka. Kao rezultat dobija se početni uslov za prognozu koji više odgovara stvarnom, izmerenom, stanju (Slika 4) na prirodnom toku gde se u najvećem broju slučajeva javlja neustaljen režim tečenja. Postupak kojim se vrši promena stanja u modelu i kojim se postiže smanjenje razlike između rezultata modela i izmerenih stanja zavisi od asimilacione metode koja se primenjuje.

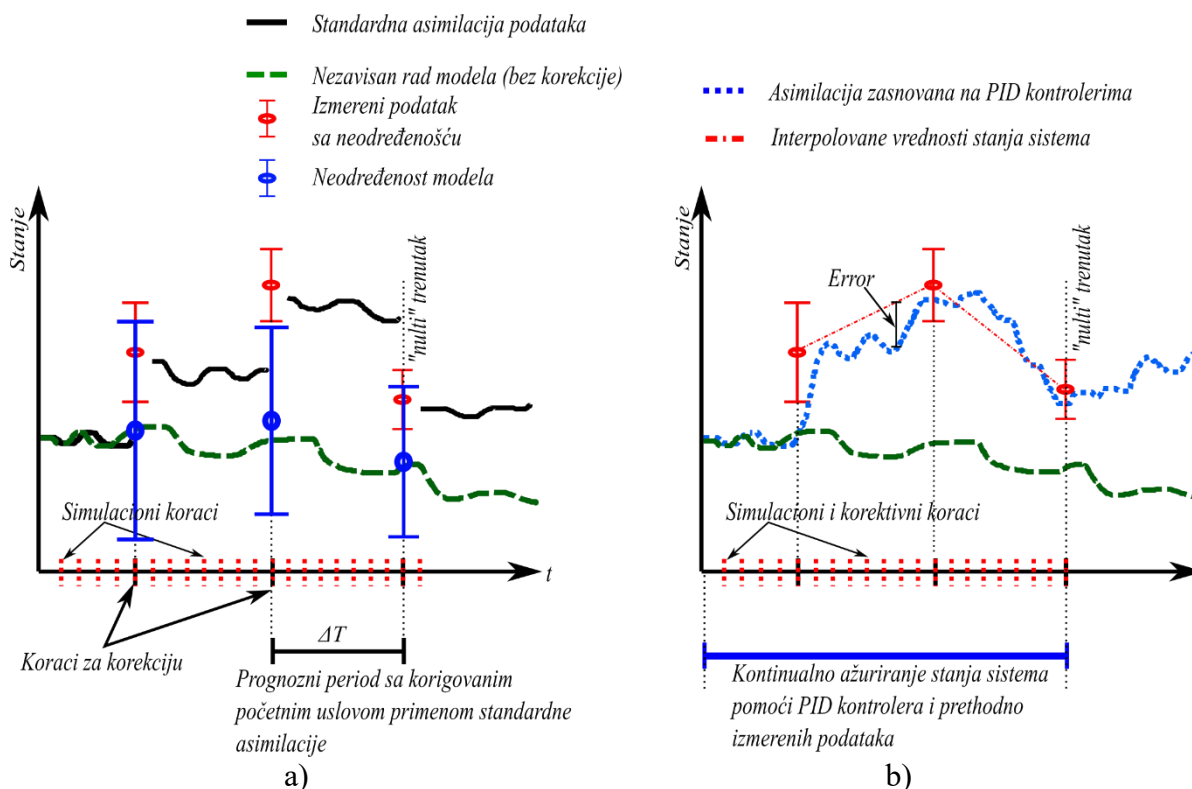


Slika 4. Početni uslov nakon primenjene asimilacije podataka

Standardne metode asimilacije podataka (npr. Kalmanov filter, Ensemble Kalman Filter, Particle Filter) mogu se opisati na osnovu dva koraka koji se ponavljaju tokom cele simulacije u asimilacionom periodu. Prvi korak, prognoza (eng. *forecast*) je onaj deo simulacije kada se model samostalno pušta da radi u periodu kada nema merenja ili između dva merena podatka. U ovom periodu rezultati promenljivih koje opisuju stanje modela dobijaju se na osnovu modela i ulaznih podataka koje pokreću model (eng. *model forcings*), kao što su dotoci. Sledeći korak, korekcija (eng. *correction*), sprovodi se u onom momentu kada su u asimilacionom periodu dostupni izmereni podaci, prema kome se može prilagoditi stanje u modelu (Slika 5a). U periodu kada nema merenih podataka ne sprovodi se usaglašavanje modela i merenja.

U istraživanju u okviru ove disertacije koristi se novi, indirektni pristup, u kome je potrebno modifikovati asimilacionu proceduru koja se koristi kod standardnih metoda (*forecast-correct*). Metoda za asimilaciju podataka razvijena u ovom istraživanju primenjuje drugačiji pristup od standardnih metoda. Tim pristupom se stanje modela kontinualno prilagođava izmerenim stanjima, pri čemu se ne mogu jasno razdvojiti koraci prognoze i korekcije (Slika 5b). Razlog zbog kog se uvodi ova modifikacija je zbog prirode PID kontrolera (Karl Astrom 2002; Skogestad 2004), koji se koriste kao element koji koriguje rezultate modela. Rad jednog ovakvog elementa zahteva konstantan uvid u prethodne korekcije koje je obavio (mehanizam

povratne sprege – eng. *feedback mechanism*). Zbog toga, nemoguće je sprovesti proceduru po kojoj se jasno razlikuju trenuci u kojima ima korekcija rezultata i trenuci u kojima model radi samostalno.



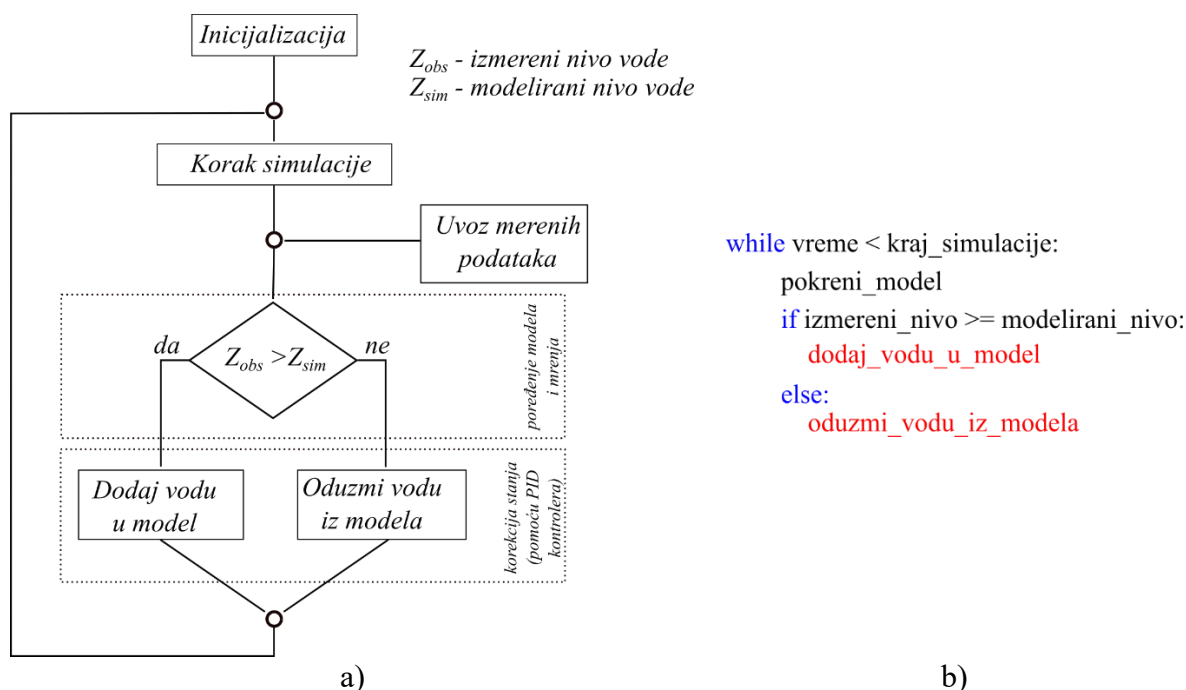
Slika 5. (a) Procedura standardnih metoda asimilacije podataka (predikcija-korekcija) i (b) modifikovana procedura asimilacije (kontinualna korekcija) (Milašinović i ostali 2020)

Standardne metode asimilacije podataka prilagođavanje rezultata modela (nivoa) obavljaju na osnovu izmerenih podataka, neodređenosti tih podataka i procenjene neodređenosti modela, u svakom koraku kada su mereni podaci dostupni. U slučajevima kada je neodređenost merenih podataka manja od neodređenosti modela, prilagođavanje se vrše dajući veću težinu izmerenim podacima. Kada je neodređenost modela manja od neodređenosti merenih podataka (npr. zbog neke greške u merenjima), onda se više značaja daje rezultatima modela i oni praktično ostaju nepromenjeni. Celokupan ovakav pristup zasnovan je na pretpostavci da nema dominantnog izvora neodređenosti modela i da se ne može sa sigurnošću usvojiti pretpostavka da su sva merenja apsolutno pouzdana. Zbog toga je potrebno vršiti procenu neodređenosti modela višestrukim ponavljanjem simulacija na svakom koraku. Ovo često dovodi do prevelikog utroška računarskog vremena, zbog čega se standardne metode izbegavaju u praksi.

U pojedinim situacijama, kada je neophodno obezbediti brze proračune, potrebno je uvesti odgovarajuće pretpostavke i pojednostavljenja. Metodologija za brzu asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova koja je predmet ovog istraživanja, razvijena je koristeći pretpostavku da su mereni podaci (posebno mereni nivoi) znatno pouzdaniji reprezent stanja sistema nego rezultati modela (Hipoteza 2 i Hipoteza 3). Prema tome, korak u kome se porede merena neodređenost i neodređenost modela (koji odnosi najviše računarskog vremena) se preskače, dajući apsolutnu težinu merenim podacima. Na taj način omogućava se značajno ubrzanje u proračunu (Milašinović i ostali 2020). Druga pretpostavka uvedena za potrebe nove metodologije je ta da postoji dominantan izvor neodređenosti modela. U velikom broju slučajeva, kada se modelira neki rečni tok, velika je nepouzdanost graničnih uslova. Konkretno, velika je nepouzdanost ulaznih dotoka (uzvodni i bočni dotoci), posebno u vreme velikih voda

(loše procenjeni dotoci, loša vremenska rezolucija). Zajedno sa tim nepouzdati su i početni uslovi, što dovodi do loših procena hidrauličkih veličina pri prognozi. Prema tome, uvodi se pretpostavka po kojoj su nedovoljno dobro poznavanje dotoka (ili apsolutno nepoznavanje bočnih dotoka), kao i nepouzdati granični uslovi vezani za nivo (nivogrami ili krive protoka), glavni izvor nepouzdanosti hidrauličkih modela tečenja u otvorenim tokovima, dok su parametri modela dobro procenjeni kroz kalibraciju modela.

Na osnovu ovih pretpostavki razvijena je metodologija za brzu asimilaciju podataka kojom se problem neodređenosti graničnih i početnih uslova može rešiti fizički zasnovanim pristupom. 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 fali 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 6). 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.



Slika 6. Opšti princip usaglašavanja rezultata modela i merenja primenom teorije upravljanja: a) algoritam, b) pseudokod

U samoj suštini rada i standardnih asimilacionih metoda i nove metode koju predlaže ova disertacija je usaglašavanje stanja modela u skladu sa merenjima nivoa, drugim rečima, o promeni zapremine vode koja se nalazi u modelu. U standardnim asimilacionim metodama to usaglašavanje je statistički zasnovano (detalji se mogu pogledati u Poglavlju 3.3) 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.

3.2 1D model tečenja

Potrebe za brzim proračunima često opravdavaju korišćenje pojednostavljenih alata, pri čemu se često, u zavisnosti od problema koji se rešava mogu koristiti i uprošćeni modeli tečenja (Milasinović i ostali 2018; 2019). Koriste se Sen-Venanove jednačine (1) i (2). U ovom istraživanju dinamička jednačina (2) se uprošćava izostavljanjem pojedinih članova. Time se kao 1D model tečenja u otvorenom toku koristi se model difuzionog talasa (eng. *diffusive wave model*).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

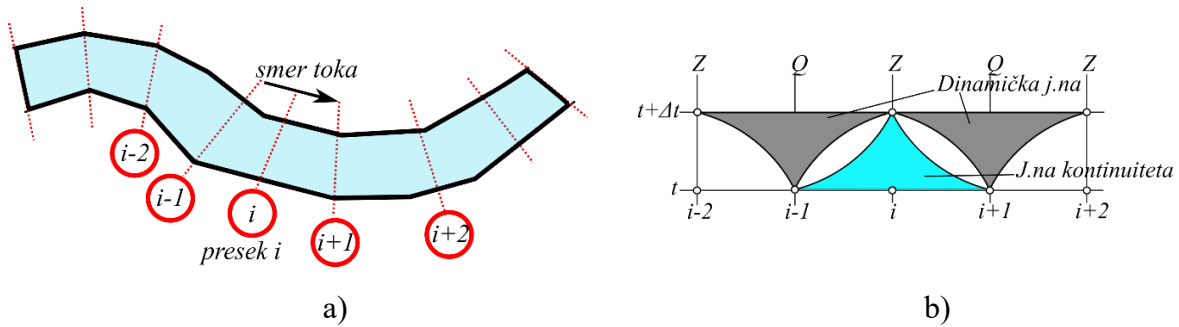
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gn^2 \frac{Q|Q|}{A^2 \cdot R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

U jednačinama (1) i (2) x je prostorna koordinata, t vreme, A površina poprečnog preseka, Q protok, q bočni dotok, Z nivo slobodne površine vode (pijezometarska kota), g gravitaciono ubrzanje, R hidraulički radijus, β koeficijent neravnomernosti brzine po poprečnom preseku i n ekvivalentna Manningova hrapavost (Costabile i Macchione 2012). Treba napomenuti da je u dinamičkoj jednačini izostavljen uticaj količine kretanja koja dolazi od bočnih dotoka. Uticaj bočnog dotoka (raspodeljeni bočni dotok) može se videti samo u bilansnoj jednačini, tj. jednačini kontinuiteta (1). Takođe, uticaj pritoka na ušćima predstavljen je kroz jednačinu kontinuiteta.

U svom izvornom obliku, model difuzionog talasa uzima u obzir samo članove koji se odnose na uticaj trenja, sile težine u pravcu toka i sile pritiska. Međutim, kako bi se ovaj model primenio i u slučajevima kada je potrebno uzeti u obzir i inercijalne uticaje (ubrzanje toka) koristi se modifikacija modela difuzionog talasa predstavljena u istraživanju Petrović i ostali (1994), koja se koristi u ovom istraživanju. Ovde se uticajima trenja, težine i pritiska dodaje i uticaj lokalnog ubrzanja ($\partial Q/\partial t$). Prema tome, dinamička jednačina matematičkog modela difuzionog talasa ima sledeći oblik:

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

Za diskretizaciju jednačina matematičkog modela difuzionog talasa i formiranje numeričkog modela koristi se podela domena na preseke (Slika 7a) uz korišćenje smaknute, eksplicitne numeričke sheme (Slika 7b).



Slika 7. (a) Diskretizacija računskog domena na preseke i (b) smaknuta numerička shema

Primenom ove numeričke sheme dobijaju se diskretizovane jednačine numeričkog modela koje se koriste za simulaciju:

$$Z_i^{t+\Delta t} = Z_i^t - \frac{\Delta t}{B_i^t} \cdot \frac{Q_{i+1}^t - Q_{i-1}^t}{2\Delta x} \quad (4)$$

$$Q_{i+1}^{t+\Delta t} = \frac{\frac{Q_{i+1}^t}{g \left(\frac{A_{i+2}^{t+\Delta t} + A_i^{t+\Delta t}}{2} \right) \Delta t} - \frac{Z_{i+2}^{t+\Delta t} - Z_i^{t+\Delta t}}{2\Delta x}}{\frac{1}{g \left(\frac{A_{i+2}^{t+\Delta t} + A_i^{t+\Delta t}}{2} \right) \Delta t} + \frac{n^2}{\left(\frac{A_{i+2}^{t+\Delta t} + A_i^{t+\Delta t}}{2} \right)^2 \left(\frac{R_{i+2}^{t+\Delta t} + R_i^{t+\Delta t}}{2} \right)^{4/3}}}} \cdot |Q_{i+1}^t| \quad (5)$$

gde indeks i predstavlja prostornu lokaciju (i -ti presek), B predstavlja širinu vodenog ogledala u poprečnom preseku, t u eksponentu predstavlja trenutno vreme, Δt vremenski korak (vremenska rezolucija numeričkog modela), pri čemu $t+\Delta t$ predstavlja naredni trenutak, a Δx je prostorni korak (prostorna rezolucija). Primena smaknute numeričke sheme znači da se veličine koje je potrebno sračunati (nivoi Z i protoci Q) računaju u naizmeničnim presecima (na preskok). Primenom ovog numeričkog modela cilj je da se sračunaju nivoi u svim presecima u kojima su oni definisani i protoci u odgovarajućim presecima u svakom narednom trenutku. Ti rezultati biće usaglašeni sa merenim podacima u skladu sa metodom za asimilaciju podataka koja se koristi.

3.3 Standardna metoda za asimilaciju podataka – Ensemble Kalman Filter

Kako bi se nova metoda za asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova testirala i dokazalo da se njenom primenom dobija značajno ubrzanje proračuna, što je postavljeno kao osnovna potreba za razvijanjem ovakve metode (Zadatak 1), potrebno je tu novu metodu uporediti (eng. *benchmark*) sa nekom od standardnih metoda koje se koriste. Pregledom literature može se uočiti da je u istraživanjima iz oblasti upravljanja vodnim resursima, gde se primenjuje asimilacija podataka, najzastupljenija metoda Ensemble Kalman Filter (EnKF), te je ona uzeta kao reper za poređenje.

EnKF metoda koja se koristi kao referentna u ovom istraživanju vrši direktnu promenu stanja modela koje je predstavljeno nivoima vode u svim presecima u kojima se računa nivo. Dva koraka se koriste u asimilaciji EnKF metodom. Prvi korak, prognoza (*forecast*) se koristi da se prethodno stanje modela (u trenutku t) propagira u novo stanje (u trenutku $t+\Delta t$) koristeći model M . Drugi korak, korekcija (*correction*) se sprovodi u onim trenucima kada su dostupna

merjenja, pri čemu se procenjuje i merna neodređenost merenih podataka i neodređenost modela. Ukoliko u datom (narednom) trenutku nema merenih podataka kao reprezent stanja sistema usvajaju se vrednosti dobijene modelom.

Kako bi se koristila EnKF metoda za korekciju stanja u modelu, potrebno je formirati vektor stanja $\mathbf{X} = [x_i]$, ($i = 1, 2, \dots, N_{sv}$), gde x_i predstavlja nivo u preseku i a N_{sv} predstavlja broj promenljivih koje opisuju stanje u modelu (broj preseka u kom se računa nivo vode; sv – *state variable*). Kao što je pomenuto, Kalmanov filter, u bilo kojoj varijanti, zahteva procenu neodređenosti modela. Kod lineranih modela je to lakše proceniti nego kod nelinearnih modela. Kada se koristi EnKF metoda, neodređenost modela sprovodi se višestrukim ponavljanjem proračuna na svakom koraku (Monte-Carlo simulacije) gde se svaki član vektora stanja \mathbf{X} predstavlja skupom vrednosti (ansambl, eng. *ensemble*) koji se dobija dodavanjem Gausovog šuma (šuma koji prati Gausovu raspodelu). Stoga, vektor stanja \mathbf{X} se koriguje i dobija formu $\mathbf{X} = [x_{ij}]$, ($i = 1, 2, \dots, N_{sv}$; $j = 1, 2, \dots, N_{em}$), gde j označava j -ti član skupa a N_{em} je broj članova skupa (ansambla; em – *ensemble member*) kojim se opisuje stanje u svakom preseku modela (odnosno u svakom preseku gde se računa nivo vode).

Kada je vektor stanja definisan, svi članovi skupova se propagiraju u naredni vremenski trenutak, koristeći model \mathbf{M} . Ovaj proces predstavljen je jednačinom (6):

$$\mathbf{X}_e^{t+\Delta t} = \mathbf{M}(\mathbf{X}^t, f) \quad (6)$$

gde f predstavlja ulazne podatke koji su pokretači modela (eng. *model forcing data*), kao što su dotoci na uzvodnom kraju ili bočni dotoci, t u eksponentu predstavlja trenutno vreme a $t+\Delta t$ naredni trenutak. Indeks e govori da vrednosti stanja u modelu, grupisane u vektor stanja \mathbf{X} , dobijen primenom jednačine (6) je procenjeno (eng. *estimated*) samo na osnovu modela. Konačan rezultat $\mathbf{X}^{t+\Delta t}$ se dobija kada se ovaj vektor prilagodi merenjima u koraku korekcije. Da bi se to sprovedo potrebno je proceniti neodređenost modela.

Kao reprezent neodređenosti modela koristi se matrica kovarijanse $\mathbf{P} = [P_{ij}]_{N_{sv} \times N_{sv}}$ (N_{sv} je broj promenljivih u vektoru stanja) u kojoj se računa kovarijansa između svih skupova (ansamblovi) koji definišu vektor stanja \mathbf{X} . Ovo se radi pod pretpostavkom da statistika svakog ansambla dovoljno dobro prikazuje neodređenost modela. Matrica kovarijanse modela računa se na osnovu jednačine (7):

$$P_{ij} = \frac{1}{N_{em} - 1} \sum_{k=1}^{N_{em}} (x_{ik} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jk} - \bar{x}_j)^T, \quad i, j = 1, \dots, N_{sv} \quad (7)$$

gde je P_{ij} kovarijansa između ansambla koji predstavlja stanje u i -tom članu vektora stanja i ansambla koji predstavlja stanje u j -tom članu vektora stanja ($i, j=1, 2, \dots, N_{sv}$). \bar{x}_i je srednja vrednost i -tog ansambla, a \bar{x}_j je srednja vrednost j -tog ansambla. Operator T u eksponentu označava operaciju transponovanja matrice.

Sledeći korak u EnKF proceduri je da se sračuna matrica kovarijansi za merene podatke $\mathbf{B}_{obs} = [B_{ij}]_{N_{obs} \times N_{obs}}$, gde je N_{obs} broj mernih lokacija (to su preseki u kojima postoji merenje), koja se računa na osnovu jednačine (8). Na osnovu neodređenosti merjenja koja se zadaje opseg u kom se može naći izmereni podatak, formiraju se ansamblovi za svako merno mesto perturbacijom merjenja (pod pretpostavkom da merjenja prate normalnu raspodelu), i sve se

grupiše upravo u matricu kovarijansi merenja. Ukoliko u traženom trenutku mereni podaci nisu dostupni, matrica kovarijanse merenja je jednaka nula-matrici.

$$B_{ij} = \frac{1}{N_{obs_em} - 1} \sum_{k=1}^{N_{obs_em}} (y_{ik} - \bar{y}_i) \cdot (y_{jk} - \bar{y}_j)^T, \quad i, j = 1, \dots, N_{obs} \quad (8)$$

U jednačini (8), N_{obs} je broj mernih lokacija sa kojih su dostupni podaci, N_{obs_em} je broj perturbovanih merenja u okviru jednog ansambla. Perturbacije se dobijaju dodavanjem Gausovog šuma ε na osnovu jednačine (9) (Burgers i ostali 1998). y_{ik} je perturbovano merenje na i -toj mernoj lokaciji, y_{jk} perturbovano merenje na j -toj mernoj lokaciji, a \bar{y}_i i \bar{y}_j srednje vrednosti merenja na i -toj i j -toj mernoj lokaciji.

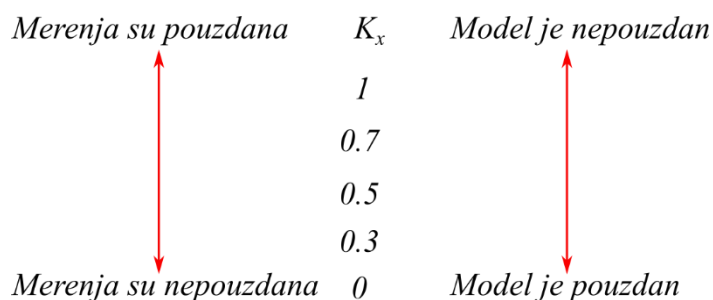
$$y_{ik} = y_i + \varepsilon, \quad k = 1, 2, \dots, N_{obs_em} \quad (9)$$

Na ovaj način sračunate su matrica kovarijansi modela, kao reprezent neodređenosti modela, i matrica kovarijansi merenja, kao reprezent neodređenosti merenja. Pri primeni EnKF metode, neophodno je računati ove matrice u slučajevima kada je stanje sistema predstavljeno većim brojem promenljivih (što je u praksi najčešće slučaj) i kada postoji više mernih lokacija. U specijalnim slučajevima, kada se stanje nekog sistema može aproksimirati jednom promenljivom, ceo postupak se značajno pojednostavljuje.

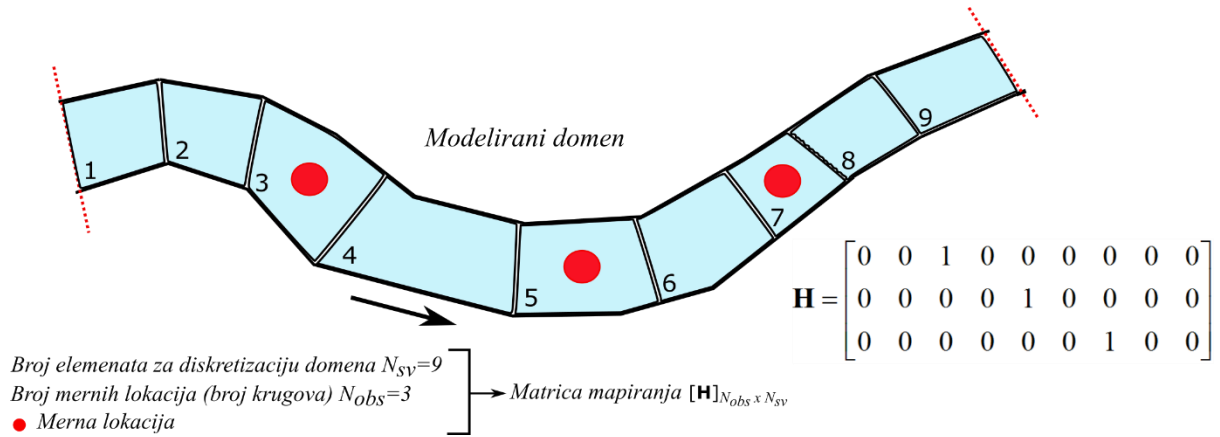
Kada je završen proračun matrica kovarijansi, sledeći korak je da se sračuna veličina koja se u teoriji Kalmanovog filtera naziva se Kalmanov doprinos (eng. *Kalman gain*) koji predstavlja koeficijent kojim se daje određena težina izmerenim podacima i rezultatima dobijenih modelom. Računa se na osnovu jednačine (10). Može imati vrednosti u opsegu od 0 do 1. Kada teži 0, veća težina, prilikom usaglašavanja, daje se podacima dobijenim modelom (zanemaruje se uticaj merenja zbog lošijeg kvaliteta). Kada teži jedinici, veća se težina daje izmerenim podacima (Slika 8).

$$\mathbf{K}_x = \mathbf{P} \cdot \mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{H} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{B}_{obs})^{-1} \quad (10)$$

U jednačini (10), \mathbf{K}_x je Kalmanov doprinos (eng. *Kalman gain*), \mathbf{P} je matrica kovarijanse modela, \mathbf{B}_{obs} matrica kovarijansi merenja a \mathbf{H} je matrica mapiranja, kojom se mereni podaci ubacuju na odgovarajuća mesta u modelu (Slika 9). T je operator transponovanja matrice.



Slika 8. Shematski prikaz uticaja Kalmanovog doprinosa (*Kalman gain*) na korekciju rezultata modela



Slika 9. Definicija matrice mapiranja

Kada se sračuna Kalmanov doprinos, može se doći i do konačnog, korigovanog, vektora stanja $\mathbf{X}^{t+\Delta t}$, na osnovu sledeće jednačine:

$$\mathbf{X}^{t+\Delta t} = \mathbf{X}_e^{t+\Delta t} + \left[\mathbf{K}_x \cdot (\mathbf{Y} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_e^{t+\Delta t}) \right] \quad (11)$$

gde je $\mathbf{Y} = [y_i]$, ($i = 1, 2, \dots, N_{obs}$), vektor osmotrenih podataka.

Nakon ovog koraka, ponovo bi trebalo preći na propagaciju svih ansamblova iz vektora stanja u naredni vremenski trenutak pomoću modela. Međutim, iako jednačina (11) daje korigovane vrednosti vektora stanja (što je i cilj asimilacije podataka), često u praksi ovo ne daje zadovoljavajuće rezultate.

Čest problem pri primeni metode EnKF je limitiranost veličine ansamblova kojima se aproksimira stanje sistema, što je posledica pretpostavke da ansamblovi prate normalnu raspodelu. U tim slučajevima, ovaj problem značajno utiče na performanse Kalmanovog filtera, i može se dogoditi da neodređenost modela, sračunata kroz matricu kovarijansi stanja modela, bude (veštački) višestruko manja od neodređenosti merenja. Na taj način merenja se praktično ignorišu u procesu asimilacije i rezultati postaju jednaki onima koje bi se dobile kada model radi samostalno. U slučajevima kada je više nego jasno da rezultate modela treba promeniti u skladu sa merenjima (kada su merenja pouzdana) potrebno je nekako rešiti ovaj problem. On se rešava tako što se koriste metode inflacije (povećavanja), kojima se vrednosti koje se nalaze u matrici kovarijansi stanja povećavaju tako da budu veće od neodređenosti merenja, čime će se sprečiti divergencija filtera (Anderson i Anderson 1999; Anderson 2007). U ovom istraživanju koristiće se metoda inflacije najmanjih kvadrata drugog reda (Second-order Least Square – SLS inflation) prikazana u istraživanju Wu i Zheng (2018). Prvi korak u ovoj metodi je da se sračunaju reziduali \mathbf{d} , razlika između izmerenih podataka i procenjenih modelom na osnovu jednačine (6) u prognozi prema sledećoj jednačini:

$$\mathbf{d} = \mathbf{Y} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_e^{t+\Delta t} \quad (12)$$

Kada se sračunaju reziduali \mathbf{d} , prelazi se na računanje faktora inflacije, posebno faktora λ za matricu kovarijanse modela i faktora μ za matricu kovarijansi merenja. Oni se računaju na osnovu sledećih jednačina:

$$\lambda = \frac{\text{Tr}(\mathbf{d}^T \mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}^T \mathbf{d}) \cdot \text{Tr}(\mathbf{B}_{obs}^2) - \text{Tr}(\mathbf{d}^T \mathbf{B}_{obs} \mathbf{d}) \cdot \text{Tr}(\mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}^T \mathbf{B}_{obs})}{\text{Tr}(\mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}^T \mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}^T) \cdot \text{Tr}(\mathbf{B}_{obs}^2) - \text{Tr}(\mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}^T \mathbf{B}_{obs})^2} \quad (13)$$

$$\mu = \frac{\text{Tr}(\mathbf{HPH}^T \mathbf{HPH}^T) \cdot \text{Tr}(\mathbf{d}^T \mathbf{B}_{obs} \mathbf{d}) - \text{Tr}(\mathbf{d}^T \mathbf{HPH}^T \mathbf{d}) \cdot \text{Tr}(\mathbf{HPH}^T \mathbf{B}_{obs})}{\text{Tr}(\mathbf{HPH}^T \mathbf{HPH}^T) \cdot \text{Tr}(\mathbf{B}_{obs}^2) - \text{Tr}(\mathbf{HPH}^T \mathbf{B}_{obs})^2} \quad (14)$$

gde je Tr operator koji označava sumu elemenata na glavnoj dijagonali matrice – trag matrice (eng. *trace of a matrix*), dok su ostali elementi i operatori koji figurišu u ove dve jednačine već ranije definisani.

Kada se sračunaju faktori inflacije, pomoću njih se modifikuje jednačina kojom se računa Kalmanov doprinos (gain) i dobija se nov oblik, \mathbf{K}_X^{SLS} :

$$\mathbf{K}_X^{SLS} = \lambda \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{H} \cdot \lambda \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{H}^T + \mu \cdot \mathbf{B}_{obs})^{-1} \quad (15)$$

Na ovaj način eliminiše se problem prebrzog smanjenja neodređenosti modela kada se koristi osnovni postupak za računanje Kalmanovog doprinosa.

Drugi problem koji se veoma često javlja kada se koristi metoda EnKF je pojava „lažnih“ (eng. *spurious*) korelacija između ansamblova u vektoru stanja. Ove „lažne“ korelacije dobijaju se na osnovu kovarijansi između ansamblova koje se dobijaju samo na osnovu statističke analize, a da se pritom ne uzima u obzir da li je ta korelacija fizički moguća. Praktičnim jezikom, promene rezultata modela pomoću metoda asimilacije podataka su najpouzdanije u presecima modela čija se lokacija poklapa sa mernim lokacijama. Korekcije u ostalim presecima su posledica korelacija koje se dobijaju iz matrice kovarijansi, a ne direktnog poređenja sa merenim podacima. Tu nastaje problem, jer se promena stanja u jednom preseku ne može odmah osetiti u udaljenim presecima, jer je zbog prirode procesa potrebno vreme da se svaki poremećaj propagira. Ako se koriste samo jednačine (10) ili (15) za proračun Kalmanovog doprinosa, javlja se pomenuti problem, što dovodi do nestabilnosti modela (oscilacije i pojava fizički nemogućih nivoa vode). Kako bi se ovo rešilo koristi se postupak lokalizacije (Petrie i Dance 2010), kojom se usaglašavanje nivoa u modelu sa merenjima ograničava samo na preseke čija lokacija odgovara mernim lokacijama, a sa udaljenjem od tog preseka promene nivoa se smanjuju. Sve promene nivoa se na ostali deo računskog prostora prostiru kroz jednačine koje opisuju prirodne procese. Ova metoda lokalizacije eliminiše „lažne“ korelacije (Hamill i ostali 2001; B. Wang i ostali 2018). Proračun Kalmanovog doprinosa, tačnije matrica kovarijansi vektora stanja, modifikuje se uvođenjem matrice korelacije $\boldsymbol{\rho} = [\rho_{ij}]_{N_{sv} \times N_{sv}}$, ($i, j = 1, 2, \dots, N_{sv}$) (Gaspari i Cohn 1999), koja se računa na osnovu sledeće jednačine:

$$\rho_{ij} = \begin{cases} -\frac{1}{4}(l_{ij}/c)^5 + \frac{1}{2}(l_{ij}/c)^4 + \frac{5}{8}(l_{ij}/c)^3 - \frac{5}{3}(l_{ij}/c)^2 + 1, & 0 \leq l_{ij} \leq c \\ \frac{1}{12}(l_{ij}/c)^5 - \frac{1}{2}(l_{ij}/c)^4 + \frac{5}{8}(l_{ij}/c)^3 - \frac{5}{3}(l_{ij}/c)^2 - 5(l_{ij}/c) + 4 - \frac{2}{3}(l_{ij}/c)^{-1}, & c \leq l_{ij} \leq 2c \\ 0, & l_{ij} \geq 2c \end{cases} \quad (16)$$

gde je l_{ij} rastojanje između svakog i -tog i svakog j -tog preseka, dok je c konstantna dužina koja služi kao granica do koje važi zavisnost data u matrici korelacije (ova veličina nema univerzalnu vrednost, već se procenjuje od primera do primera). Prema ovome, proračun Kalmanovog doprinosa, sa lokalizacijom, \mathbf{K}_X^{loc} sprovodi se sledećom jednačinom:

$$\mathbf{K}_X^{loc} = (\boldsymbol{\rho} \circ \mathbf{P}) \cdot \mathbf{H} \cdot [\mathbf{H} \cdot (\boldsymbol{\rho} \circ \mathbf{P}) \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{B}_{obs}]^{-1} \quad (17)$$

Operator „ \circ “ u jednačini (17) označava Šurov ili Adamarov proizvod dve matrice (množe se dve matrice istih dimenzija pri čemu se element jedne matrice množi samo sa elementom koji se nalazi na istoj lokaciji u drugoj matrici).

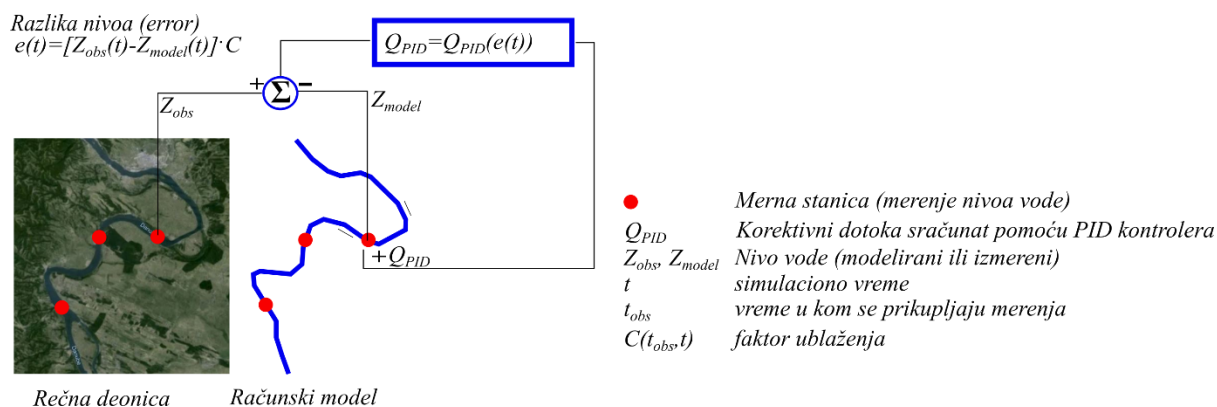
U ovom istraživanju, za proračun Kalmanovog doprinosa, koristi se i opisana metoda inflacije i metoda lokalizacije, prema sledećoj jednačini:

$$\mathbf{K}_X = \lambda \cdot (\rho \circ \mathbf{P}) \cdot \mathbf{H} \cdot [\lambda \cdot \mathbf{H} \cdot (\rho \circ \mathbf{P}) \cdot \mathbf{H}^T + \mu \cdot \mathbf{B}_{obs}]^{-1} \quad (18)$$

Ovako sračunato \mathbf{K}_X koristi se u jednačini (11).

3.4 Metoda asimilacije podataka zasnovana na teoriji PID kontrolera

Problemi koji se javljaju prilikom korišćenja EnKF metode (opisani u prethodnom poglavlju) kao što su relativno složen matematički aparat, veliki obim proračuna i generalno potreba za njihovim ubrzanjem bili su motivacija za razvoj nove asimilacione metode koja koristi indirektan pristup asimilacije nivoa dobijenih modelom. Sračunati nivoi se usaglašavaju sa merenim oduzimanjem ili dodavanjem određene količine vode u model (Slika 6), na mestu koje odgovara mernoj lokaciji, u vidu korektivnog dotoka (Slika 10). 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), upravljanje vodnim resursima u realnom vremenu (Schwanenberg i ostali 2015), upravljanje sistemima za transport i prečišćavanje otpadne vode (Wahab i ostali 2007; Tzoneva 2007) ili upravljanje 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 10. 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:

$$Q_{PID}(t) = Q_{PID}^t = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_{t_0}^t e(t)dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (19)$$

$$e(t) = Z_{obs}(t) - Z_{model}(t) \quad (20)$$

pri čemu se integral u jednačini (19) 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 faktor, $K_p \cdot e(t)$, 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 osilacija 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 faktor, $K_i \cdot \int_{t_0}^t e(t)dt$. 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, $K_d de/dt$. Međutim, sa upotrebom ovog faktora treba biti veoma pažljiv, jer može, takođe, lako izazvati nestabilnost sistema.

U praksi se mogu sresti primene različitih formi PID kontrolera. U zavisnosti od dela kontrolera koji se uzima u obzir, mogu se razlikovati neki od sledećih tipova kontrolera: P kontroler kada se koristi samo proporcionalni faktor, PI kada se koriste proporcionalni i integrativni faktor, PID kontroler kada se koriste sva tri (pored ova tri mogu se koristiti i druge forme, PD, I, ID). Međutim, ne postoji preporuka kada se koja forma kontrolera koristi, pogotovo ne postoji preporuka u specifičnim primenama kao što je primena kontrolera za asimilaciju podataka. Zbog toga je u svakom istraživanju/primeni kontrolera potrebno proveriti i verifikovati koja je to optimalna struktura kontrolera. O ovome će više reči biti u nekom od narednih poglavlja. Takođe, pored određivanja optimalne strukture kontrolera, potrebno je odrediti i optimalne vrednosti koeficijenta K_p , K_i i K_d koji figurišu u jednačini kontrolera (eng. *tuning of the controller*). Za ovo takođe ne postoje univerzalna pravila i detaljnije ispitivanje na ovu temu biće prikazano u ovom istraživanju.

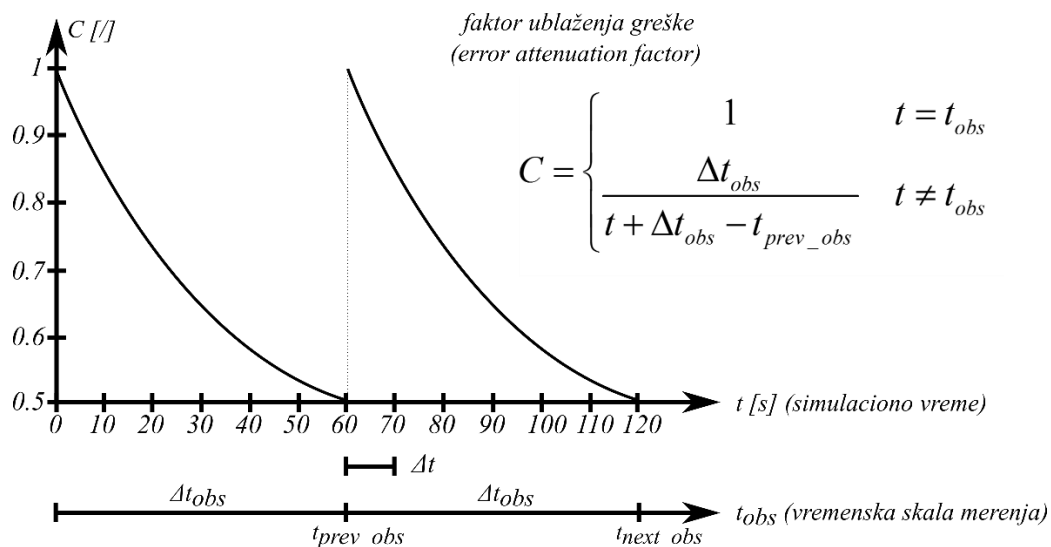
Originalni oblik računanja greške u procesu (razlika izmerenih i modeliranih nivoa vode na mernoj lokaciji), koji je dat jednačinom (20) zasnovan je na pretpostavci da vremenski korak simulacije Δt i vremenski korak sa kojim su prikupljena merenja Δt_{obs} imaju istu vrednost. Ova

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 zadanog 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 zadatak 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 (22) i Slika 11). Njime se PID kontroleri postepeno gase u periodima kada nema pouzdanih (izmerenih) podataka. Prema tome, proračun greške se modifikuje prema sledećim jednačinama:

$$e(t) = [Z_{obs}^*(t) - Z_{model}(t)] \cdot C \quad (21)$$

$$C = \begin{cases} 1 & t = t_{obs} \\ \frac{\Delta t_{obs}}{t + \Delta t_{obs} - t_{prev_obs}} & t \neq t_{obs} \end{cases} \quad (22)$$

U jednačinama (21) i (22) 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.

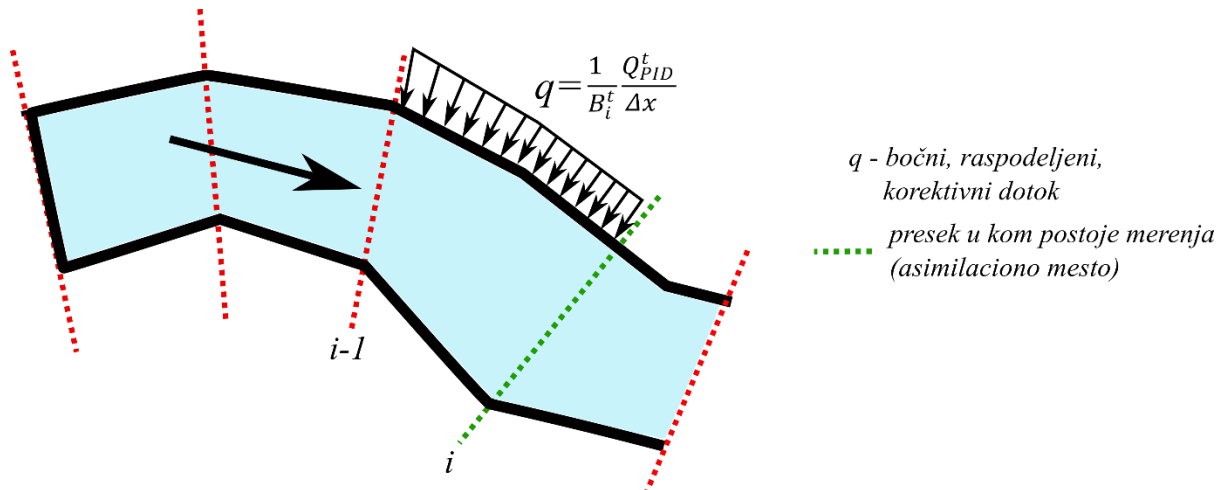


Slika 11. Faktor ublažavanja greške (error attenuation factor). Periodična, diskontinualna funkcija kao mera neodređenosti merenih podataka (minimalna vrednost ovog faktora zavisi od konkretnih vrednosti vremenskog koraka modela i uzorkovanja merenih podataka)

Faktor ublažavanja C u jednačini (21) 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). Pored ovoga, faktor ublaženja može da se iskoristi i kao način za implementaciju ocene kvaliteta podataka (Branisavljević i ostali 2010; Branisavljević i ostali 2011), čime se otvara dodatna mogućnost za implementaciju neodređenosti merenih podataka.

Jednačinama (19) do (21) definisano je kako se računa korektivni dotok Q_{PID} koji se treba ubaciti u model, na mernoj lokaciji, čime će se smanjivati razlike između izmerenih i modeliranih nivoa vode. Sam korektivni dotok, nakon što je sračunat, u model se uvodi preko jednačine kontinuiteta (4) u vidu fiktivnog bočnog dotoka raspodeljenog na deonicu između dva susedna preseka. Zbog toga, jednačina kontinuiteta (4) se modifikuje i dobija sledeći oblik:

$$Z_i^{t+\Delta t} = Z_i^t - \frac{\Delta t}{B_i^t} \cdot \frac{Q_{i+1}^t - Q_{i-1}^t}{2\Delta x} + \frac{\Delta t}{B_i^t} \frac{Q_{PID}^t}{\Delta x} \quad (23)$$



Slika 12. Detalj implementacije korektivnog dotoka u model u vidu fiktivnog bočnog dotoka

3.5 Indikatori kvaliteta (performansi) asimilacije podataka

Kao što je naglašeno u prethodnom potpoglavlju, implementacija PID kontrolera kao metode za brzu asimilaciju podataka za modele otvorenih tokova, podrazumeva određivanje optimalne strukture (konfiguracije, forme) kontrolera i optimalnog podešavanja parametara kontrolera. Pored toga, sam proces asimilacije podataka, tačnije uspešnost ovog procesa treba na neki način kvantifikovati. U literaturi se za ocenu uspešnosti procesa asimilacije podataka (eng. *data assimilation performance assessment*) koristi statistički indikatori koji se dobijaju poređenjem vremenskih serija (izmerenih i modeliranih) veličina koje se koriste za opisivanje stanja sistema (poređenje hidrograma ili nivograma). U najvećem broju slučajeva kao indikator uspešnosti (kvaliteta) asimilacije podataka koristi se koren srednjeg kvadratnog odstupanja – RMSE (Biancamaria i ostali 2011; Abaza i ostali 2014; Abaza i ostali 2015; Barthélémy i ostali 2017) ili neke varijacije kao što su srednja relativna greška (Cao i ostali 2019) ili Nash-Sutcliffe koeficijent (Borup i ostali 2014; Fava i ostali 2020). U ovom istraživanju koristiće se *RMSE* kao jedan od najčešćih indikatora, ali će se koristiti i druge veličine kao što su maksimalna apsolutna greška – *maxError*, odnos vremena asimilacije i simulacije – *AssimTRatio*, i ukupna korektivna zapremina - *CorrVol*, koja je indikator specifičan za metodu koja je predmet istraživanja.

Koren srednjeg kvadratnog odstupanja – Root Mean Square Error (RMSE)

Koren srednjeg kvadratnog odstupanja jedna je od najčešćih statističkih veličina koje se koriste za poređenje dva niza. Veličina je srodna standardnoj devijaciji. Razlika je u tome što se kod standardne devijacije svaki član jednog niza poredi sa srednjom vrednošću tog niza, čime standardna devijacija predstavlja srednje odstupanje niza od srednje vrednosti. U slučajevima kada je potrebno uporediti dva niza, onda se koristi koren srednjeg kvadratnog odstupanja, koji

predstavlja prosečno odstupanje ta dva niza, jednog od drugog. Opšta jednačina za $RMSE$ je sledeća:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{ref,i})^2} \quad (24)$$

gde je N broj uzoraka u svakom od dva niza koja se porede, x_i je i -ti uzorak u nizu koji treba uporediti sa referentnim $x_{ref,i}$ je i -ti uzorak u referentnom nizu. U ovom istraživanju referentni niz, sa kojim će se porediti rezultati dobijeni modelom i korigovani u postupku asimilacije podataka, će biti vremenska serija nivoa na svakoj od mernih lokacija. Niz koji se poredi biće vremenska serija nivoa, na svakoj od mernih lokacija, dobijena modelom i asimilacijom podataka. Pošto je asimilaciju podataka moguće obaviti za više mernih lokacija, što će i u ovom istraživanju biti slučaj, kao reprezent za $RMSE$ će se uzeti srednja vrednost $RMSE$ vrednosti na svim mernim lokacijama koje se analiziraju:

$$RMSE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Z_{j,obs} - Z_{j,sim})^2} \quad [m] \quad (25)$$

gde je M broj mernih lokacija, N broj uzoraka u vremenskoj seriji, Z_{obs} mereni nivoi na mernim lokacijama a Z_{sim} nivoi dobijeni modelom (uz asimilaciju podataka). Donja granica $RMSE$ indikatora je 0, što označava odlične performanse asimilacije podataka.

Iako se u najvećem broju istraživanja kao ocena uspešnosti asimilacije podataka koristi $RMSE$, ili neka srodna/slična statistička veličina, u pojedinim situacijama ona nije dovoljna. Na osnovu nje se može jedino zaključiti samo koliko je srednje odstupanje dva niza (vremenske serije) koje se porede, pri čemu se ekstremne vrednosti odstupanja nigde ne mogu uzeti eksplicitno i eventualno analizirati.

Maksimalna apsolutna greška – Amplitude of the process error ($maxError$)

Tokom procesa asimilacije podataka, rezultati modela se koriguju prema izmerenim podacima, ali su često prisutne velike oscilacije nivoa vode, posebno u početku asimilacionog procesa. U regulaciji sistema primenom PID kontrolera upravo su na početku procesa prisutne ekstremne vrednosti odstupanja stanja sistema od zahtevanog stanja. Ovo važi i u slučaju kada se PID kontroleri koriste kao sredstvo za asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova. Zbog toga je potrebno koristiti i maksimalnu grešku (maksimalnu apsolutnu) grešku, odnosno najveću amplitudu greške kao indikator uspešnosti asimilacije podataka. Zato se ova veličina, $maxError$, koristi u ovom istraživanju kao jedan od indikatora uspešnosti asimilacije podataka. Pošto je ovu vrednost moguće sračunati na svim mernim lokacijama, u ovom istraživanju, kao reprezent maksimalnog odstupanja će se koristiti srednja vrednost maksimalnih greški na svim mernim lokacijama, prema sledećoj jednačini:

$$maxError = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \max(|e_i|) \quad [m] \quad (26)$$

gde je M broj mernih lokacija, a e_i vrednost procesne greške (*process error*) na i -toj mernoj lokaciji, koja u ovom istraživanju konkretno predstavlja razliku između izmerenog nivoa na

mernoj lokaciji i nivoa dobijenog modelom na lokaciji koja odgovara mernoj. Najmanja vrednost ovog indikatora je takođe 0, i ta vrednost označava idealno poklapanje modeliranih i izmerenih vremenskih serija nivoa vode.

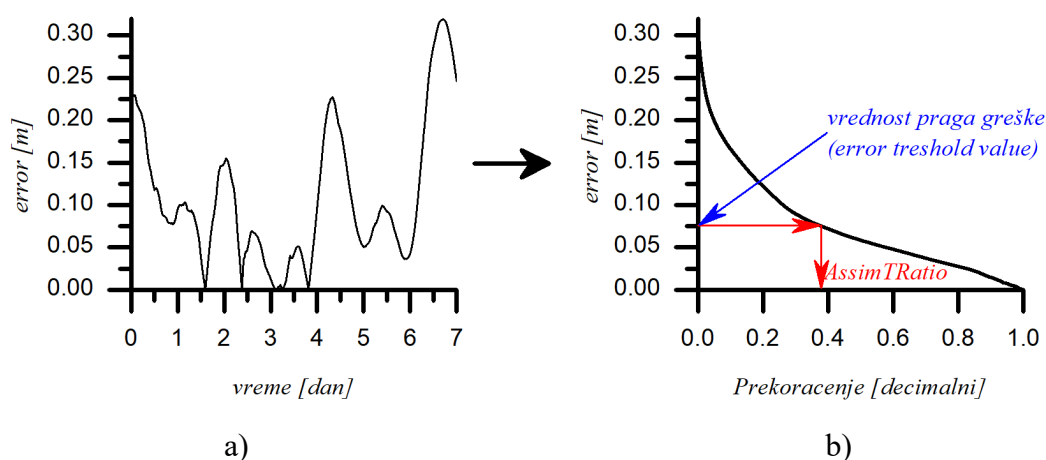
Odnos vremena asimilacije i simulacionog perioda – Assimilation Time Ratio (AssimTRatio)

Koren srednjeg kvadratnog odstupanja i maksimalna apsolutna greška su indikatori koji u ovom istraživanju imaju dimenziju nivoa vode (dimenziju dužine) i govore koliko je odstupanje dva vremenska niza koja se porede. Medjutim, u asimilaciji podataka, bitna stavka je i vreme koje je potrebno da se rezultati modela prilagode izmerenim podacima, tačnije vreme od celokupnog trajanja proračuna koje je potrebno da se razlika između izmerenih i modeliranih nivoa svede na neku zahtevanu vrednost. Zbog toga se kao pokazatelj uspešnosti asimilacije podataka uvodi veličina koja se naziva odnos vremena asimilacije i simulacionog perioda (eng. *assimilation time ratio*) AssimTRatio.

Ova veličina predstavlja odnos (bezdimenziona veličina) perioda u kome vrednost greške (razlika između nivoa) prelazi neku postavljenu granicu, prag (eng. *threshold*) i ukupnog perioda koliko traje simulacija:

$$AssimTRatio = \frac{\text{vremenski period u kome je greška veća od zadate granične vrednosti}}{\text{ukupno trajanje simulacije}} \quad [1] \quad (27)$$

Da bi se sračunala ova veličina, potrebno je vremensku seriju greške (Slika 13a) transformisati u krivu trajanja greške (Slika 13b) iz koje se lako može izvući podatak o trajanju prekoračenja zadatog praga greške. U ovom istraživanju veličina AssimTRatio se izražava kao decimnalna veličina, koja u stvari predstavlja procentualno trajanje prekoračenja praga greške u odnosu na ceo simulacioni period. Minimalna vrednost ovog indikatora je 0, što označava idealno sprovedenu asimilaciju podataka, kojom se dobija potpuno poklapanje izmerenih vremenskih serija i onih dobijenih modelom. Maksimalna vrednost ovog indikatora je 1, što označava da asimilacija podataka nije bila u stanju da rezultate modela koriguje u skladu sa merenjima i prema tome greška prelazi graničnu vrednost tokom celog perioda simulacije. Može se koristiti i alternativni zapis po kome je minimalna vrednost 0% a maksimalna vrednost 100%. Ocene kvaliteta asimilacije podataka pomoću ovog indikatora zavise od vrednosti koja se postavi kao prag. U ovom istraživanju, kao prag greške usvojena je vrednost od 0.05 m.



Slika 13. Transformacija vremenske serije greške (a) u krivu trajanja greške (b) sa koje je moguće odrediti vrednost indikatora AssimTRatio

Budući da, kao i kod *RMSE* i *maxError* indikatora, postoji više mernih lokacija na kojima treba sračunati ove vrednosti, kao reprezent uspešnosti asimilacije podataka uzima se srednja vrednost veličine *AssimTRatio* sa svih mernih lokacija.

Ukupna korektivna zapremina – Total correction volume (*CorrVol*)

Ukupna korektivna zapremina *CorrVol* je indikator uspešnosti asimilacije podataka koji je specifičan samo za metodu koja se prezentuje u ovom istraživanju. Predstavlja ukupnu korektivnu zapreminu dodatu ili oduzetu iz modela pomoću svih PID kontrolera koji su postavljeni u model. Ovaj indikator može se shvatiti kao mera intervencije kontrolera u modelu. Kada su granični uslovi pouzdani, pre svega dotoci na neku rečnu deonicu, ovaj indikator bi trebalo da teži 0. Ta vrednost znači i da nije potrebno vršiti nikakvu promenu rezultata, odnosno predstavlja idelan slučaj. Što je pouzdanost graničnih uslova manja, tako i vrednost ovog indikatora raste. Računa se na osnovu sledeće jednačine:

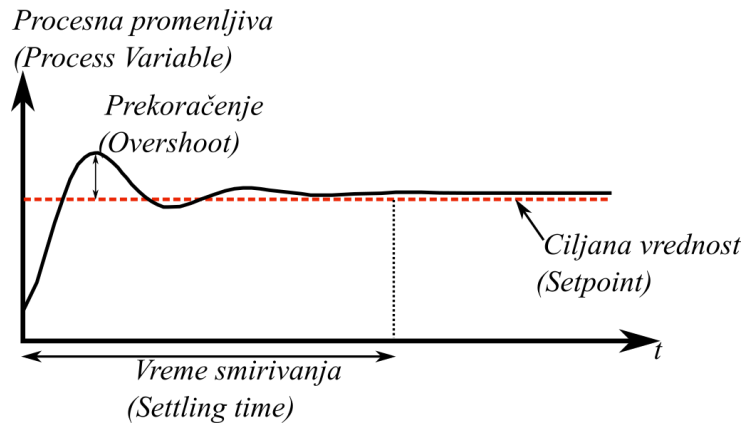
$$CorrVol = \sum_{i=1}^{M_A} \left| \int_0^{t_{sim}} Q_{PID,i}(t) dt \right| \quad [10^9 \text{ m}^3] \quad (28)$$

gde M_A predstavlja broj mernih mesta u modelu na kojima se vrši usaglašavanje stanja (mogu postojati i merna mesta koja služe samo za validaciju), i ovaj broj se može razlikovati od ukupnog broja mernih mesta M koja se koriste za parametre *RMSE*, *maxError* i *AssimTRatio*. t_{sim} je vreme simulacije a $Q_{PID,i}$ je korektivni dotok na i -toj asimilacionoj lokaciji.

U primeni PID kontrolera u nekim standardnim oblastima (npr. automatsko upravljanje industrijskim procesima), kada se kao *setpoint* koristi konstantna vrednost, za ocenu kvaliteta rada kontrolera koriste se neki od sledećih indikatora: suma kvadrata greške (eng. *integral square error* - *ISE*), srednja kvadratno odstupanje (eng. *mean square error* - *MSE*), maksimalno odstupanje (eng. *overshoot*) i vreme smirivanja (eng. *settling time*). Poslednja dva indikatora mogu se i vuzuelizovati (Slika 14). Veličine kao što su *ISE* i *MSE* predstavljaju isto što i *RMSE* koji se koristi u ovom istraživanju, tj. suštinski se ne razlikuju. *Overshoot* je isto što i *maxError* (kako je nazvano u ovoj disertaciji) dok *settling time* suštinski odgovora odnosu vremena asimilacije i simulacionog perioda *AssimTRatio*. Na osnovu istraživanja koja se tiču optimalnog podešavanja kontrolera na osnovu ovih indikatora vidi se da su pojedini indikatori suprotno orijentisani, odnosno smanjenje jednog utiče na povećanje drugog (Chiha i ostali 2012) i obrnuto. Na osnovu ovoga, na jednoj strani „fronta“ su indikatori kao što su *RMSE*, *MSE*, *ISE* i *settling time* dok je na drugoj strani *overshoot*. Prema tome, može se zaključiti da su na jednoj strani indikatori *RMSE* i *AssimTRatio*, dok je na drugoj strani veličina *maxError*. Dodatno, indikator *CorrVol*, koji je specifičan za ovo istraživanje, takođe ima suprotnu tendenciju od indikatora kao što su *RMSE* i *AssimTRatio*, što se može videti u narednim poglavljima.

Ubrzanje proračuna - *SpeedUp*

Da bi se odredilo ubrzanje proračuna kada se koriste PID kontroleri za asimilaciju porede se vremena proračuna. Ubrzanje (*SpeedUp*) predstavljeno je kao odnos (količnik) vremena potrebnog za proračun kada se koristi EnKF metoda ($Runtime_{EnKF}$) i vremena potrebnog za proračun kada se koriste PID kontroleri ($Runtime_{PID}$).



Slika 14. Vizualizacija pojedinih indikatora koji opisuju odziv PID kontrolera

3.6 Analiza strukture PID kontrolera

Prvi korak, kada je poznat matematički aparat iza metode za asimilaciju podataka primenom PID kontrolera, je da se definiše struktura kontrolera koji će se implementirati u sam hidraulički model. Kao što je već pomenuto, kontroleri mogu figurisati u različitim oblicima u zavisnosti od toga koji faktor od tri moguća (proporcionalni, integrativni i derivativni) se koristi. U najvećem broju slučajeva primene ovih kontrolera mogu se sresti forme P kontrolera (samo proporcionalni faktor), PI kontrolera (proporcionalni i integrativni) ili puna forma PID kontrolera.

Generalno, ne postoji univerzalna preporuka za formu kontrolera koja se treba koristiti, jer opseg primene PID kontrolera varira. Ono što je moguće uraditi je odrediti optimalnu formu (strukturu) kontrolera koristeći neki optimizacioni postupak i minimizovati neku kriterijumsku funkciju. Problem kod ovakvog pristupa je što ga je praktično nemoguće odvojiti od paralelnog podešavanja parametara kontrolera, čime se prostor pretrage višestruko uvećava i smanjuje se mogućnost da se nadje globalni optimum. Zbog toga je u ovom istraživanju proces određivanja optimalne strukture kontrolera razdvojen od optimalnog podešavanja (*tuning*) parametara kontrolera.

U prvom delu, određuje se optimalna struktura kontrolera manuelnim, heurističkim pristupom koji se zasniva na analizi u tri faze (slično postupku manuelnog podešavanja parametara kontrolera (Ang, Chong, i Yun Li 2005)). U prvoj fazi (Faza 1) u hidraulički model se implemetira samo proporcionalni faktor kontrolera (P kontroler). Ovde se vrednost proporcionalnog koeficijenta K_p menja za red veličine od 10^{-3} do 10^3 , kako bi se približno utvrdila vrednost koja omogućava najbrže približavanje nivoa iz modela izmerenim vrednostima. Kada se od ovog relativno malog skupa vrednosti K_p odredi ona najpovoljnija, usvaja se ta vrednost i prelazi se na Fazu 2. U ovoj fazi dodaje se integrativni faktor u kontroler. Vrednost proporcionalnog koeficijenta se drži konstantnom (određena u Fazi 1) a menja se vrednost integrativnog koeficijenta za po red veličine u rasponu od 10^{-3} do 10^3 . Usvaja se vrednost K_i (od analiziranih) koja daje najbolje rezultate asimilacije podataka na osnovu svih indikatora performansi. Generalno, Faza 2 bi trebalo da da osetno poboljšanje rezultata asimilacije. Kada se utvrdi koja je to vrednost K_i , prelazi se na Fazu 3. U ovoj fazi kontroler se nadograđuje dodavanjem i derivativnog člana gde se vrednost derivativnog koeficijenta takođe menja za po red veličine u opsegu 10^{-3} do 10^4 . Cilj dodavanja ovog člana je da se vidi ima li dodatnog poboljšanja u performansama asimilacije. Ukoliko ima poboljšanja, usvaja se da je optimalna forma kontrolera kada se koriste svi faktori (PID kontroler) a ukoliko nema vidljivog poboljšanja, usvaja se da je optimalna struktura kontrolera ona u kojoj figurišu proporcionalni i integrativni član (PI kontroler). Na kraju, ukoliko nema poboljšanja ni dodavanjem

integrativnog člana (Faza 2) ni derivativnog člana (Faza 3) može se usvojiti da je optimalna forma kontrolera samo ona u kojoj figuriše samo proporcionalni član (P kontroler). Kao rezultat ovog heurističkog određivanja optimalne strukture kontrolera može se dobiti opseg u kom se nalaze optimalne vrednosti parametara (koeficijenata) kontrolera, što može ubrzati postupak automatskog podešavanja kontrolera o čemu će biti priče u nastavku teksta.

3.7 Podešavanje kontrolera u hidrauličkom modelu

Nakon utvrđene optimalne strukture kontrolera potrebno je odrediti optimalne vrednosti parametara (koeficijenta) kontrolera: proporcionalni koeficijent K_p , integrativni koeficijent K_i i derivativni koeficijent K_d , uzimajući u obzir koji od parametara figuriše u usvojenoj optimalnoj strukturi kontrolera. I ovaj problem moguće je rešiti koristeći različite pristupe.

U tradicionalnim oblastima primene PID kontrolera često se koriste heuristički pristupi za podešavanje (eng. *tuning*) kontrolera (Ziegler i Nichols 1995; Ang i ostali 2005), koji koriste empirijska pravila za određivanje parametara kontrolera. Postupak se najčešće svodi, jednim delom, na „*trial & error*“ pristup. Cigler-Nikols (Ziegler-Nichols) metod za podešavanje kontrolera jedan je od najstarijih i najčešće korišćenih postupaka. U ovom algoritmu, kontroler se prvo podešava u formi P kontrolera (isključeni su integrativni i derivativni faktor). Proporcionalni koeficijent K_p se povećava sve dok se sistem kojim se upravlja ne dovede do granice stabilnosti. Ovo podrazumeva pojavu periodičnih, neprigušenih oscilacija kada se posmatra stanje sistema. Vrednost K_p parametra koja je dovela do ovoga usvaja se kao „kritični“ koeficijent K_{crit} . Takođe, beleži se i perioda oscilacija koje su se pojavile T_{crit} . Na osnovu ova dva kritična parametra usvajaju se vrednosti ostalih parametara. U slučaju da se zadržava samo P kontroler, proporcionalnom koeficijentu se dodeljuje vrednost $K_p=0.5 \cdot K_{crit}$. Za slučaj kada se koristi forma PI kontrolera, proporcionalni koeficijent dobija vrednost $K_p=0.45 \cdot K_{crit}$ a integrativni $K_i=0.54 \cdot K_{crit}/T_{crit}$. Pri upotrebi PD forme kontrolera usvajaju se sledeće vrednosti parametara: proporcionalni koeficijent $K_p=0.8 \cdot K_{crit}$ i derivativni $K_d=K_{crit} \cdot T_{crit}/10$. Ako se primenjuje puna forma kontrolera (PID kontroler) usvajaju se sledeće vrednosti: proporcionalni koeficijent $K_p=0.6 \cdot K_{crit}$, integrativni $K_i=1.2 \cdot K_{crit}/T_{crit}$ i derivativni $K_d=3K_{crit} \cdot T_{crit}/40$.

Kada je potrebno podesiti više kontrolera simultano, a da pritom rad jednog utiče na rad nekog drugog (ili na sve ostale), ovakav tradicionalni, heuristički pristup podešavanju postaje nepraktičan. Zbog toga se u ovom istraživanju, gde se PID kontroleri primenjuju u do sada nestandardnoj oblasti predlaže algoritam za automatsko podešavanje kontrolera primenom višekriterijumske optimizacije. Cilj optimizacije je minimizovati neku kriterijumsku funkciju menjajući i tražeći optimalne vrednosti parametara (u ovom slučaju parametara PID kontrolera). Kod višekriterijumske optimizacije, gde postoji više kriterijumskih funkcija koje su najčešće suprotstavljene, problem se usložnjava. U ovom slučaju potrebno je odrediti skup optimalnih vrednosti, koje ne favorizuju ni jednu od kriterijumskih funkcija, odnosno potrebno je naći kompromisno optimalno rešenje.

Kriterijumske funkcije koje je potrebno minimizovati u procesu podešavanja parametara kontrolera su indikatori performansi asimilacije podataka koji su definisani u potpoglavlju 3.5. U idealnom slučaju, dobro izvršena asimilacija podataka težila bi da svaki od indikatora (u ovom slučaju kriterijumskih funkcija) smanji ka nuli, što je bliže moguće:

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

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

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

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

Međutim, pojedini indikatori su suprotno orijentisani od drugih, što dovodi do toga da se u procesu podešavanja parametara jedna veličina smanjuje (kao što se želi) a druga povećava. Zbog toga, nemoguće je naći jedno optimalno rešenje koje će zadovoljiti sve kriterijumske funkcije. Najpraktičniji način je da se nađe opseg optimalnih vrednosti (pareto front) koristeći neki od algoritama višekriterijumske optimizacije.

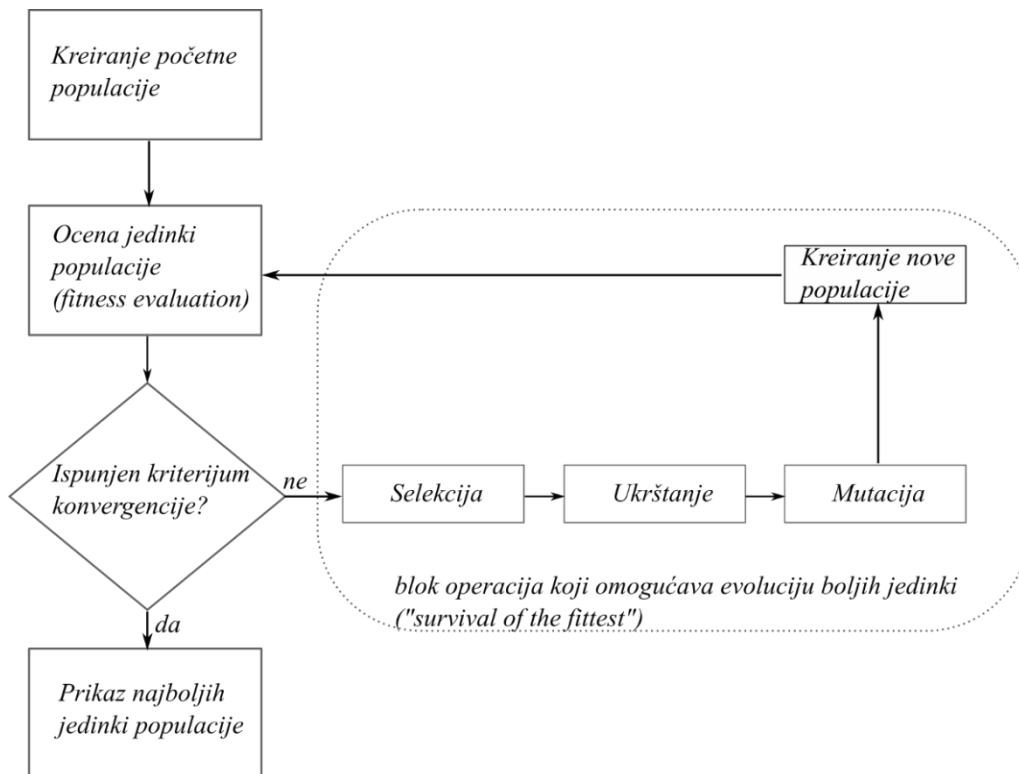
U procesu višekriterijumske optimizacije, generalno, moguće je uvrstiti veći broj kriterijumskih funkcija. Međutim, malo detaljnijom analizom indikatora performansi asimilacije podataka koji su usvojeni kao kriterijumske funkcije, može se uočiti da neki od njih imaju isti trend, tj. smanjenje jedne od kriterijumskih funkcija u procesu optimizacije direktno utiče i na smanjenje još neke kriterijumske funkcije, kao što je objašnjeno u potpoglavlju 3.5. Time je nepotrebno podešavati parametre kontrolera koristeći sve četiri kriterijumske funkcije odjednom, već se može koristiti pojednostavljeni pristup sa više kombinacija od po dve suprotno orijentisane kriterijumske funkcije (Tabela 1). Za rešavanje problema višekriterijumske optimizacije koristiće se algoritam NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm).

Tabela 1. Kombinacije kriterijumskih funkcija koje će se koristiti za višekriterijumsko podešavanje parametara PID kontrolera

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

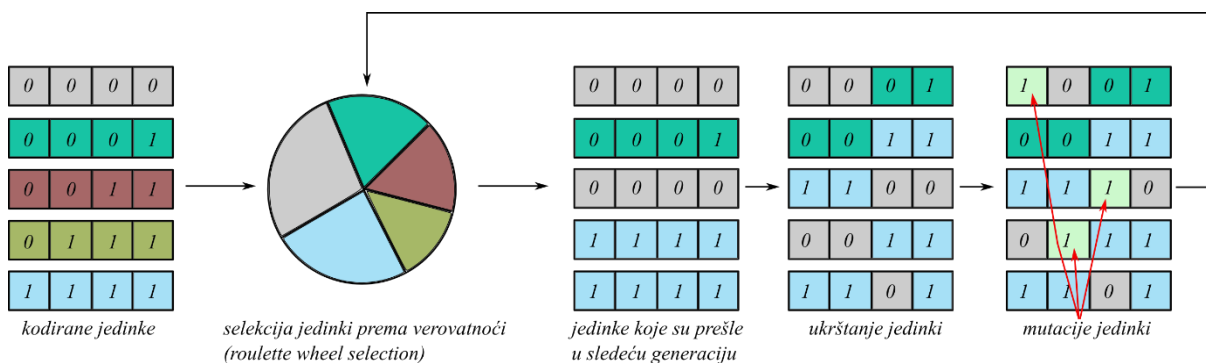
Nondominating Sorting Genetic Algorithm – NSGA-II

Genetski algoritmi predstavljaju optimizacionu metodu koja se bazira, odnosno imitira, principe razmene genetskog materijala i prirodne selekcije u cilju pronalaska najboljeg rešenja nekog problema (Holland 1962). Za razliku od nekih tradicionalnih optimizacionih metoda (npr. linearno, nelinearno, dinamičko programiranje) predstavljaju metod optimizacije u diskretnom višedimenzionalnom prostoru. Traženje optimalnog rešenja (globalnog optimuma) nekog problema sprovodi se pomoću tri operacije: selekcija, ukrštanje i mutacija. Proces započinje sa više mogućih rešenja (jedinki u populaciji) koje se kroz iteracije (generacije) biraju, ukrštaju i mutiraju čime se iz generacije u generaciju dobijaju bolje verzije tih jedinki i koje teže nekom optimalnom rešenju (Slika 15).



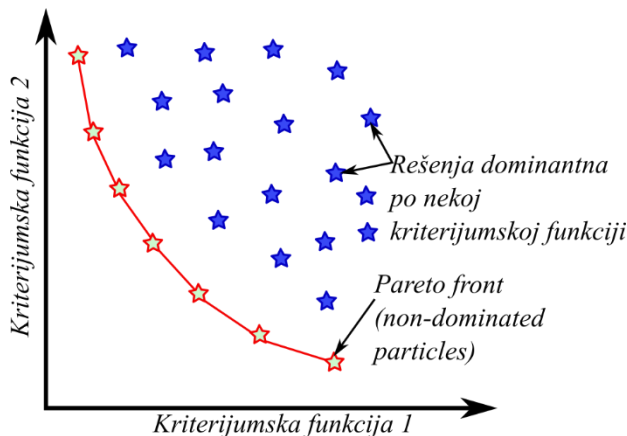
Slika 15. Shematski prikaz genetskog algoritma

Postupak poboljšavanja rešenja u bloku operacija koji se sastoji od selekcije, ukrštanja i mutacije započinje tako što se prvo svaka jedinka populacije (moguće rešenje) kodira nizom nula i jedinica, tako da svaka jedinka dobija svoj jedinstveni niz nula i jedinica. Nakon toga, svaka kodirano rešenje se evaluira računanjem vrednosti kriterijumkse funkcije, odnosno prilagođenosti (eng. *fitness*) svake jedinke u populaciji. Jedinke se rangiraju prema vrednostima kriterijumskih funkcija koje daju. Sledeći korak je selekcija. U ovom procesu se biraju (najprilagodljivije) jedinke prema vrednostima kriterijumskih funkcija. Odabir se ne vrši direktno prema vrednostima tih funkcija, već prema verovatnoći. One jedinke koje imaju bolje vrednosti kriterijumkse funkcije imaju veće šanse da budu izabrane za narednu generaciju, ali se ostavlja i (manja) mogućnost da se u narednu generaciju prenesu i delovi „lošijih“ jedinki čime se imitira se prirodni proces selekcije (Slika 16). Ukrštanje je operacija u kojoj se materijal između izabranih jedinki razmenjuje čime nastaju nova rešenja (Slika 16). Kao poslednja operacija sprovodi se mutacija (Slika 16) kojom se praktično omogućava da se izbegne konvergencija nekom suboptimalnom rešenju već se teži pronalasku globalnog optimuma.



Slika 16. Procesi selekcije, ukrštanja i mutacije u genetskom algoritmu (singleobjective optimization)

Problem pronalaska optimalnog rešenja uslozjava se kada je potrebno zadovoljiti dve ili više kriterijumskih funkcija (kada je prilagodljivost rešenja potrebno oceniti na osnovu dve ili više kriterijumskih funkcija), koje su suprotstavljene, a da se nijedna od tih funkcija ne favorizuje. U tim slucajevima, nezavisne kriterijumske funkcije mogu se grupisati u jednu integralnu kriterijumsku funkciju prostim sabiranjem funkcija. Tada je potrebno dodeliti težinske faktore svakoj od funkcija i normalizovati vrednosti funkcija kako se ne bi desilo da je neka od funkcija dominantnija u odnosu na druge. Ovo može predstavljati problem, jer dodeljivanje različitih težinskih faktora pojedinim funkcijama može značajno uticati na dobijeno optimalno rešenje, kao i normalizacija vrednosti funkcija. Kako bi se izbegao ovaj postupak ponderisanja kriterijumskih funkcija, razvijen je genetski algoritam za višekriterijumsku optimizaciju (Deb i ostali 2002) koji ne favorizuje nijednu od kriterijumskih funkcija (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II – NSGA II). Sva rešenja u generaciji se porede i u procesu selekcije se biraju ona rešenja koja nisu dominantna ni po jednoj od kriterijumskih funkcija, nakon čega sprovode operacije ukrštanja i mutacije. Ovaj postupak selekcije se razlikuje od postupka selekcije kada se koristi genetski algoritam sa jednom kriterijumskom funkcijom gde se u procesu selekcije najčešće biraju dominantna rešenja po toj kriterijumskoj funkciji. Otuda i razlika u konačnom rešenju. Kod jednokriterijumske (eng. *single-objective*) optimizacije na kraju se dobija jedno rešenje, dok se kod višekriterijumske (eng. *multi-objective*) dobija skup rešenja koji se naziva pareto front. Pareto front predstavlja skup rešenja iz koga nije moguće daljim operacijama popraviti vrednost nekog od kriterijuma a da se ne naruši vrednost druge kriterijumske funkcije. Za optimalno podešavanje parametara PID kontrolera koje je predmet istraživanja u ovoj disertaciji korišćen je NSGA-II algoritam implementiran u okruženju MATLAB (MathWorks Inc. 2018).



Slika 17. Pareto front za dve kriterijumske funkcije

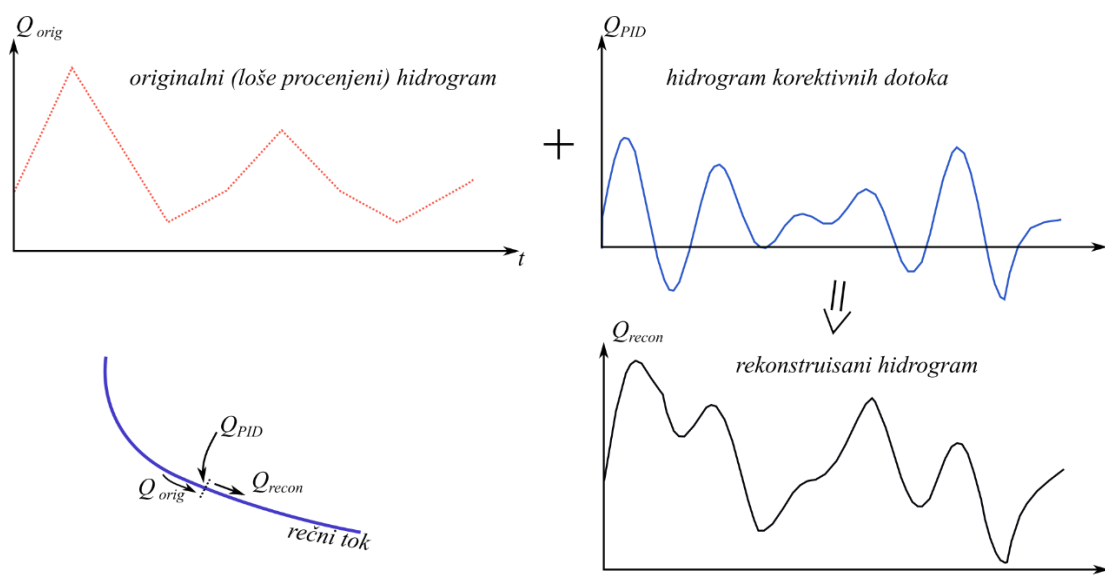
3.8 Rekonstrukcija hidrograma

Predložena metodologija za asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova vrši usaglašavanje nivoa posredno, dodajući ili oduzimajući određenu količinu vode u/iz modela, koja je kvantifikovana preko korektivnog dotoka. Na osnovu ovoga otvara se pitanje da li ti korektivni dotoci imaju neki fizički smisao.

Celokupna metoda za brzu asimilaciju podataka primenom PID kontrolera zasnovana je na pretpostavci da neodređenost (nepouzdanost) 1D hidrauličkog modela potiče dominantno od nepouzdatih graničnih uslova (Hipoteza 2), i to pre svega nepouzdatih dotoka koji su pokretač modela. Generalno, procena ulaznih dotoka u model najčešće se vrši na osnovu hidroloških

modela (za relativno manje slivove), ili na osnovu zabeleženih nivoa i dostupnih krivih protoka. Nepouzdanost procene protoka na osnovu merenih nivoa i krivih protoka osetno raste u periodima značajne promene protoka (npr. nailazak velikih voda). Zbog toga, uzimajući u obzir usvojenu hipotezu da se izmereni nivoi i nivoi dobijeni modelom razlikuju prvenstveno zbog toga što u modelu nedostaje ili ima više vode, rad PID kontrolera u vidu korektivnog dotoka može se iskoristiti za rekonstrukciju hidrograma na lokacijama gde postoje mereni nivoi (Slika 18).

Procedura rekonstrukcije hidrograma na mernim lokacijama sastoji se od sabiranja originalno (loše) procenjenog hidrograma (na osnovu nivoa i krive protoka) i korektivnog dotoka na asimilacionoj lokaciji (Slika 18 i jednačina 29). Na taj način jednačinom (29) dobija se rekonstruisani hidrogram (koji je bliži stvarnom hidrogramu) na mestu (i neposredno nizvodno) gde se vrši usaglašavanje nivoa u modelu.

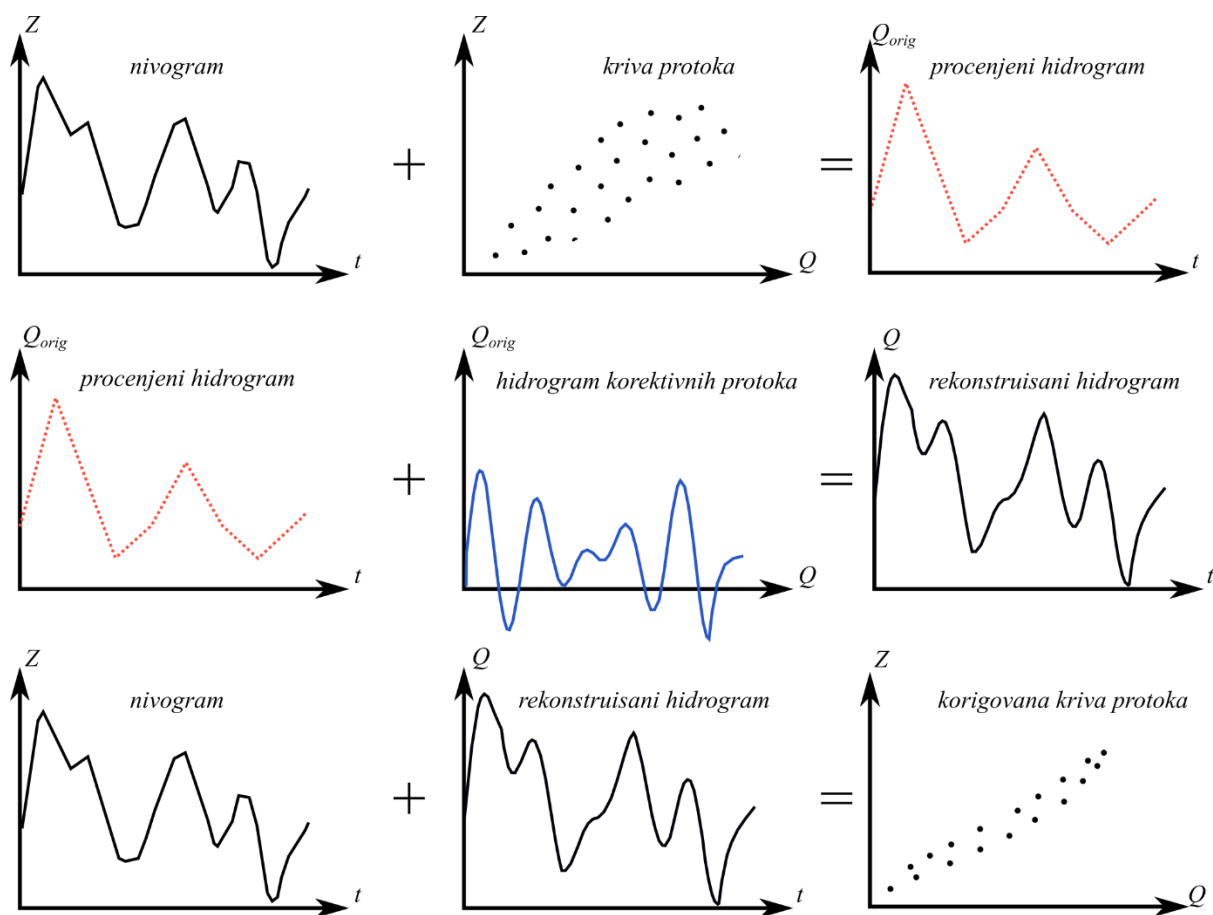


Slika 18. Shematski prikaz rekonstruisanog hidrograma na mestu dodavanja/oduzimanja vode u modelu primenom PID kontrolera

$$Q_{recon}(t) = Q_{orig}(t) + Q_{PID}(t) \quad (29)$$

U ovoj jednačini $Q_{recon}(t)$ je vrednost rekonstruisanog protoka u trenutku t , $Q_{orig}(t)$ originalni dotok u trenutku t koji se dobija neposredno uzvodno od mesta asimilacije (dobija se propagacijom nepouzdanog procenjenog dotoka kroz model, ili je u krajnjem slučaju to baš ulazni dotok ukoliko je asimilaciono mesto na samom uzvodnom kraju modela a $Q_{PID}(t)$ je korektivni dotok dodat/oduzet na asimilacionom mestu u trenutku t .

Uz pretpostavku da je model dobro kalibrisan (Hipoteza 1), na mestu rekonstruisanog dotoka i merenog nivoa moguće je izvršiti procenu krive protoka (Slika 19). Procenjena kriva protoka može poslužiti za neke buduće procene protoka uz izmerene nivoe (smatraju se pouzdanijim podatkom zbog lakšeg načina merenja). U tom slučaju nepouzdanost tih protoka će biti umanjena zbog bolje procene krive protoka. Dodatno, ovaj postupak može poslužiti i u rekonstrukciji poplavnih talasa na osnovu snimljenih nivoa.



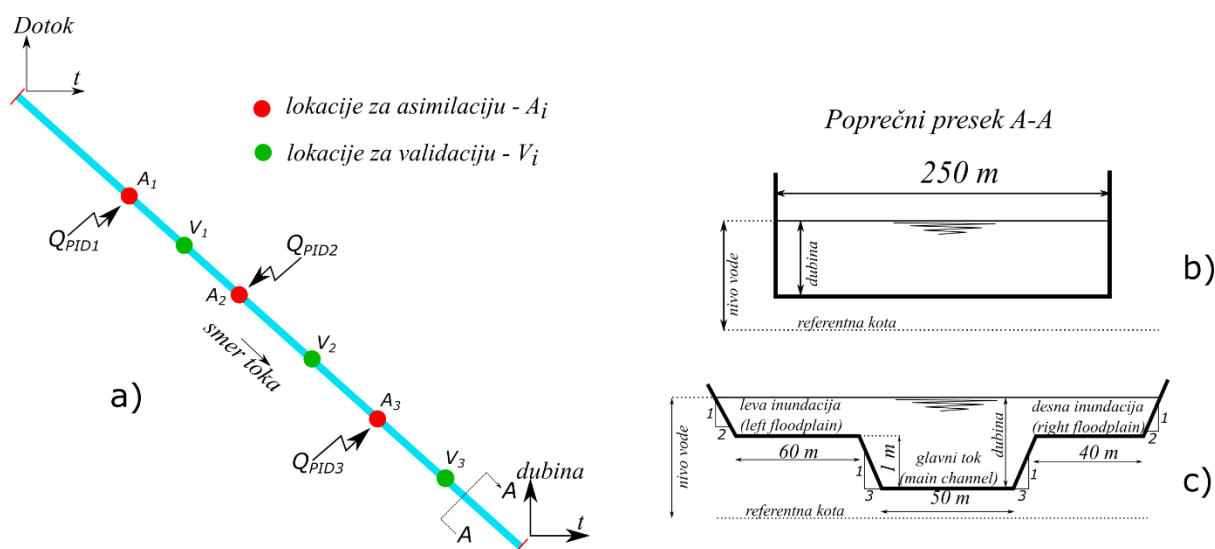
Slika 19. Shematski prikaz poboljšane procene krive protoka na mestu asimilacije korišćenjem izmerenog nivograma i rekonstruisanog hidrograma

4 Testiranje metodologije

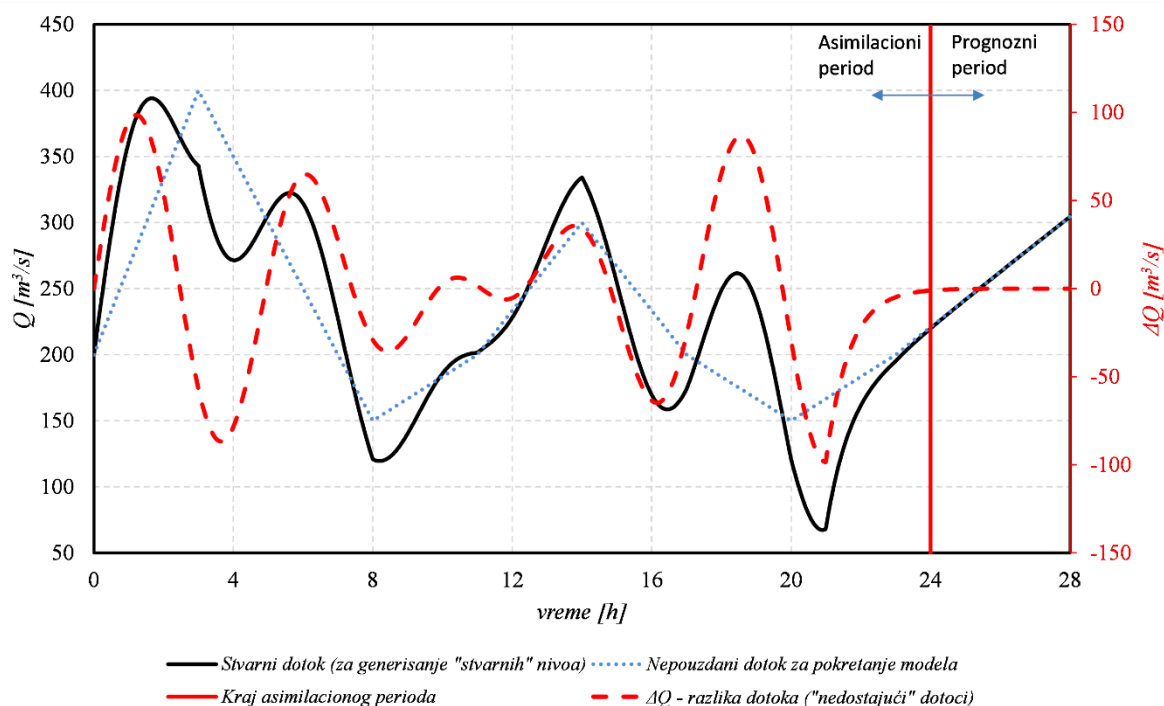
4.1 Benchmark test primeri za poređenje standardne asimilacione metode i brze asimilacije pomoću PID kontrolera

Predložena metodologija za brzu asimilaciju podataka poredi se sa standardnom asimilacionom metodom EnKF na dva hipotetička testa sa različitom složenosti geometrije poprečnog preseka (Slika 20). Prvi slučaj je sa jednostavnom, pravougaonom, geometrijom korita (Slika 20b) a drugi slučaj je sa složenim, dvogubim oblikom preseka (Slika 20c). 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 21). Nakon toga ulazni hidrogram se promeni i model se pokreće sa izmenjenim ulaznim hidrogramom. Rezultati tako pokrenutog modela se koriguju koristeći standardnu i brzu metodu asimilacije podataka. Benchmark podrazumeva poređenje i analizu performansi ove dve asimilacione metode na osnovu indikatora kvaliteta asimilacije podataka definisanih u poglavlju 3.5. Pored poređenja na osnovu indikatora performansi, poredi se i vreme trajanja proračuna, kako bi se dokazalo da primena PID kontrolera u pojednostavljenoj metodi za brzu asimilaciju obezbeđuje glavni uslov, uštedu računarskog vremena.

Hipotetički test primeri formirani su tako da se celokupna simulacija sastoji iz dve faze. Prva faza je asimilacioni period (eng. *assimilation window*) koji traje 24h u kome su dostupni mereni nivoi na pojedinim mernim lokacijama. U ovom periodu rezultati modela se koriguju u skladu sa primenjenom asimilacionom metodom a kao rezultat na kraju ovog perioda dobija se početno stanje za drugu fazu, a obe asimilacione metode koje se testiraju asimilacioni period započinju od istog „pogrešnog“ stanja. Druga faza je faza kratkoročne prognoze (eng. *forecasting window*) koja traje 4h, koja služi za ilustraciju uticaja poboljšavanja početnog uslova. U ovom periodu nema merenih podataka jer se simulira buduće stanje u kom su stanja nepoznata. Cilj je uporediti ponašanje modela u ovom kratkom periodu u skladu sa početnim stanjem koje je obezbedila primenjena asimilaciona metoda.



Slika 20. Benchmark test primeri za poređenje EnKF i asimilacione metode zasnovane na primeni PID kontrolera: a) rečna deonica sa 6 mernih lokacija, b) pravougaoni poprečni presek – Test Primer 1 i c) složeni poprečni presek – Test Primer 2



Slika 21. Stvarni i procenjeni hidrogram kao uzvodni granični uslovi za rečnu deonicu u test primerima

Test primer 1 – Kanal sa pravougaonim poprečnim presekom.

U ovom test primeru analizira se kanal dugačak 50km pravougaonog poprečnog preseka širine 250m, sa podužnim nagibom od 1‰. Maningova hrapavost u ovom slučaju je uniformna po celom poprečnom preseku i iznosi $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Prostorni korak, odnosno razmak između poprečnih preseka, usvojen je kao $\Delta x=125\text{m}$ a vremenski korak u simulacijama je $\Delta t=5\text{s}$. Uzvodni granični uslov je procenjeni ulazni hidrogram (Slika 21), dok je na nizvodnom kraju postavljen granični uslov u vidu konstantne dubine koja je jednaka normalnoj dubini za početni protok. Kota dna na uzvodnom kraju postavljena je na 100 m, dok su kote dna ostalih preseka sračunate na osnovu zadatog konstantnog pada od 1‰. Analizira se šest mernih lokacija, od čega se tri lokacije koriste za asimilaciju - A1, A2 i A3, tj. kao lokacije na kojima se postavljaju PID kontroleri koji dodaju/oduzimaju korektivni dotok, a tri lokacije služe za validaciju rezultata – V1, V2 i V3 (Slika 20a). Kako bi se analizirao scenario koji je donekle blizak ralnosti, vremenski korak sa kojim su dostupni mereni nivoi na asimilacionim mestima je usvojen na $\Delta t_{obs}=60\text{s}$, što ga čini 12 puta većim od vremenskog koraka sa kojim radi model. Apsolutna merna neodređenost nivoa (koja je potrebna za primenu metode EnKF) je usvojena kao $\pm 0.01 \text{ m}$.

Test primer 2 – Kanal sa složenim poprečnim presekom.

U drugom test primeru analizira se kanal dugačak 100km sa podužnim nagibom od 1‰. Poprečni presek je složen i sastoji se od glavnog korita i leve i desne plavne zone (inundacije). Zbog složenosti poprečnog preseka a kako bi se slučaj približio ralnosti Maningova hrapavost nije uniformna. U glavnom koritu usvojena je hrapavost od $0.018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, u levoj inundaciji usvojena je hrapavost od $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ a u desnoj inundaciji $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Prostorni korak, odnosno razmak između poprečnih preseka, usvojen je na $\Delta x=250\text{m}$ a vremenski korak u simulacijama je $\Delta t=10\text{s}$. Kao i u Test primeru 1, uzvodni granični uslov je procenjeni hidrogram (Slika 21), dok je na nizvodnom kraju kao granični uslov zadata normalna dubina.

Kota dna najuzvodnijeg preseka je 100m. I u ovom primeru koristi se 6 mernih lokacija, tri kao mesta za asimilaciju (A1, A2 i A3) i tri lokacije za validaciju (V1, V2 i V3). Vremenski korak sa kojim su dostupni mereni nivoi na asimilacionim mestima je usvojen na $\Delta t_{obs}=60s$, a apsolutna merna neodređenost nivoa je ± 0.01 m.

U oba test primera, prilikom primene metode EnKF za asimilaciju podataka, potrebno je definisati vrednost konstantne dužine c koja figuriše u jednačini (16). U oba primera ovoj veličini je dodeljena vrednost 250m (do ove vrednosti se došlo probanjem i predstavlja najveću vrednost koja je omogućila stabilan proračun).

Cilj benchmark testa, koji se obavlja na opisana dva hipotetička primera, je dokazivanje vremenske uštede kada se koristi metoda zasnovana na PID kontrolerima. Ovaj benchmark test ne podrazumeva optimalno podešavanje PID kontrolera (o tome će reći biti u drugom primeru primene na realnim problemima). Zbog toga se analizira nekoliko slučajeva ručno podešenih kontrolera. U nastavku su slučajevi koji se analiziraju (Tabela 2).

Tabela 2. Slučajevi koji se analiziraju u okviru benchmarkinga EnKF i asimilacione metode zasnovane na PID kontrolerima

Slučaj		Asimilaciona metoda	P	I	Veličina ansambla
Pravougaono korito (Rectangular)	Složeno korito (Compound)				
$R1$	$C1$	PID	10	0	/
$R2$	$C2$	PID	10	0.1	/
$R3$	$C3$	PID	10	1	/
$R4$	$C4$	$EnKF$	/	/	50
$R5$	$C5$	$EnKF$	/	/	100
$R6$	$C6$	$EnKF$	/	/	200

* R – oznaka da je korišćen Test Primer 1 sa pravougaonim (eng. *Rectangular*) poprečnim presekom

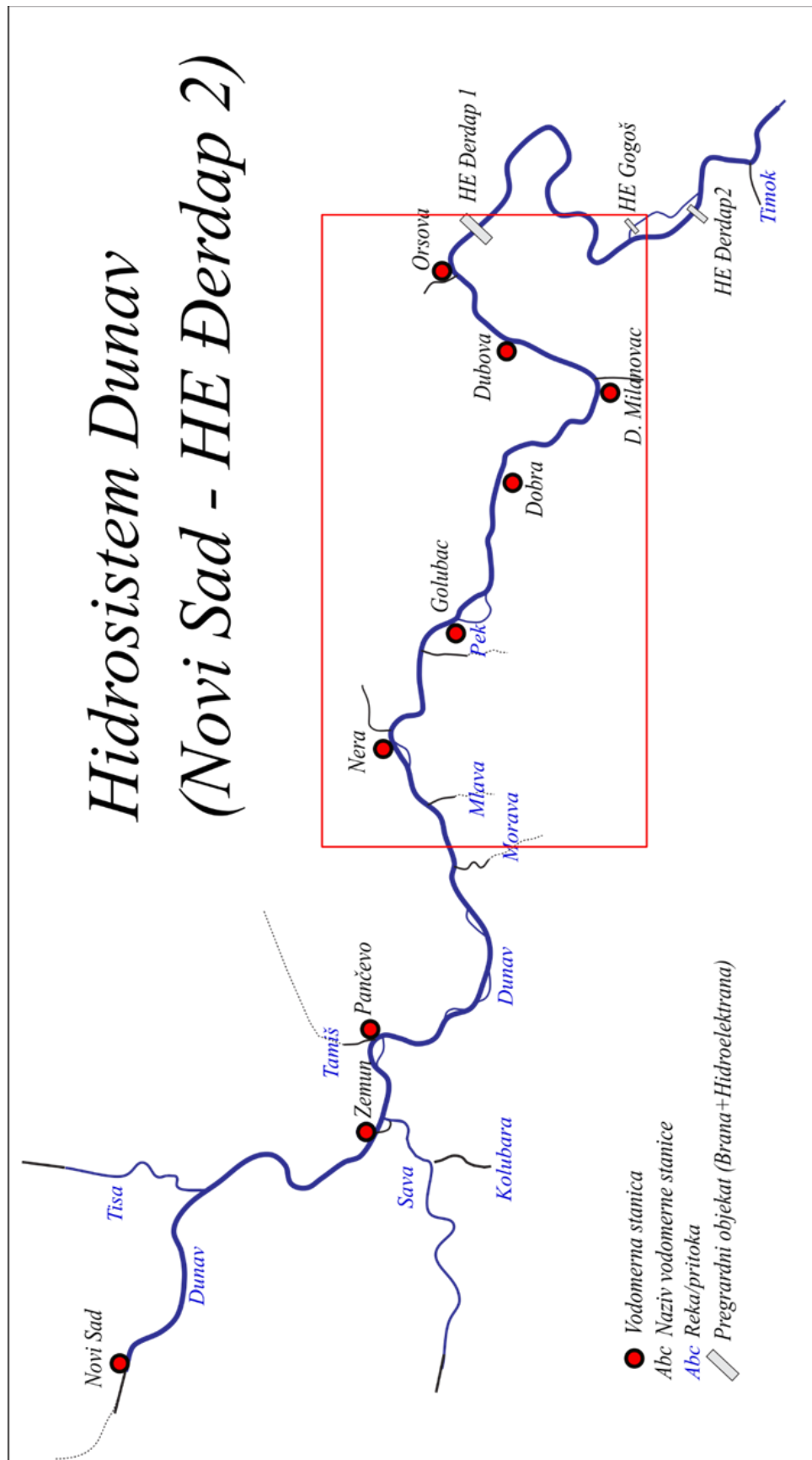
* C – oznaka da je korišćen Test Primer 2 sa složenim (eng. *Compound*) poprečnim presekom

Potrebno je napomenuti da u ovim slučajevima nije sprovedena detaljna i zahtevna analiza optimalnog podešavanja PID kontrolera, kao ni detaljna analiza optimalne strukture kontrolera. Analizirano je nekoliko slučajeva gde su kontroleri podešeni ručno do prvog zadovoljavajućeg stanja. Upotreba derivativnog faktora je onemogućavala stabilan proračun, zbog čega je derivativni faktor u ovoj analizi isključen ($Kd=0$).

4.2 Primena PID kontrolera na realnim primerima – HE Đerdap

Nakon poređenja performansi dve metode za asimilaciju podataka na prethodnim test primerima, naredni korak je primena nove predložene metodologije na realnim sistemima. Metodologija za brzu asimilaciju podataka pomoću PID kontrolera razvijena je kao alat za podršku u prognozi pri upravljanju Hidroenergetskim sistemom Đerdap na Dunavu.

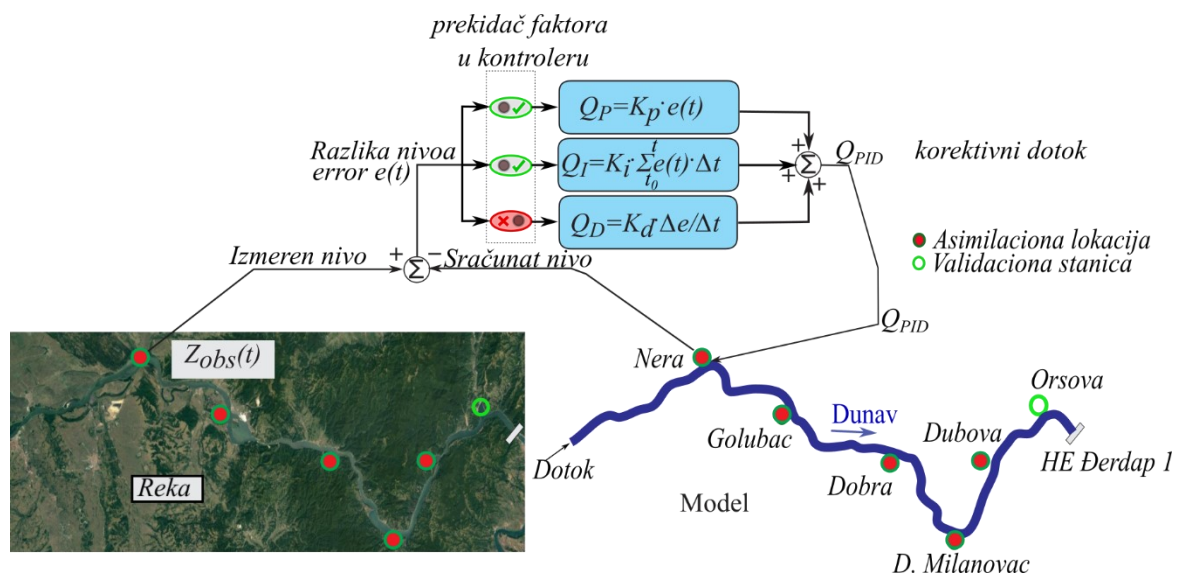
Uticao ovog sistema prostire se i do 300 km uzvodno od HE Đerdap 1, do vodomerne stanice Novi Sad, pa se ova deonica podrazumeva pod Hidrosistemom Dunav (Slika 22).



Slika 22. Hidrosistem Dunava sa označenim delom koji se analizira (Slika 23)

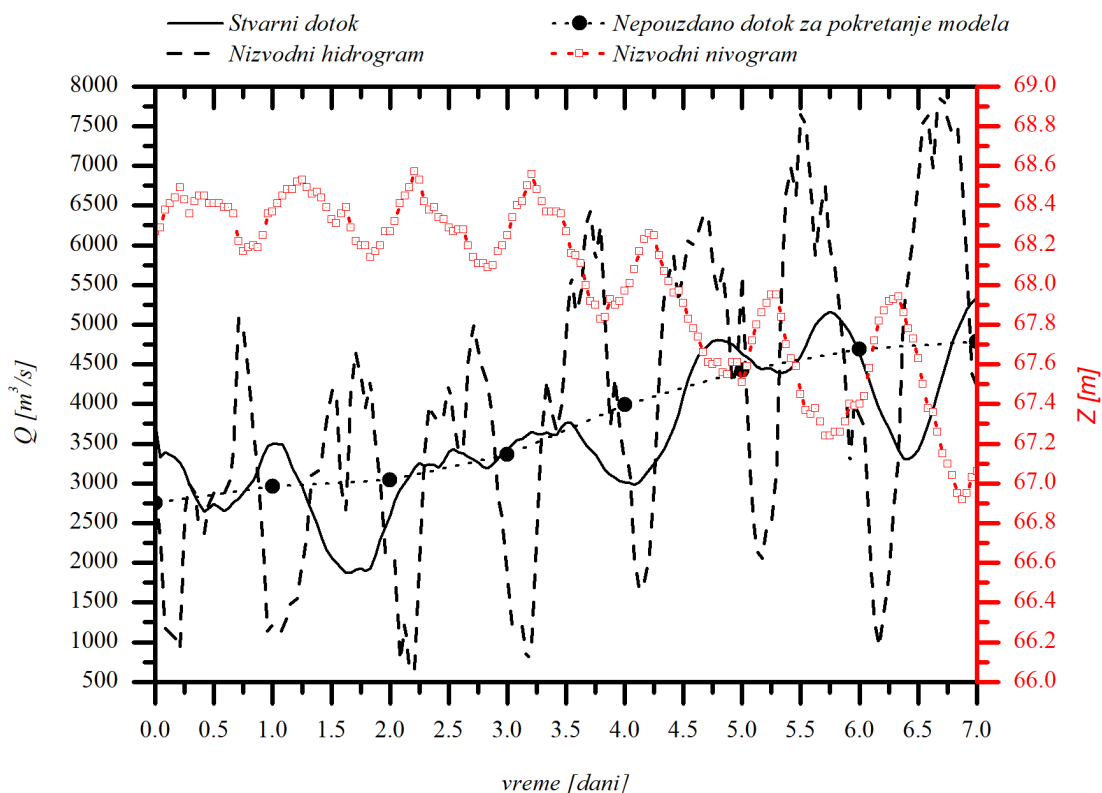
Svakodnevne operacije na ovom sistemu zahtevaju kratkoročnu prognozu nivoa u Đerdapskoj akumulaciji, i zbog nepouzdanih procena dotoka u akumulaciji potrebno je primeniti asimilaciju podataka. Nepouzdanost dotoka u ovaj hidrosistem potiče od nepouzdanost procenjenog dotoka Dunavom, ali i od loše procenjenih protoka na značajnim pritokama kao što su Tisa, Sava i Velika Morava. Nakon ušća ovih dominantnih pritoka (uticaji Tamiša, Mlave i Peka se najčešće mogu zanemariti u odnosu na Dunav i prethodne tri pritoke) dobija se ukupan dotok koji ulazi u Đerdapsku akumulaciju, sa velikom neodređenošću. Zbog toga iz celokupnog hidrosistema izdvojen je podsistem koji se prostire neposredno nizvodno od ušća Velike Morave do HE Đerdap 1. Ovaj podsistem je izdvojen jer je na njegovom uzvodnom kraju (oko 170km od HE Đerdap 1) sadržana ukupna neodređenost dotoka u Đerdapsku akumulaciju (sve značajnije pritoke se do te lokacije uliju u Dunav). Zbog toga se za potrebe ove disertacije usvaja kao dovoljno da predložena metoda za asimilaciju podataka bude primenjena i analizirana na ovakvom primeru. Na ovom primeru analiziraće se optimalna struktura PID kontrolera koji se implementiraju i optimalno podešavanje kontrolera korišćenjem višekriterijumske optimizacije.

Deonica Dunava, sa stvarnom (prirodnom) geometrijom rečnog korita, koja se analizira kao akumulacija HE Đerdap 1 dugačka je 170km (Slika 23). Model tečenja razvijen je korišćenjem modela difuzionog talasa opisanog u poglavlju 3.2. Model deonice Dunava ima jedan dotok na uzvodnom kraju, dok je uticaj svih pritoka na ovoj deonici odbačen. Pritoke se ne razmatraju zbog nedostatka ili nepouzdanih podataka, čime se i pokazuje opravdanost pretpostavke o nepouzdanosti graničnih uslova kao dominantnog izvora neodređenosti modela. U sistemu se analizira šest mernih lokacija: Nera (132km uzvodno od brane/hidroelektrane), Golubac (100km uzvodno od brane/hidroelektrane), Dobra (74km uzvodno od brane/hidroelektrane), Donji Milanovac (47km uzvodno od brane/hidroelektrane), Dubova (25.7km uzvodno od brane/hidroelektrane) i Orsova na udaljenosti od 10.3km od hidroelektrane. Prvih pet lokacija, od Nere do Dubove, koriste se kao asimilacione lokacije na kojima se implementiraju PID kontroleri koji regulišu nivoe u modelu, dok se merna stanica Orsova koristi za validaciju.



Slika 23. Deo hidroenergetskog sistema Đerdap koji se analizira: deonica duga 170km uzvodno od brane i HE Đerdap 1 sa 6 mernih lokacija

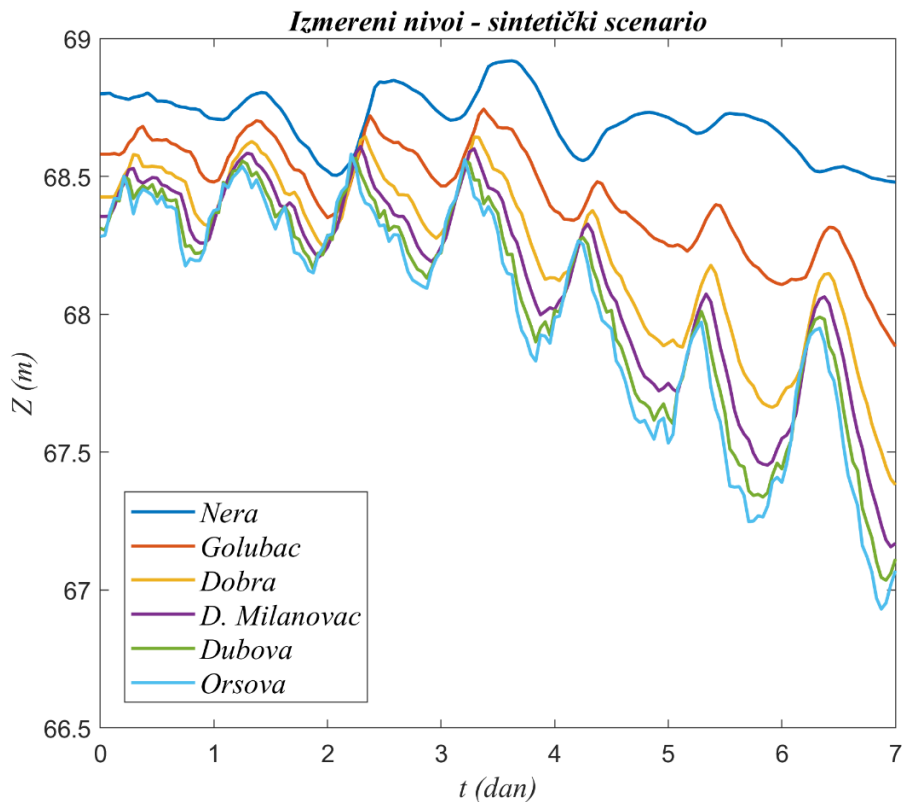
Za analizu optimalne strukture PID kontrolera koristi se hipotetički (sintetički) scenario. Podaci koji predstavljaju merene nivoe su generisani koristeći usvojeni stvarni hidrogram dotoka (Slika 24 - crna linija). Ukupna zapremina koja ulazi u sistem za period od 7 dana je $2.136 \times 10^9 \text{ m}^3$. nakon toga, hidrogram se menja i koristi si procenjeni hidrogram (Slika 24 - isprekidana crna linija sa kružnim markerima). Ovako promenjeni hidrogram koji simulira realne slučajeve u kojima je dotok nepouzdan (loše procenjen) zadat je kao granični uslov na uzvodnom kraju sa ukupnom zapreminom od $2.268 \times 10^9 \text{ m}^3$, pri čemu je prosečna razlika dotoka između stvarnog i promenjenog hidrograma $104.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. Na nizvodnom kraju koriste se hidrogram protoka kroz hidroelektranu i nivogram u zoni hidroelektrane. Za generisanje stvarnih stanja na deonici Dunava koristi se nivogram (Slika 24 - crvena linija), dok se u fazi pokretanja modela sa asimilacijom kao nizvodni granični uslov koristi hidrogram isticanja (Slika 24 - crna isprekidana linija). Stvarni („mereni“) nivooi na mernim lokacijama uzorkovani su sa vremenskim korakom od $\Delta t_{obs}=1 \text{ h}$, dok je vremenski korak modela $\Delta t=60\text{s}$. Na ovaj način, kao i kod test primera za benchmark sa EnKF metodom, ovo simulira stvarne uslove u kojima je vremenski korak uzorkovanja podataka sa mernih mesta znatno veći od vremenskog koraka sa kojim radi model. Ukupan vremenski period koji se analizira, tj. trajanje simulacije, je $t_{sim}=7$ dana.



Slika 24. 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

Pri modeliranju otvorenih tokova, posebno reka i kanala u kojima je značajan uticaj nizvodnog graničnog uslova, predlaže se upotreba sledećeg paketa graničnih uslova: hidrogram na uzvodnom kraju a na nizvodnom nivogram ili jasno definisana veza između nivooa i protoka (kriva protoka). Međutim, u velikom broju slučajeva hidroelektrane sa akumulacijom plan upravljanja hidroelektranom prave prema protocima (hidrogramima isticanja) dok vezu između

nivoa i protoka u zoni pregradnih objekata nije lako definisati (mogućnost prelivanja, samo isticanje kroz turbine, isticanje kroz temeljni ispust). Zbog toga se u ovim slučajevima na nizvodnom kraju često koriste hidrogrami isticanja kao nizvodni granični uslov, što stvara problem, jer su nivoi (koji na neki način zavise od isticanja) ti koji diktiraju stanje duž rečne deonice. Ovo je, pored nepuzdanog dotoka na uzvodnom kraju, još jedan slučaj uticaja nepouzdanog graničnog uslova na razliku između izmerenih i nivoa dobijenih modelom. Za asimilaciju se koriste stvarni nivoi na šest mernih stanica (Slika 25).



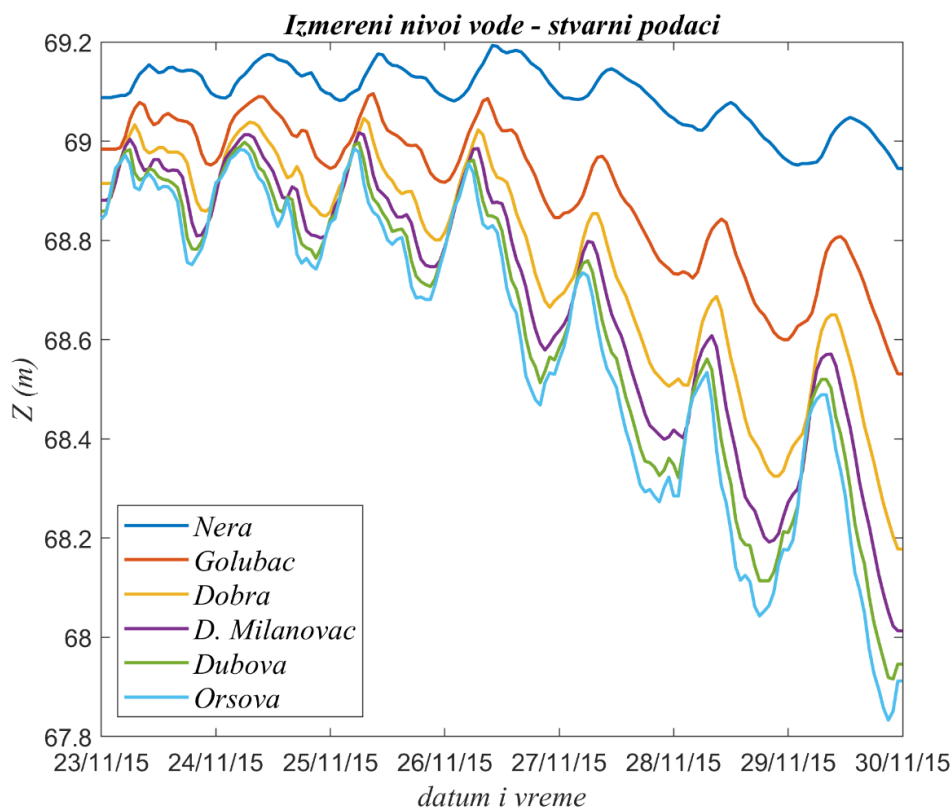
Slika 25. Nivoi na mernim stanicama dobijeni korišćenjem „stvarnog“ hidrograma dotoka (za sintetički scenario) za period od 7 dana

Na ovom primeru vrši se analiza optimalne strukture PID kontrolera prema proceduri u tri faze koja je opisana u poglavlju 3.6. Koristi se set identičnih kontrolera na svim lokacijama (parametri kontrolera se ne razlikuju među kontrolerima). U Fazi 1, proporcionalnom koeficijentu K_p se dodeljuju vrednosti 10^n ($-3 \leq n \leq 3$, pri čemu je n ceo broj). U drugoj fazi se usvaja K_p iz prve faze koji je prema indikatorima preformansi omogućio najbolje rezultate, dok su vrednosti integrativnog koeficijenta 10^n ($-3 \leq n \leq 3$, pri čemu je n ceo broj). U Fazi 3, na usvojene vrednosti K_p i K_i dodaje se i derivativni faktor, gde su vrednosti K_d - derivativnog koeficijenta 10^n ($-3 \leq n \leq 4$, pri čemu je n ceo broj).

Nakon sprovedene analize i utvrđivanja optimalne strukture PID kontrolera, kao i okvirnog opsega u kom se nalaze vrednosti parametara kontrolera koje obezbeđuju stabilan proračun, prelazi se na podešavanje parametara kontrolera (simultano, svaki zasebno). Primenjuje se višekriterijumska optimizacija kao alat za podešavanje parametara na način na koji je to opisano u poglavlju 3.7. Jedan od glavnih parametara koji utiče na rezultate optimizacije

primenom algoritma je brojnost populacije. U ovom istraživanju je ispitano optimalno podešavanje kontrolera metodom *NSGA-II* sa brojnošću populacije od 30, 50 i 100 jedinki.

Opisani test primer sa stvarnom geometrijom rečnog korita i hipotetički scenariom služi za ispitivanje optimalne strukture PID kontrolera kao i optimalno podešavanje parametara kontrolera. Podešeni kontroleri će se dodatno testirati na istom primeru sa prikupljenim izmerenim podacima o nivoima na ovoj deonici (Slika 26).



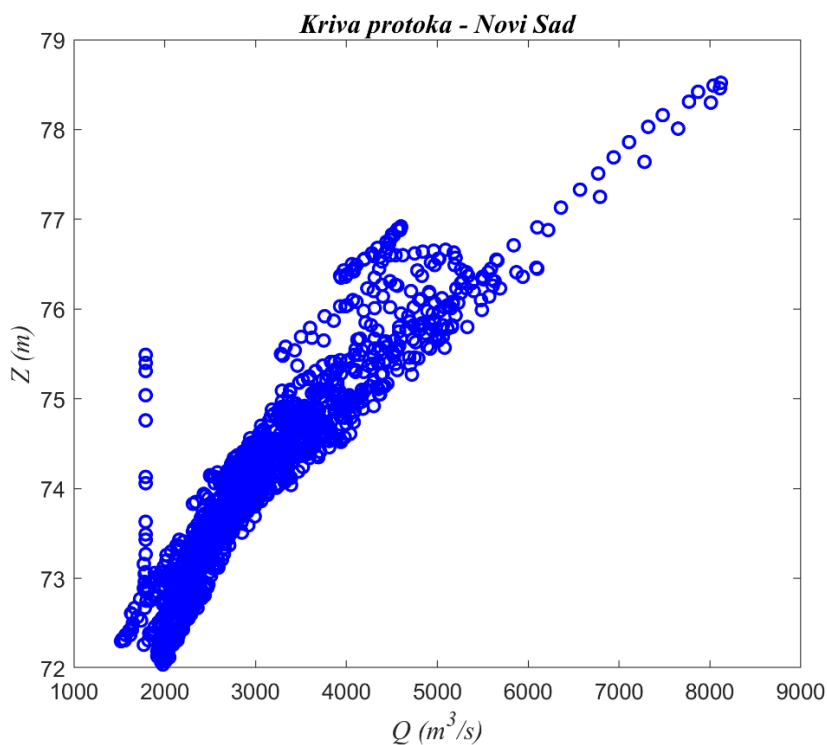
Slika 26. Izmereni nivoi na 6 mernih stanica u periodu od 23.11.2015. do 30.11.2015.

Za slučaj stvarnog scenarija, raspolaže se samo izmerenim nivoima (Slika 26) i hidrogramom isticanja koji je isti kao i za sintetički scenario. Pošto nema podataka o procenjenom ulaznom hidrogramu koristiće se isti procenjeni dotok koji se koristi i za hipotetički scenario (Slika 21). Zbog manjka podataka ovaj scenario se koristi samo za ilustraciju rada kontrolera koji su optimizovani na hipotetičkom scenariju.

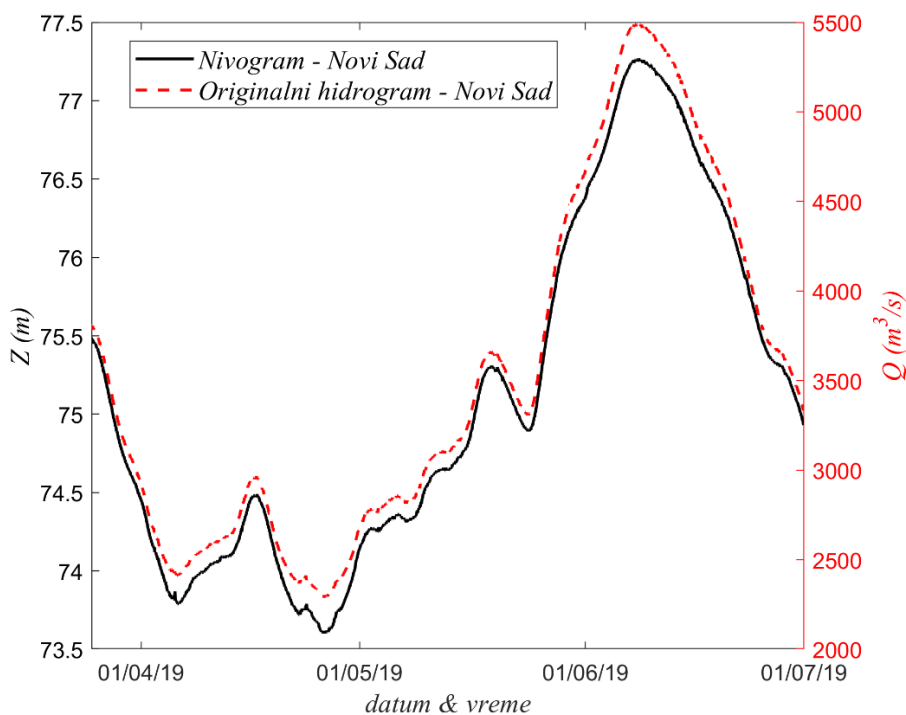
4.3 Primer za rekonstrukciju hidrograma

Test primer Hidrosistema Dunava (Slika 22), opisan u poglavlju 4.2, poslužiće i za proveru mogućnosti rekonstrukcije hidrograma. Rekonstrukcija hidrograma na vodomernim lokacijama sprovedeće se na nizvodnom delu hidrosistema koji odgovara Đerdapskoj akumulaciji (Slika 23). Analiziraće se mogućnost rekonstrukcije „stvarnih“ hidrograma na asimilacionim lokacijama na kojima su u modelu implementirani PID kontroleri što može dodatno doprineti poboljšanju upravljanja hidroenergetskim sistemom.

Pitanje rekonstrukcije hidrograma uz bolju procenu veze merenih kota nivoa i stvarnog protoka (u odnosu na postojeću koja je rezultat višegodišnjih merenja hidrološkoj stanici Novi Sad – Slika 27) testiraće se na najuzvodnijem kraju hidrosistema Dunava, u okolini Novog Sada (Slika 22), gde se nalazi i merna stanica na kojoj se na satnom nivou beleže nivoi.



Slika 27. Kriva protoka na vodomernoj stanici Novi Sad formirana na osnovu dnevnih osmatranja nivoa i protoka (zabeleženi uzorci) u periodu od 01.01.2012. do 31.12.2015.



Slika 28. Vremenske serije nivoa na vodomernoj stanici Novi Sad i procenjenog dotoka na osnovu krive protoka za period od 25.03.2019. do 01.07.2019.

Ovim postupkom moguće je rekonstruisati ulazni hidrogram koji je jedan od graničnih uslova, a na osnovu toga, moguće je smanjiti nepouzdanost originalne krive protoka (Slika 27). Dostupni su podaci o nivou u periodu od 25.03.2019. do 01.07.2019., kao i procenjeni dotok (Slika 28).

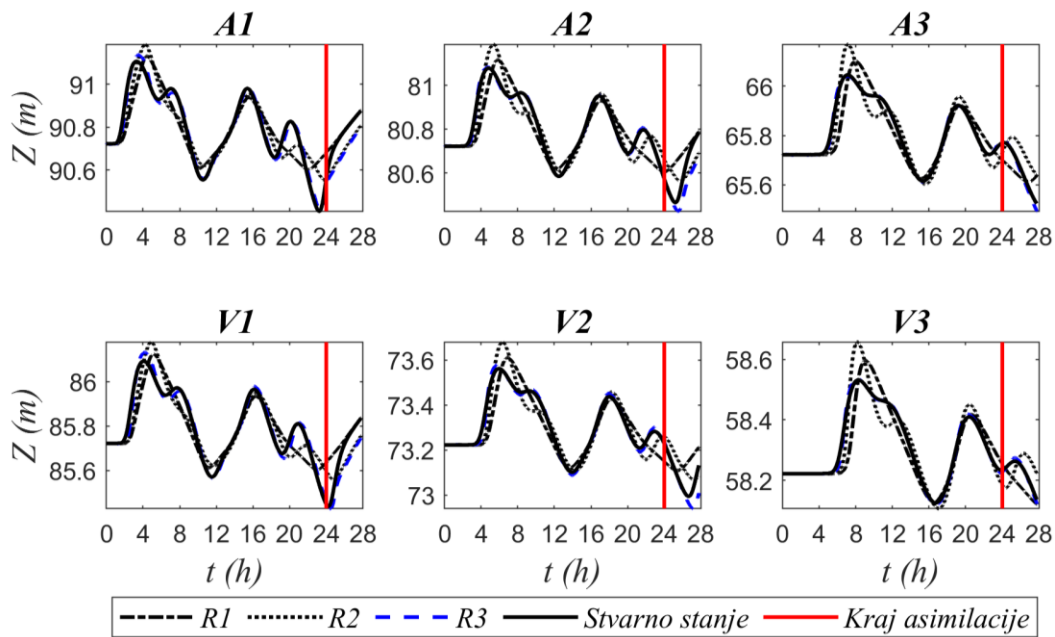
5 Rezultati i diskusija

5.1 Rezultati benchmarking-a

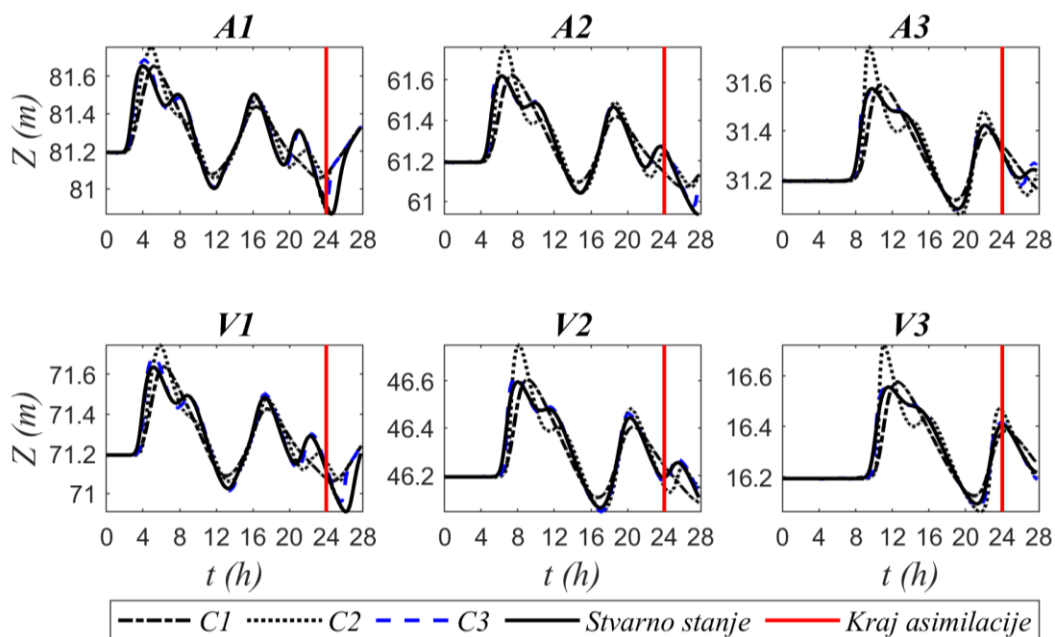
Nova metoda za brzu asimilaciju podataka poredi se sa EnKF metodom na primerima koji su opisani u poglavlju 4.1, u cilju davanja odgovora na prvo istraživačko pitanje (Zadatak 1). Poredi se dostizanje izmerenih nivoa na mernim stanicama, u asimilacionom periodu, greške tokom procesa asimilacije (*error*) kao i svi indikatori performansi asimilacije podataka uz poređenje utrošenog računarskog vremena.

Kada se za asimilaciju podataka koristi metoda zasnovana na teoriji PID kontrolera, glavni problem je podešavanje parametara kontrolera (eng. *tuning*). Pošto je akcenat pri poređenju ove dve asimilacione metode na tome da se pokaže opravdanost korišćenja nove metode sa stanovišta uštede računarskog vremena, u ovom delu se neće ulaziti u optimalno podešavanje parametara kontrolera koje je opisano u poglavlju 3.7. Parametri kontrolera će se podesiti ručno (*trial & error* pristup) dok se ne utvrdi kombinacija koja daje zadovoljavajuće rezultate i ta kombinacija parametara će se kasnije koristiti za poređenje sa EnKF metodom. Nakon potvrde o efikasnosti nove asimilacione metode, sa stanovišta uštede računarskog vremena, pristupiće se implementaciji nove metode na realne primere uz rešavanje ostalih zadataka koji prate primenu ove metode.

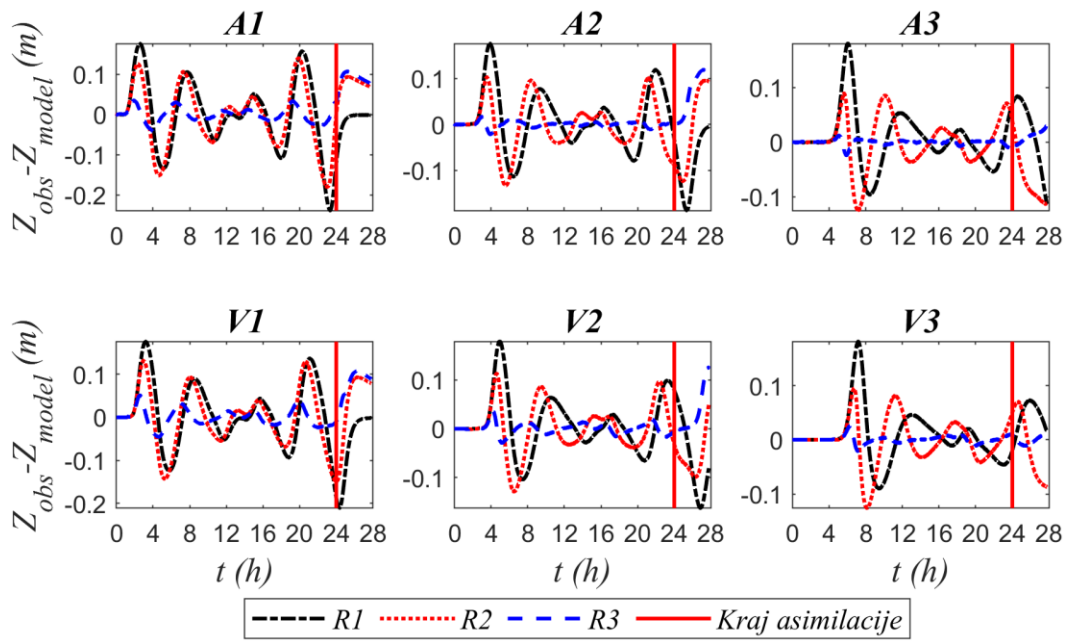
Prve varijante PID kontrolera (Tabela 2 - varijante *R1* i *C1*), prikazane crta-tačka-crta linijama (Slika 29 i Slika 30), su varijante u kojima se koristi samo proporcionalni faktor, gde je vrednost proporcionalnog koeficijenta $K_p=10$. Na osnovu dobijenih nivoa može se jasno videti da upotreba samo proporcionalnog faktora ne dovodi do dostizanja stvarnog stanja kroz model. Zbog toga se pojačava integrativni koeficijent u integrativnom faktoru na vrednost $K_i=0.1$ (Tabela 2 - varijante *R2* i *C2*). Na osnovu vrednosti dobijenih nivoa može se uočiti približavanje stvarnim vrednostima, što pokazuje pozitivan uticaj integrativnog faktora u jednačini kontrolera. Može se uočiti i smanjenje grešaka (*errors*) sa maksimalnih početnih vrednosti od oko 0.16 m (za slučaj *R1*), na vrednosti od oko 0.12 m (slučaj *R2*) uvođenjem integrativnog faktora (Slika 31 i Slika 32), i sa vrednosti od oko 0.22 m (slučaj *C1*) na vrednosti ispod 0.2 m (slučaj *C2*). Na osnovu ovih vrednosti grešaka može se oceniti da ima još prostora za poboljšanje. Zbog toga se dodatno povećava integrativni koeficijent u integrativnom faktoru na vrednost $K_i=1$ (Tabela 2 - varijante *R3* i *C3*). U ovim slučajevima se nivoi, i na lokacijama za asimilaciju i na lokacijama za validaciju, u značajnoj meri poklapaju sa stvarnim vrednostima nivoa. Takođe, vrednosti grešaka značajno se smanjuju u odnosu na slučajeve *R2* i *C2* i približavaju nuli, što je i cilj. Npr. maksimalna vrednost greške, na početku procesa asimilacije, se u slučajevima *R3* i *C3* smanjuje na vrednosti od oko 0.05 m. Dalje povećanje interativnog koeficijenta ne donosi nikakva značajna poboljšanja u rezultatima, tako da će se konfiguracija kontrolera sa koeficijentima $K_p=10$ i $K_i=1$ usvojiti kao merodavna za dalje poređenje sa EnKF asimilacionom metodom.



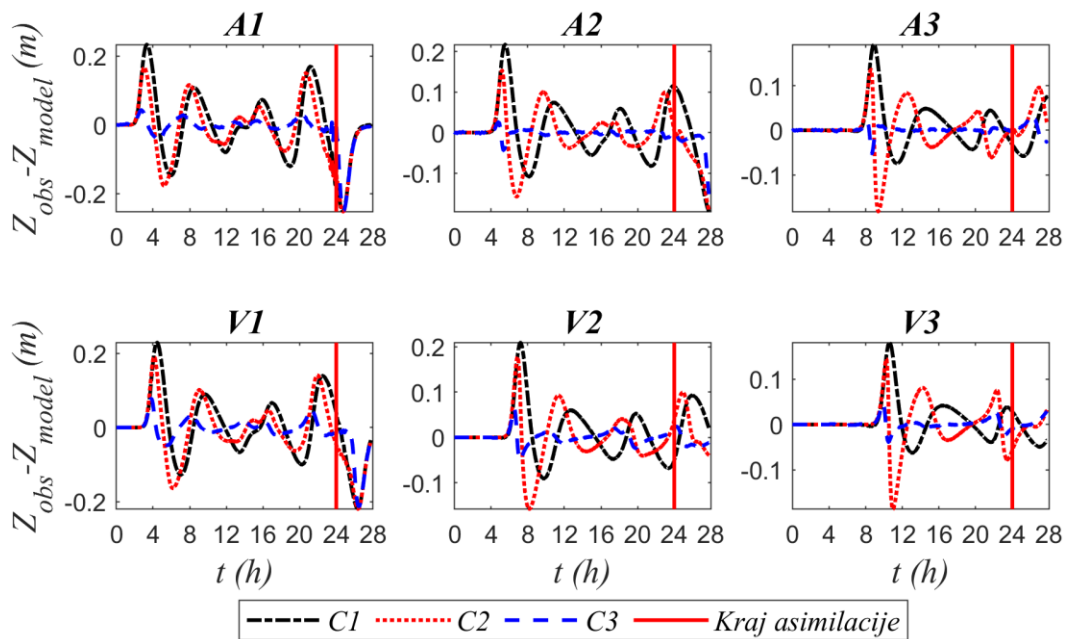
Slika 29. Asimilacija nivoa na 6 mernih stanica test primera sa pravougaonim poprečnim presekom primenom PID kontrolera



Slika 30. Asimilacija nivoa na 6 mernih stanica test primera sa složenim poprečnim presekom primenom PID kontrolera



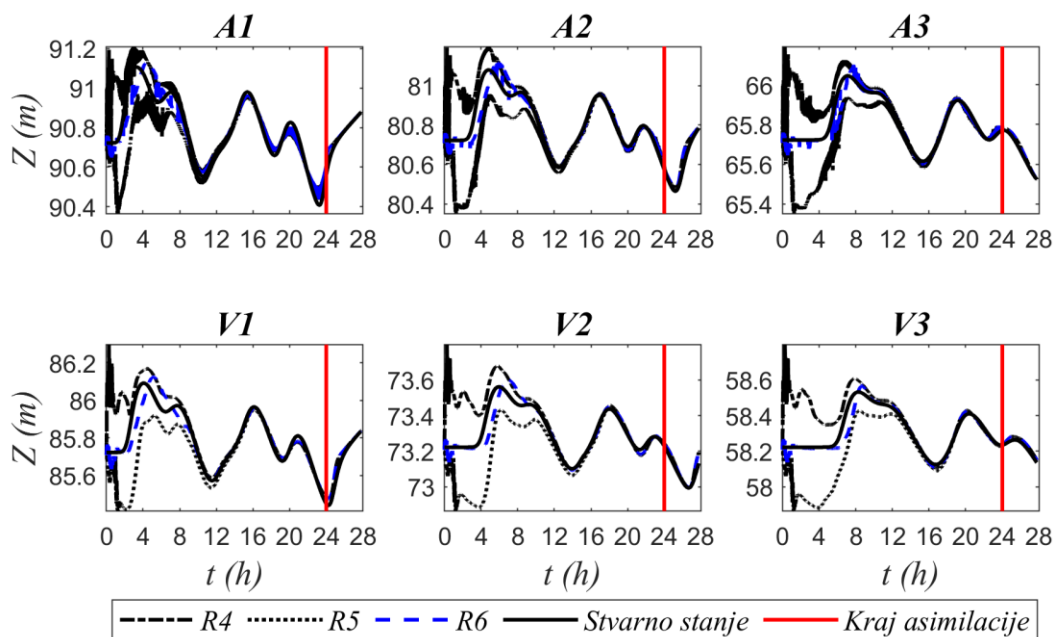
Slika 31. Razlike nivoa (error) pri asimilaciji nivoa primenom PID kontrolera na test primeru sa pravougaonim koritom



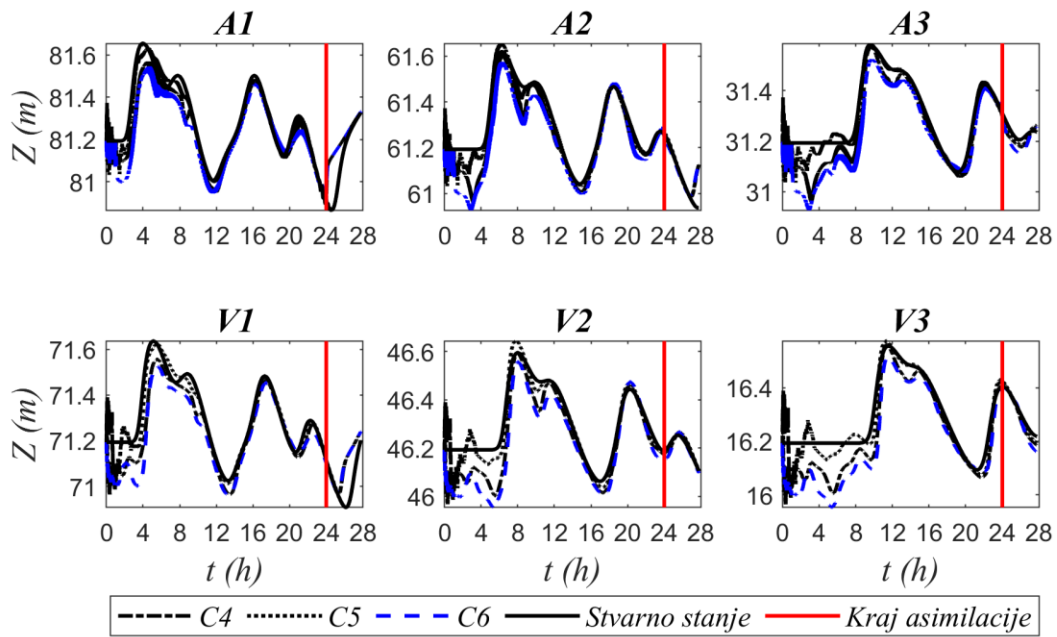
Slika 32. Razlike nivoa (error) pri asimilaciji nivoa primenom PID kontrolera na test primeru sa slozenim koritom

Parametar koji definiše EnKF metodu je veličina ansambla (eng. *ensemble size*). Zbog toga se u ovom delu ispituje EnKF metoda sa veličinom ansambla od 50, 100 i 200 (Tabela 2 - slučajevi *R4, R5, R6, C4, C5 i C6*). Iako su brojna istraživanja koja se tiču primene EnKF asimilacione metode, ne postoji jasno preporučena veličina ansambla, pa se ovde ispituju pomenute vrednosti kao jedne od najčešćih koje se mogu naći u različitim primenama ove metode. Takođe, potrebno je napomenuti i da povećavanje veličine ansambla ne garantuje uvek i poboljšanje u rezultatima (Houtekamer i Zhang 2016).

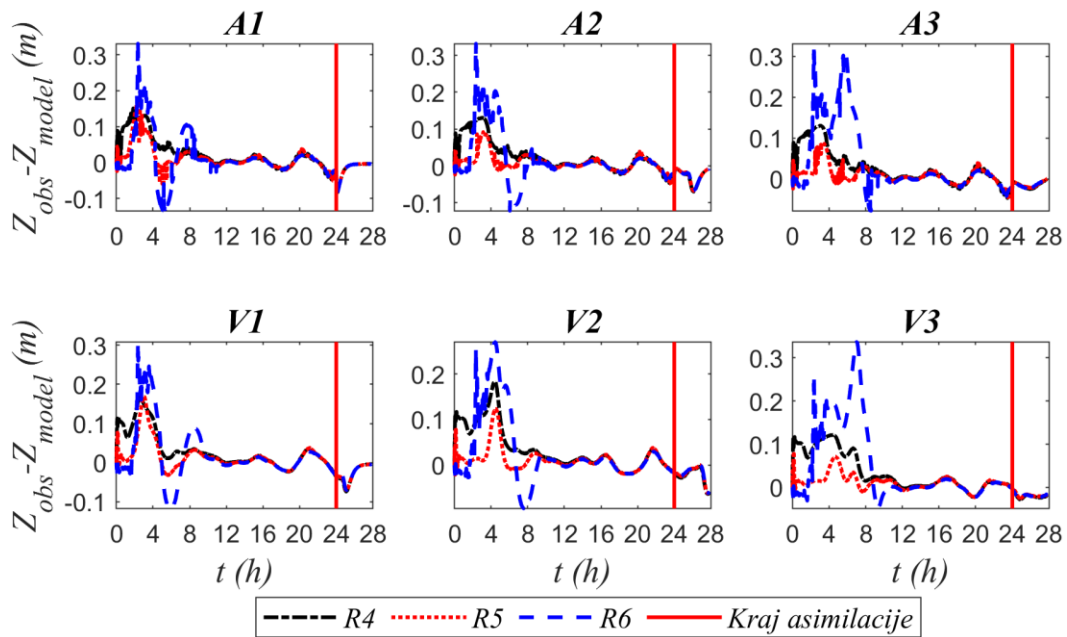
Nivoi na asimilacionim lokacijama i lokacijama za validaciju (Slika 33. i Slika 34.) pokazuju da hidraulički model uparen sa EnKF metodom dostiže stvarne nivoe, bez obzira kolika je veličina ansambla. Jedino se razlikuju greške u početku, što utiče i na brzinu dostizanja željenog nivoa. Greške pri asimilaciji imaju najveće vrednosti, od oko 0.32 m, kada se kod pravougaonog kanala koristi veličina ansambla od 200, dok je najmanja amplituda greške, od oko 0.15 m kada se koristi veličina ansambla od 100 uzoraka (Slika 35). Kada je u pitanju složeno korito, maksimalna amplituda greške se dobija za slučaj kada se koristi veličina ansambla od 50 uzoraka, preko 0.4 m, dok je najmanja vrednost amplitude greške oko 0.2 m, kada je veličina ansambla 200 (Slika 36). Ovo potvrđuje da povećanje veličine ansambla u nekim slučajevima može poboljšati rezultate, dok se u nekim slučajevima to ne dešava.



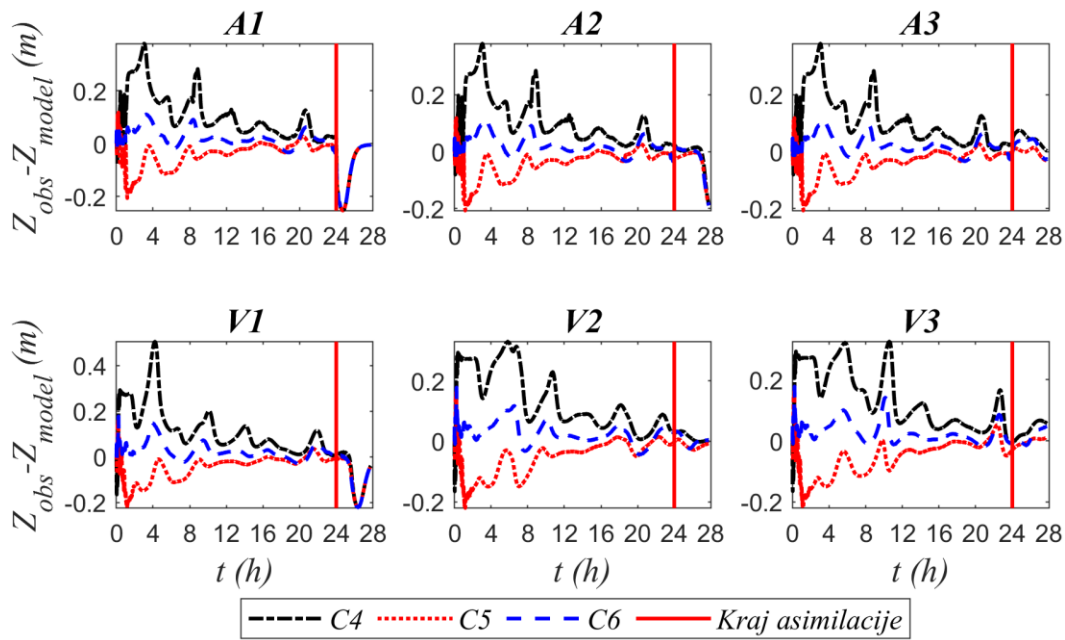
Slika 33. Asimilacija nivoa na 6 mernih stanicama test primera sa pravougaonim poprečnim presekom primenom metode EnKF



Slika 34. Asimilacija nivoa na 6 mernih stanica test primera sa složenim poprečnim presekom primenom EnKF metode



Slika 35. Razlike nivoa (error) pri asimilaciji nivoa primenom EnKF metode na test primeru sa pravougaonim koritom



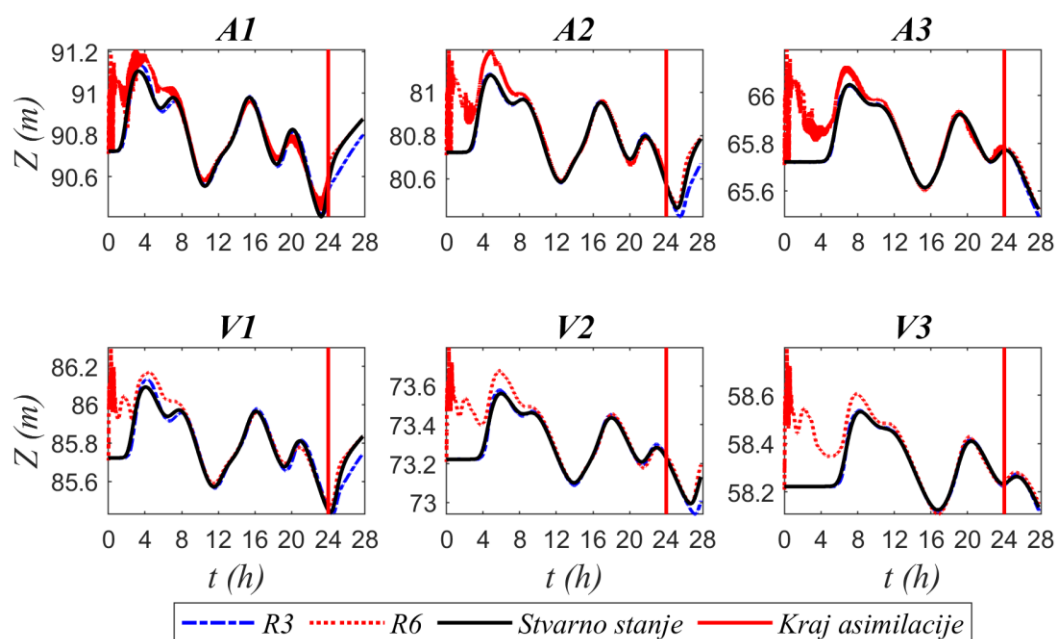
Slika 36. Razlike nivoa (error) pri asimilaciji nivoa primenom EnKF metode na test primeru sa složenim koritom

Kada se uporede dve opisane metode asimilacije podataka, pri čemu su kao reprezent rezultata dobijenih primenom EnKF metode uzeti slučajevi sa 200 uzoraka (*R6* i *C6*) u ansamblu (Slika 37 i Slika 38) mogu se uočiti razlike u nivoima. Nivoi korigovani PID kontrolerima (slučajevi *R3* i *R6* sa dovoljno dobro podešenim kontrolerima) značajno brže dostižu stvarne nivoe i uspevaju da održe značajno manje greške tokom procesa asimilacije. Posebno se može uočiti da metoda sa kontrolerima nadmašuje EnKF metodu u prvih 4-8 časova asimilacionog perioda, iako je za obe metode korišćen isti početni uslov. Može se protumačiti da je razlog ovome sam matematički aparat metode EnKF. U ovoj metodi potrebno je manuelno kreirati početni ansambl oko vrednosti početnog uslova, na osnovu usvojenih parametara Gausove raspodele (broj uzoraka u ansamblu, srednja vrednost i standardna devijacija). Tako kreiran ansambl, za svaki poprečni presek, se modelom propagira u naredni vremenski trenutak, gde se lako može desiti da pri poređenju neodređenosti modela i merenja, rezultati modela zaosciliraju. Tada je potrebno malo više vremena da se ostvari željeno (izmereno) stanje u modelu. Za razliku od EnKF metode, asimilacija PID kontrolerima je prilično deterministička i veoma brzo se rezultati modela prilagođavaju stvarnom (izmerenom stanju), uz ogradu da je to tako kada je neodređenost merenja veoma mala (podaci su sa velikom poudanošću) pa se mogu primeniti hipoteze opisane u poglavlju 2.5.

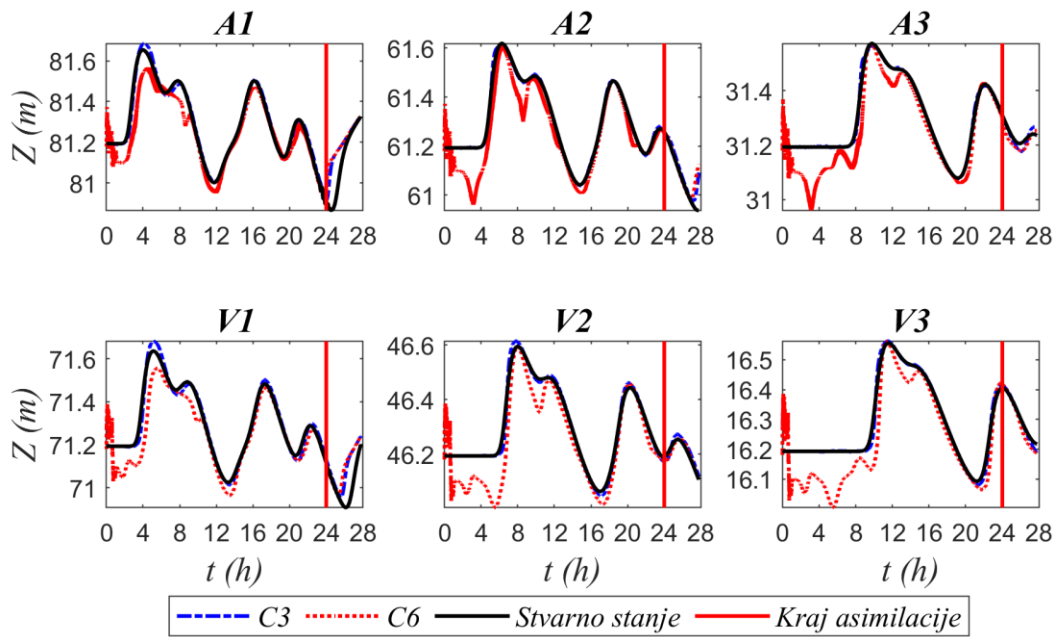
Dalje poređenje ovih metoda tiče se upoređivanja na osnovu vrednosti svih indikatora kvaliteta asimilacije (Slika 39 i Slika 40). Sa stanovišta *RMSE* indikatora, asimilacija pomoću PID kontrolera daje dosta bolje rezultate od metode EnKF. Za slučaj dobro podešenih kontrolera (slučajevi *R3* i *C3*) vrednosti prosečnog *RMSE* indikatora su 0.023 m (Slika 39 i Tabela 3) i 0.024 m (Slika 40 i Tabela 3), respektivno. Isti indikator, kada se koristi metoda EnKF, ima najmanju vrednost 0.029 m za slučaj pravougaonog korita (Slika 39 - slučaj *R5* i Tabela 3), dok je ta vrednost za složeno korito 0.048 m (Slika 40 i Tabela 3 - slučaj *C6*). Ovi rezultati dovode do zaključka da asimilacija PID kontrolerima nadmašuje EnKF metodu.

Sa stanovišta indikatora amplitude greške (*maxError*) takođe se može videti da asimilacija PID kontrolerima nadmašuje EnKF metodu. Vrednosti *maxError* indikatora (kada su kontroleri dobro podešeni) su 0.086 m za slučaj pravougaonog korita (Slika 39 i Tabela 3 - slučaj R3) i 0.13 m za slučaj složenog korita (Slika 40 i Tabela 3 - slučaj C3). Isti indikator, kada se primenjuje metoda EnKF, ima veće vrednosti i to 0.126 m za slučaj pravougaonog korita (Slika 39 i u Tabela 3 - slučaj R5) i 0.191 m za slučaj složenog korita (Slika 40 i Tabela 3 - slučaj C6). Stoga, i sa stanovišta *maxError* indikatora asimilacija PID kontrolerima pokazuje bolje performanse od metode EnKF.

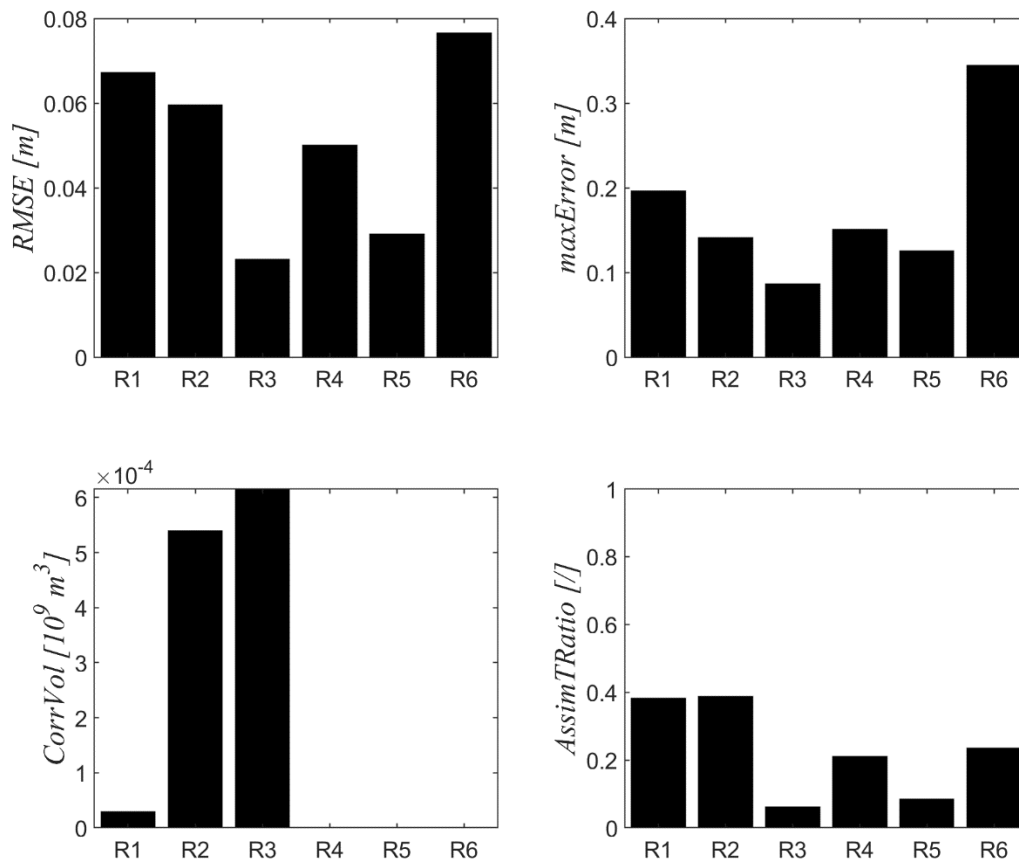
Iako se na osnovu indikatora *RMSE* i *maxError* može reći da metoda asimilacije PID kontrolerima pokazuje bolje performanse od metode EnKF, možda najbolju sliku o kvalitetu asimilacije pomoću PID kontrolera koji se dobija daje indikator *AssimTRatio*. Ovaj indikator pokazuje procentualno (od ukupnog asimilacionog perioda; u decimalnom obliku) koliko je vrednost greške prelazila definisani prag (eng. *threshold*), koji je u ovom istraživanju postavljen na 0.05 m. Rezultati pokazuju da je prekoračenje praga greške u slučaju primene PID kontrolera bilo 6% (0.06) za test sa pravougaonim koritom, i 3% (0.03) za test sa složenim koritom, od ukupnog vremena trajanja simulacije. U isto vreme, te vrednosti, kada se koristi EnKF metoda, su 8.3% (0.083) i 19.1% (0.191). Smanjenje ovog indikatora govori u prilog tome da je čak moguće skratiti asimilacioni period, što takođe daje na značaju kada je u pitanju ušteda računarskog vremena, što je i postavljeno kao jedan od glavnih uslova koji nova asimilaciona metoda treba da zadovolji.



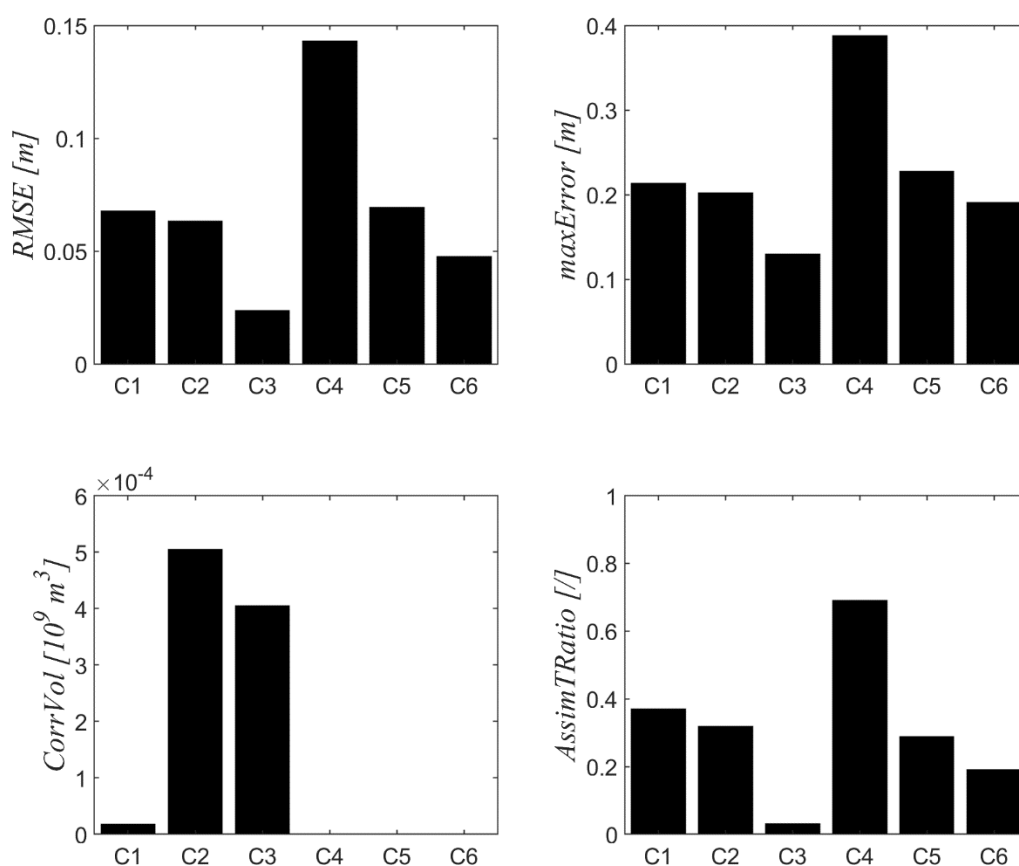
Slika 37. Poređenje nivoa (najboljih rezultata) dobijenih primenom dve metode asimilacije podataka na 6 mernih lokacija test primera sa pravougaonim poprečnim presekom



Slika 38. Poređenje nivoa (najboljih rezultata) dobijenih primenom dve metode asimilacije podataka na 6 mernih lokacija test primera sa složenim poprečnim presekom



Slika 39. Indikatori performansi asimilacije podataka za test primer sa pravougaonim poprečnim presekom



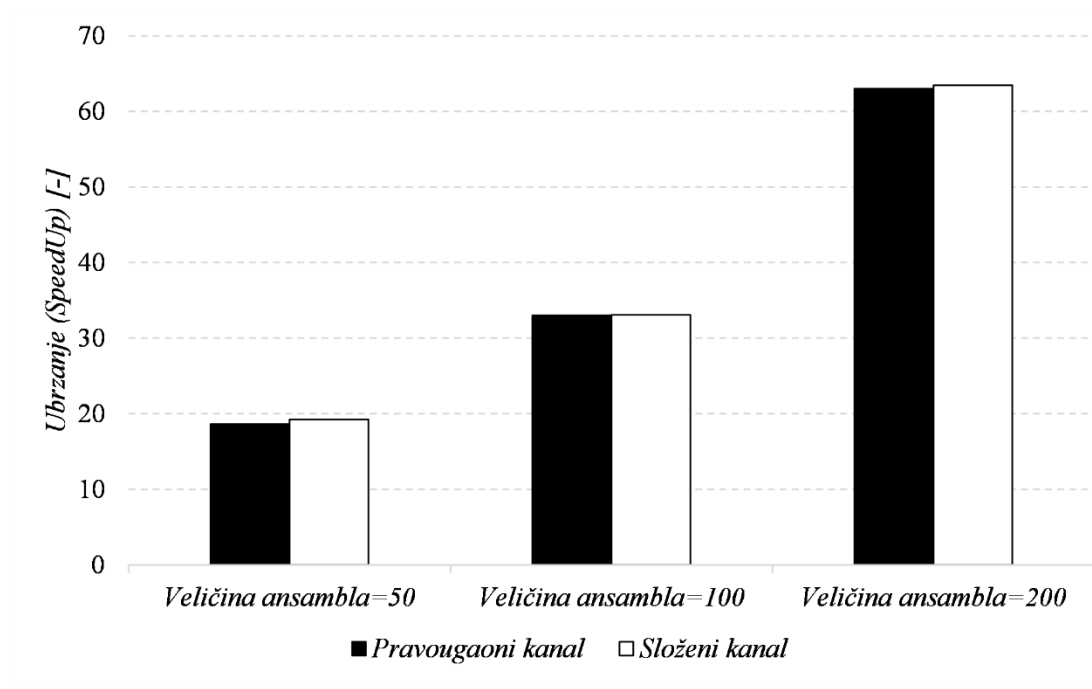
Slika 40. Indikatori performansi asimilacije podataka za test primer sa složenim poprečnim presekom

Dve asimilacione metode se porede i sa stanovišta ubrzanja proračuna, tj. uštede računarskog vremena. Ono što se lako može uočiti (Tabela 3) je da podešavanje kontrolera ne utiče u vidljivoj meri na promenu vremena potrebnog za simulaciju, već utiče samo na indikatore kvaliteta asimilacije (*RMSE*, *maxError* i *AssimTRatio*). Sa druge strane, menjanje osnovnog parametra EnKF metode (veličina ansambla) značajno utiče na vreme potrebo da se izvrši simulacija/asimilacija. Primena obe metode (asimilacija PID kontrolerima i metoda EnKF) sprovedena je u istom okruženju (MATLAB 2018b) korišćenjem istog načina kodiranja. Prosečno ubrzanje (eng. *speed up*) koje se dobija prikazano je na Slika 41, i iznosi 18.64 za test sa pravougaonim koritom i poređenjem sa slučajem u kome se koristi ansambla sa 50 uzoraka, a 19.26 za test sa složenim koritom. Ovo ubrzanje ide do 63 za test sa pravougaonim koritom i veličinom ansambla od 200 uzoraka i do 63.45 za slučaj sa složenim koritom. Može se uočiti da sa povećanjem veličine ansambla u EnKF metodi, dolazi do povećanja prosečnog ubrzanja, i da to povećanje približno linearno raste (ukoliko se veličina ansambla poveća 2 puta i prosečno ubrzanje raste približno 2 puta). Ovo bi moglo da navede na pogrešan zaključak da je moguće smanjiti veličinu ansambla dovoljno, tako da ubrzanje postane zanemaljivo. Ono što je u ovom slučaju potrebno naglasiti je da se tako gubi mogućnost predstavljanja ansambla Gausovom raspodelom (u dovoljno dobroj meri), što je osnovni postulat EnKF metode. Dodatno, ekstremnim smanjenjem veličine ansambla značajno se narušavaju ostali indikatori kvaliteta asimilacije. Ovi rezultati pokazuju jedan od glavnih boljitaka usled primene asimilacije PID kontrolerima, čime je dat odgovor na prvo istraživačko pitanje (Zadatak 1).

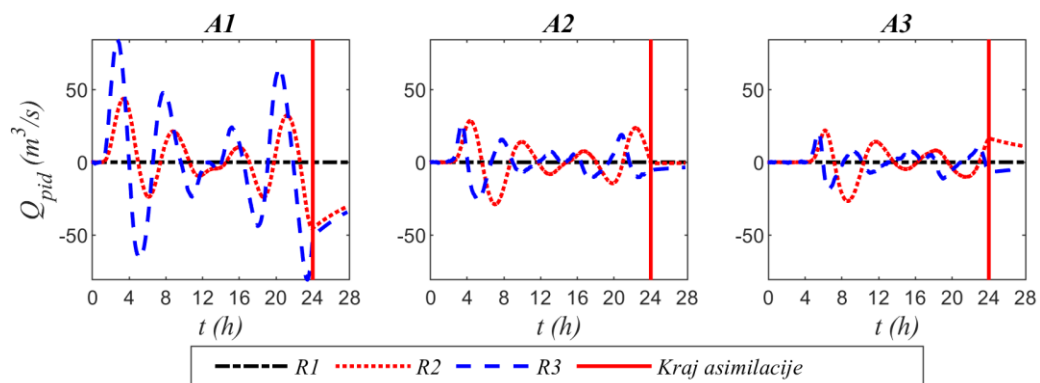
Sa druge strane, dodeljivanje apsolutnog poverenja merenim podacima u metodi EnKF, koje se svodi na to da se Kalmanovom doprinosu K_G dodeli konstanta vrednost 1, teorijski bi moglo da ubrza proračun ovom metodom. Međutim, taj proračun bi i dalje bio sporiji od asimilacije PID kontrolerima jer i dalje postoji određeni broj članova ansambla za koje je potrebno ponaosob pokretati model više puta. Dalja prepravka EnKF metode, u slučaju kada se zaobilazi poređenje neodređenosti modela i merenja, mogla bi da se izvede izbegavanjem ansamblova. Ukoliko bi se i takva intervencija sprovela, došlo bi se na metodu asimilacije podataka predstavljenu u istraživanju Madsen i Skotner (2005). Iako ova metoda može biti korisna (ubrzava proračun), i dalje je prisutan problem gde se ovakvim pristupom asimilacija svodi na direktne intervencije u nivoima vode (nagle promene nivoa) koje nisu fizički zasnovane. Na taj način se narušava zakon održanja mase, što za posledicu može imati nestabilnost modela ukoliko se napravi suviše nagla intervencija. U odnosu na ovu metodu, prednost asimilacije PID kontrolerima ogleda se u tome što je način intervencije u model fizički zasnovan (u vidu bočnog dotoka) i znatno je blaži. Pored ovoga, uticaj merne neodređenosti moguće je implementirati u metodu asimilacije PID kontrolerima a da se pritom ne pogorša brzina proračuna. Kao što je pomenuto u Poglavlju 3.4, uvođenjem faktora ublaženja C (eng. *attenuation factor*) omogućava se postepeno paljenje/gašenje PID kontrolera. Ovo ostavlja prostor da se PID kontroleri pale/gase u zavisnosti od kvaliteta izmerenog podatka (merne neodređenosti), pri čemu će taj kvalitet biti procenjen alatima za validaciju podataka u fazi pretprocesiranja (Branisavljević i ostali 2010; Branisavljević i ostali 2011). Ovo praktično znači da je u slučaju veoma neopuzdanog podatka moguće ugaziti (ili prigušiti) PID kontroler koji vrši asimilaciju. Na taj način „zaobilazi“ se korektivni dotok koji bi se dobio prema nepouzdanom podatku u nivou. Drugim rečima, u trenucima kada su mereni podaci nepouzdati, PID kontroleri ne rade (ili im je uticaj smanjen) čime se daje veće poverenje modeliranim podacima.

Tabela 3. Rezultati poređenja asimilacionih metoda na test primerima

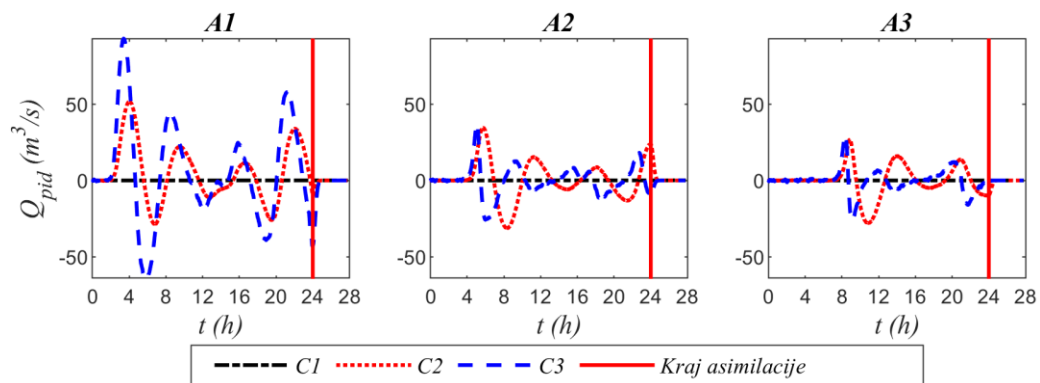
<i>Slučaj</i>	<i>RMSE</i> [m]	<i>maxError</i> [m]	<i>CorrVol</i> [10 ⁹ m ³]	<i>AssimTRatio</i> [/]	<i>Runtime</i> [s]	<i>SpeedUp</i> [/]
<i>R1</i>	0.067	0.197	2.863e-05	0.381	14.582	
<i>R2</i>	0.06	0.141	5.389e-04	0.388	14.612	/
<i>R3</i>	0.023	0.086	6.156e-04	0.06	14.668	
<i>R4</i>	0.05	0.151	/	0.21	272.517	18.64
<i>R5</i>	0.029	0.126	/	0.083	482.489	33.0
<i>R6</i>	0.077	0.345	/	0.234	920.979	62.0
<i>C1</i>	0.068	0.213	1.756e-05	0.37	9.802	
<i>C2</i>	0.063	0.202	5.041e-04	0.317	9.786	/
<i>C3</i>	0.024	0.13	4.04e-04	0.03	9.779	
<i>C4</i>	0.143	0.388	/	0.689	188.137	19.22
<i>C5</i>	0.069	0.227	/	0.288	322.894	32.99
<i>C6</i>	0.048	0.191	/	0.191	619.648	63.30



Slika 41. Prosečno ubrzanje (utrošak računarskog vremena) primenom PID kontrolera kao asimilacione metode u odnosu na metodu EnKF (preuzeto iz Milašinović i ostali 2020)



Slika 42. Korektivni dotoci dobijeni na tri asimilacione lokacije koristeći varijantu PID kontrolera test primeru sa pravougaonim poprečnim presekom



Slika 43. Korektivni dotoci dobijeni na tri asimilacione lokacije koristeći varijantu PID kontrolera koja je dala najbolje rezultate na test primeru sa složenim poprečnim presekom

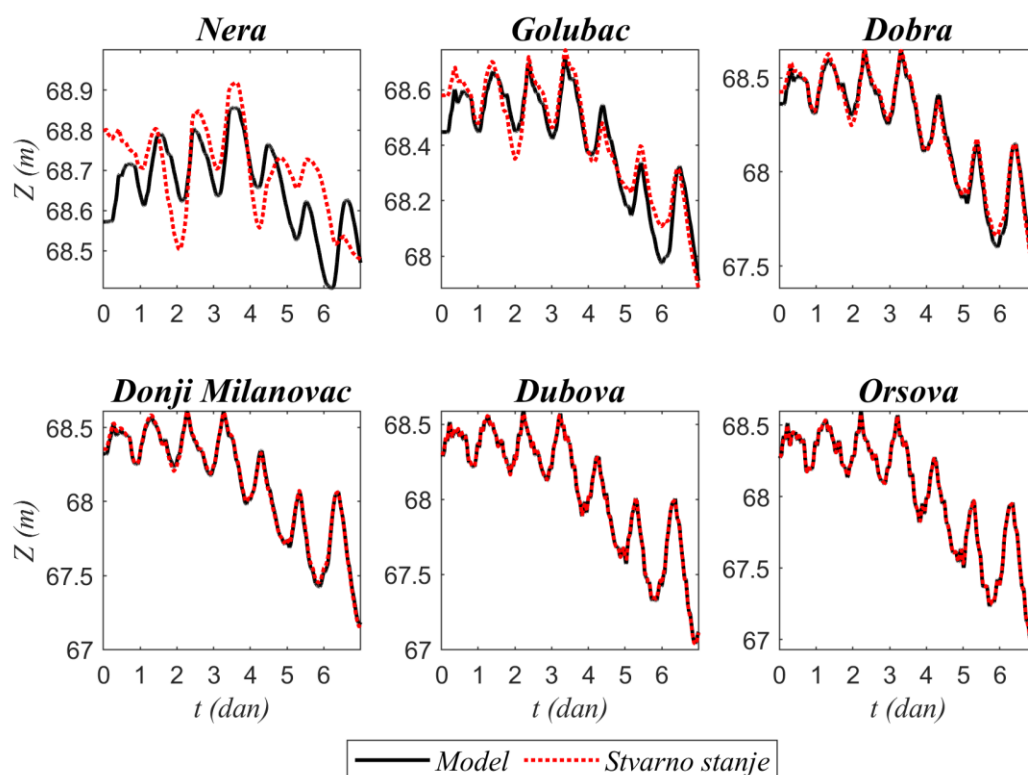
Pored poboljšanja indikatora kvaliteta asimilacije i značajnog ubrzanja proračuna, nova asimilaciona metoda korisna je po još jednom aspektu a koji je posledica indirektnog pristupa asimilaciji nivoa, tj. posledica usaglašavanja nivoa dodavanjem/oduzimanjem korektivnog dotoka u model. Na taj način mogu se ekslicitno dobiti „nedostajući“ protoci (Slika 42 i Slika 43) na asimilacionoj lokaciji koji mogu poslužiti pri rekonstrukciji hidrograma, kao i rekonstrukciji hidrograma kao graničnih uslova, o čemu će više reči biti u okviru poglavlja 5.4.

5.2 Analiza strukture kontrolera

U prethodnom poglavlju (5.1) dat je odgovor na Zadatak 1. Tim odgovorom potvrđena je efikasnost metode za asimilaciju podataka zasnovana na primeni PID kontrolera po pitanju utroška računarskog vremena, u odnosu na referentnu metodu (EnKF). Pored toga, novopredložena metoda se pokazala efikasnija i po pitanju indikatora performansi *RMSE*, *maxError* i *AssimTRatio*, u slučajevima kada važe pretpostavke koje su uvedene u poglavlju 2.5. Dalje analize tiču se primene nove metode za asimilaciju podataka na realnom sistemu opisanom u poglavlju 4.2.

Kao što je napomenuto u drugom od istraživačkih zadataka (Zadatak 2) na koje je potrebno odgovoriti, određivanje optimalne strukture kontrolera je jedan od bitnih koraka neophodnih za potpunu implementaciju ove metode. U ovom radu se ovaj proces sprovodi manuelno i fazno, na način opisan u poglavlju 3.6. Optimalnu konfiguraciju kontrolera moguće je odrediti koristeći i zahtevnije računarske operacije (npr. metode optimizacije), ali se onda proces optimizacije usložnjava jer raste broj parametara čije vrednosti treba odrediti.

Na Slika 44 prikazana je razlika između nivoa vode na vodomernim stanicama dobijena modelom bez asimilacije podataka i izmerenih nivoa. Pošto se koriste nepouzdana granični uslovi (Slika 24), evidentno je da dolazi do značajnih odstupanja sračunatih nivoa u odnosu na stvarne nivoe. Ovo rezultira značajnim odstupanjem modeliranih nivoa u odnosu na stvarne nivoe na kraju sedmodnevnog perioda, posebno na stanicama koje su bliže nizvodnom kraju, tj. hidroelektrani. Na osnovu ovoga jasno se nameće potreba za upotrebom metoda asimilacije podataka. Svaki od elemenata PID kontrolera (proporcionalni, integrativni i derivativni) drugačije utiče na proces asimilacije, pri čemu se lako može desiti da određena kombinacija ovih elemenata, ili čak kontroleri sa sva tri elementa, dovedu do oscilacija nivoa u modelu, rezultujući na kraju nestabilnošću modela. Prema tome, neophodan korak u primeni PID kontrolera kao asimilacione metode je utvrđivanje optimalne konfiguracije kontrolera. Cilj je odrediti najjednostavniju konfiguraciju koja daje zadovoljavajuće rezultate, prema indikatorima kvaliteta asimilacije, koja ujedno ne ugrožava stabilnost proračuna.

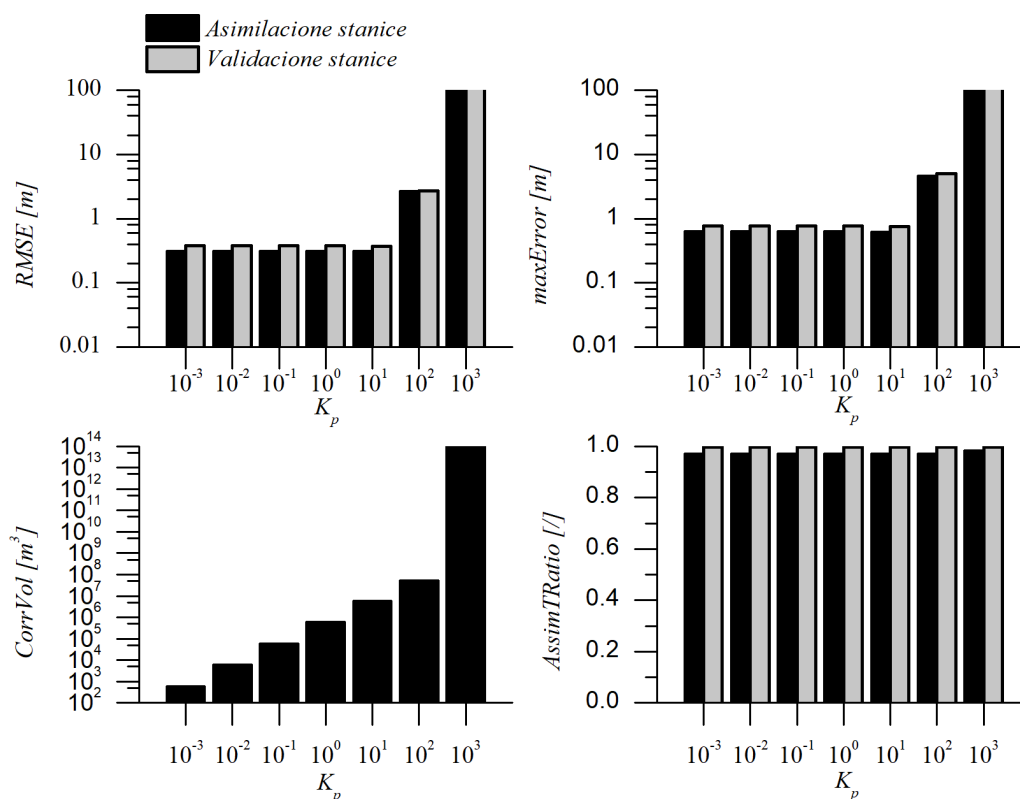


Slika 44. Izmereni i nivoi dobijeni modelom (bez asimilacije podataka) na mernim stanicama Hidroenergetskog Sistema Đerdap za hipotetički scenario

Analiza strukture kontrolera započinje Fazom 1 gde se koristi samo proporcionalni faktor u jednačini kontrolera (19). Vrednosti proporcionalnog faktora se menjaju tako da uzimaju vrednosti 10^n , $n=\{-3,-2,-1,0,1,2,3\}$, pri čemu se posmatra promena indikatora performansi asimilacije (Slika 45). Rezultati su predstavljeni za pet asimilacionih stanica (crna boja) i za jednu validacionu stanicu (siva boja). Ono što je potrebno pojasniti je da za indikator *CorrVol* ne postoji vrednost za lokaciju koja služi samo za validaciju, već isključivo za lokacije na kojima su implementirani kontroleri (Slika 23 - 5 asimilacionih stanica). RMSE vrednosti su više manje iste za sve vrednosti proporcionalnog koeficijenta K_p manje od 100. RMSE se kreće oko 0.3 m za asimilaciona mesta i 0.37 m za validaciono mesto. Indikator *maxError* ima sličan trend kao i RMSE, gde se vrednost ovog indikatora za asimilaciona mesta kreće oko 0.63 m, a za validaciono mesto oko 0.77 m, takođe za vrednosti K_p manje od 100. Dodeljivanje vrednosti 100 proporcionalnom koeficijentu dovodi do naglog porasta vrednosti RMSE i *maxError* indikatora na oko 2.5 i 5, respektivno. Dalje povećanje koeficijenta K_p na 1000 dovodi do nestabilnosti modela (prevelike oscilacije nivoa koje dovode do fizički nemogućih vrednosti za dubine i nemogućnosti da se proračun izvrši do kraja). U takvim slučajevima indikatorima RMSE i *maxError* se automatski dodeljuje vrednost 100, označavajući loše performanse ovako podešenih kontrolera. Takođe, vrednosti indikatora *CorrVol* se povećavaju za nekoliko redova veličine kada se koeficijentu K_p dodeli vrednost 1000.

Relativno male vrednosti indikatora RMSE i *maxError* dobijene za vrednosti koeficijenta K_p manje od 100 mogu da dovedu do pogrešnog zaključka da vrednosti ovog koeficijenta oko 10 daju dovoljno dobra rešenja. Da bi se to potvrdilo ili opovrglo neophodno je pogledati i vrednosti indikatora *AssimTRatio*. Za ovu fazu ispitivanja (Faza 1) vidi se da je vrednost greške

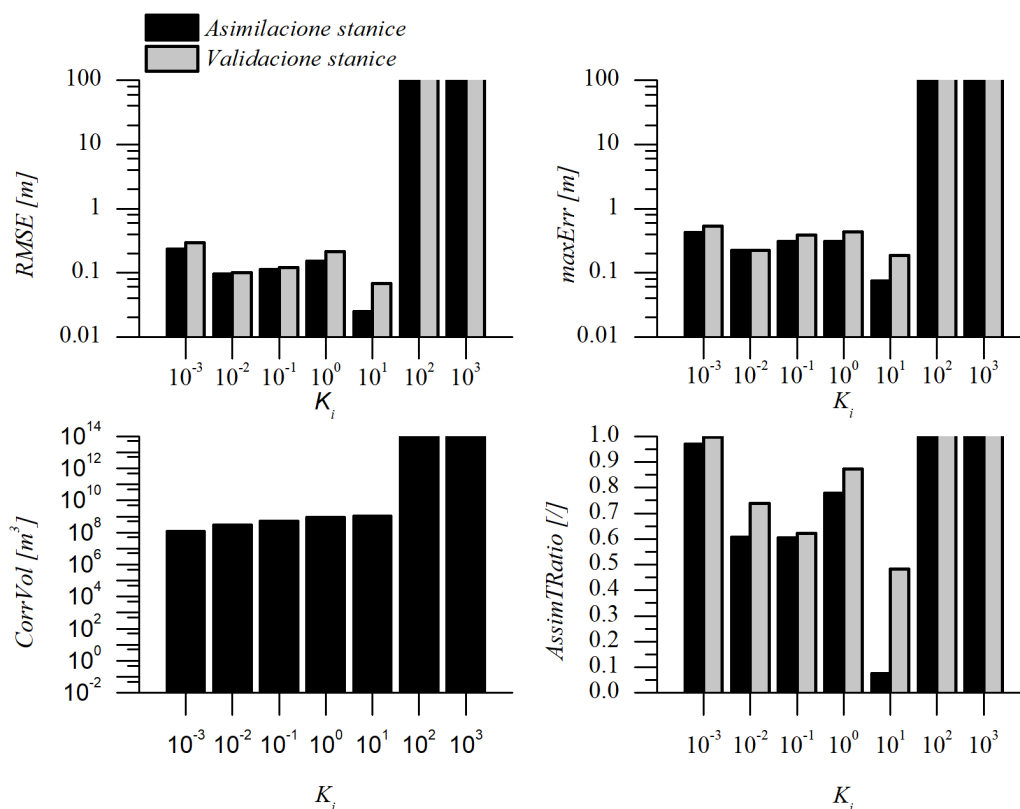
tokom asimilacije (*process error*) veća od zadatog praga od 0.05 m u više od 97% asimilacionog perioda. Ovo pokazuje da korišćenje samo proporcionalnog faktora u kontroleru nije zadovoljavajuća forma pri primeni kontrolera za asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova. Zato je neophodno sprovesti sledeću fazu ispitivanja (Faza 2).



Slika 45. Indikatori performansi asimilacije podataka u prvoj fazi ispitivanja optimalne strukture kontrolera usled povećanja proporcionalnog koeficijenta K_p ($K_i=0$, $K_d=0$)

U Fazi 2 uključuje se integrativni faktor u jednačini kontrolera. Vrednosti integrativnog koeficijenta K_i se menjaju tako da uzimaju vrednosti 10^n , $n=\{-3,-2,-1,0,1,2,3\}$ i usput se posmatraju promene indikatora performansi asimilacije (Slika 46). Integrativni faktor je uključen i dodat na proporcionalni faktor u kom je usvojena vrednost koeficijenta $K_p=10$ (za tu vrednost indikatora kvaliteta su pokazali najbolje rezultate). $RMSE$ indikator je manji od 0.25m za asimilacione stanice i manji od 0.3 m za validacionu stanicu, kada je vrednost integrativnog koeficijenta K_i manja od 100. U ovim slučajevima, $maxError$ je ispod 0.5 m za asimilacione stanice i ispod 0.6 za validacionu lokaciju. Najbolje performanse, sudeći po vrednostima indikatora $RMSE$ i $maxError$ daje slučaj u kome je koeficijent K_i podešen na vrednost 10. Tada je $RMSE$ 0.02 m za asimilaciona mesta i 0.07 m za validaciono mesto. U isto vreme, $maxError$ je 0.074 m za asimilaciono mesto i 0.187 m za validaciono mesto. Dalje povećanje koeficijenta K_i na vrednosti 100 i 1000 dovodi do nestabilnosti modela (vrednosti indikatora $RMSE$ i $maxError$ su 100, što označava loše performanse asimilacije, a vrednost indikatora $AssimTRatio$ je 1, što znači da tokom celog asimilacionog perioda vrednost greške nije spuštena ispod zadatog praga). Ukupna korektivna zapremina, $CorrVol$, se povećava sa povećanjem koeficijenta K_i ali sa blagim trendom porasta (u odnosu na Fazu 1), dok zadavanje vrednosti 100 za koeficijent K_i dovodi do naglog skoka u ukupnoj korektivnoj zapremini, što je posledica nestabilnosti proračuna. Kada se analizira promena indikatora $AssimTRatio$, ubedljivo najbolji

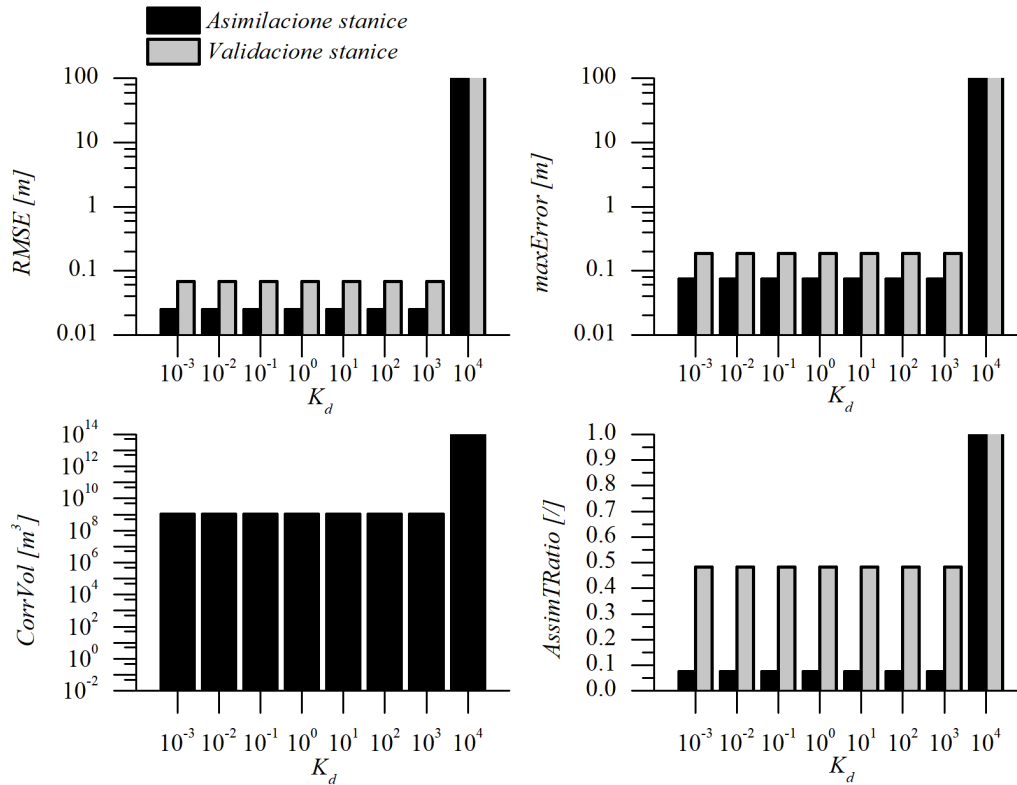
rezultati dobijaju se kada je koeficijentu K_i dodeljena vrednost 10. U tom slučaju vrednost ovog indikatora je 0.075 za asimilacione stanice (što znači da je vrednost greške u samo 7.5% vremena bila iznad zadatog praga), što je značajno poboljšanje u odnosu na rezultate iz Faze 1. Vrednost ovog indikatora je 0.48 za validacionu stanicu, što je osetno veće od asimilacionih stanica, ali opet značajno bolje nego u Fazi 1.



Slika 46. Indikatori performansi asimilacije podataka u drugoj fazi ispitivanja optimalne strukture kontrolera usled povećanja integrativnog koeficijenta K_i ($K_p=10$, $K_d=0$)

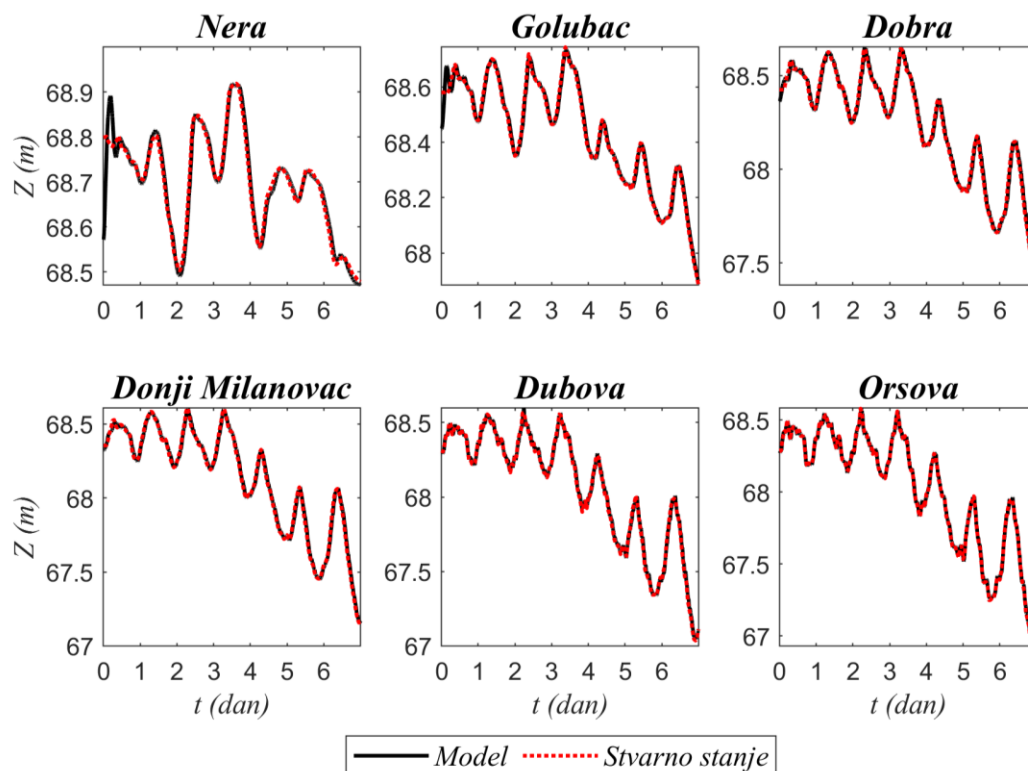
Iako se kroz Fazu 2 došlo do značajnog poboljšanja indikatora performansi, pri čemu bi se moglo usvojiti da je PI (proporcionalno-integrativna) forma kontrolera optimalna, Faza 3 se sprovodi kako bi se ispitalo da li eventualno dodavanje derivativnog faktora dovodi do poboljšanja ili ne. Derivatni faktor se uključuje u jednačini kontrolera, pri čemu se uparuje sa proporcionalnim i integrativnim članom u kojima figurišu koeficijenti $K_p=10$ i $K_i=10$ koji su pokazali najbolje performanse u Fazi 2. Derivativni koeficijent K_d se menja u opsegu 10^n , $n=\{-3,-2,-1,0,1,2,3,4\}$ i analiziraju se vrednosti svih indikatora kvaliteta asimilacije (Slika 47). Povećanje vrednosti koeficijenta K_d do 1000 ne pokazuje nikakvo poboljšanje u indikatorima kvaliteta asimilacije podataka, tj. svi indikatori imaju gotovo iste vrednosti kao u najboljem slučaju iz Faze 2. Ovo se može objasniti činjenicom da relativno dobro podešeni PI kontroleri smanjuju vrednost greške na vrednosti bliske 0, tako da su vrednosti izvoda de/dt u jednačini (19) veoma male. Tako male vrednosti izvoda pomnožene derivativnim koeficijentom (<1000) ne daju gotovo nikakav doprinos u ukupnom korektivnom dotoku dobijenim jednačinom (19) i praktično nemaju nikakav uticaj na proces asimilacije podataka. Efekti primene derivativnog faktora vide se tek kada se derivativnom koeficijentu dodeli vrednost 10000, ali ovo dovodi do drugih problema jer model postaje preosetljiv na korektivni dotok što dovodi do nestabilnosti proračuna. Stoga, nakon sprovedene sve tri faze ispitivanja optimalne strukture kontrolera

utvrđeno je da je PI forma kontrolera optimalna. Drugim rečima, za implementaciju ovih kontrolera kao asimilacione metode u modelima otvorenih tokova dovoljno je (a i poželjno) koristiti samo proporcionalni i integrativni faktor, jer se na taj način (uz dobro podešavanje koeficijenata kontrolera) dobijaju stabilni i zadovoljavajući rezultati. Ovo je ujedno i odgovor na drugo istraživačko pitanje (Zadatak 2).

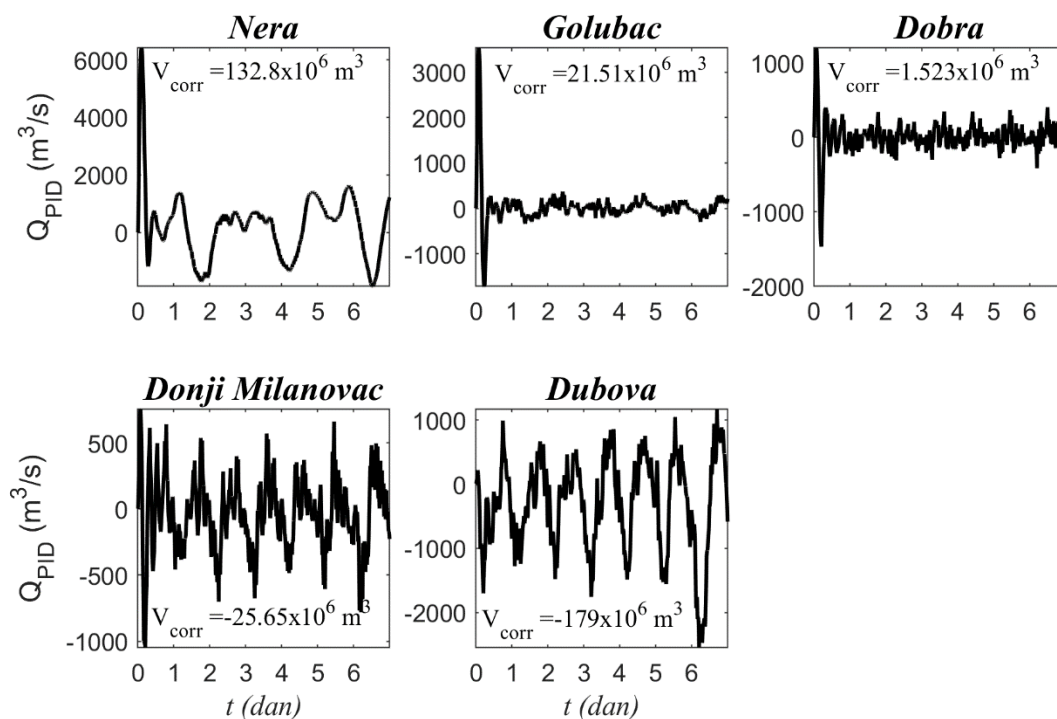


Slika 47. Indikatori performansi asimilacije podataka u trećoj fazi ispitivanja optimalne strukture kontrolera usled povećanja derivativnog koeficijenta K_d ($K_p=10$, $K_i=10$)

Kada se usvojena forma kontrolera (PI kontroler) implementira u hidraulički model na hipotetičkom scenariju dobijaju se usaglašeni nivoi i bolje procenjen početni uslov za dalje prognoze (Slika 48). U ovom test primeru, modelirani nivoi na mernim stanicama (i asimilacionim i validacionim) dostižu stvarne nivoe u prvih pola dana, čime se na kraju sedmodnevnog asimilacionog perioda dobijaju poboljšani početni uslovi. Intervencija kontrolera u modelu prikazana je hidrogramima korektivnih dotoka (Slika 49).



Slika 48. Izmereni i nivoi dobijeni modelom (sa asimilacijom podataka koristeći PI kontroler kao optimalnu strukturu kontrolera) na mernim stanicama Hidroenergetskog Sistema Đerdap za hipotetički scenario



Slika 49. Korektivni dotoci dodati na asimilacionim lokacijama primenom PI kontrolera kao optimalne forme kontrolera ($K_p=10$, $K_i=10$, $K_d=0$)

Kada se hidrogram korektivnog dotoka na prvoj mernoj lokaciji (Nera) integrali i sračuna korektivna zapremina (V_{corr}) na ovoj lokaciji dobija se vrednost od $132.1 \times 10^6 \text{ m}^3$. Razlika između ukupne zapremine koja je stvarno ušla u deonicu i one dobijene na osnovu loše procenjenog dotoka je $104.7 \times 10^6 \text{ m}^3$. Ovo pokazuje da su kontroleri postavljeni u blizini nepouzdanog dotoka sposobni da rekonstruišu i dodaju/oduzmu „nedostajuću“ zapreminu vode. Ostatak od ukupne korektivne zapremine, $CorrVol$, je posledica upotrebe i nepouzdanih nizvodnih graničnih uslova, što je posebno vidljivo na mernim lokacijama koje su bliže tom nizvodnom graničnom uslovu (Slika 49 - primer stanica Dubova). Ovo se dešava iz razloga što kontroleri reaguju na razliku nivoa na određenoj mernoj stanici, bez obzira da li je ta razlika izmerenih i modeliranih nivoa posledica loše procenjenih dotoka na uzvodnoj granici ili nepouzdanih graničnih uslova (loše procenjene krive protoka, hidrogrami umesto nivograma) na nizvodnom kraju. Reakcija kontrolera u vidu korektivnog dotoka, može se dodatno iskoristiti i kao alat za detekciju loše implementiranih graničnih uslova, što može pomoći popravci modela i svim kasnijim analizama i upravljačkim odlukama koje se zasnivaju na rezultatima modela.

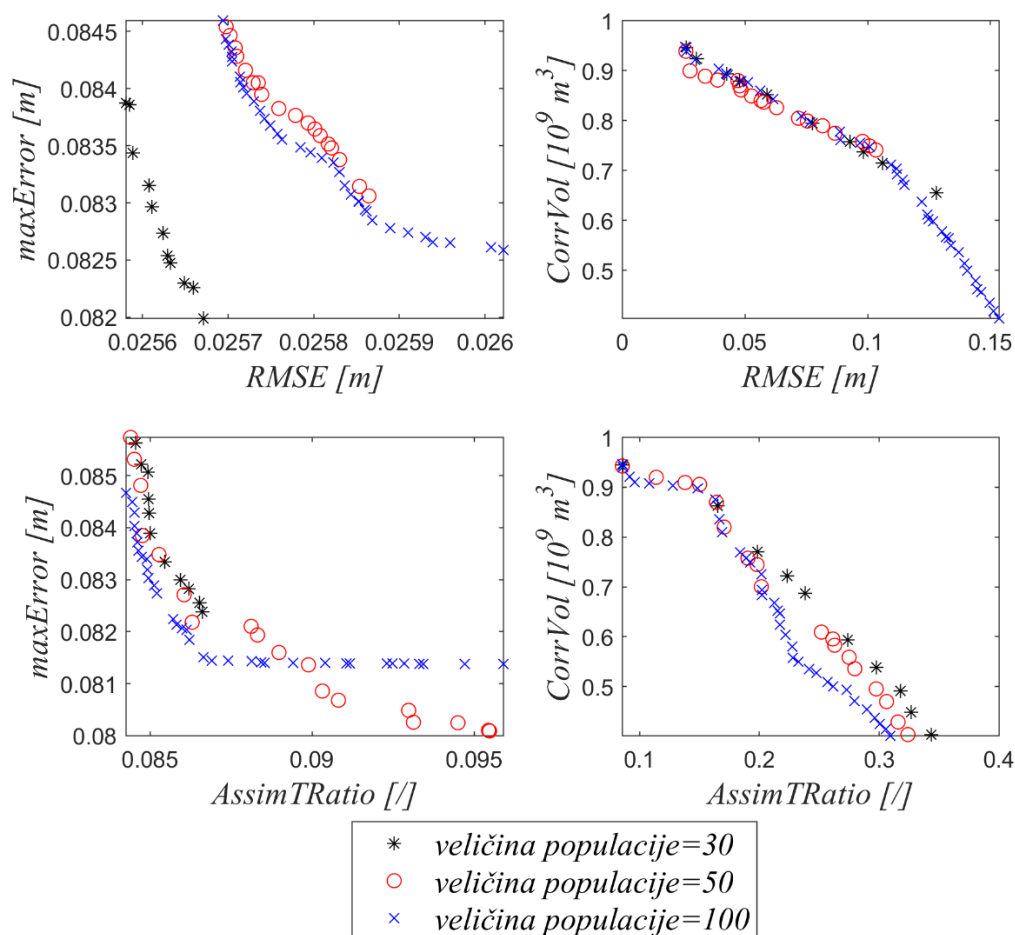
Ono što se dodatno može uočiti na dijagramima korigovanih nivoa (Slika 48) i hidrogramima korektivnih dotoka (Slika 49) je da se u nekim slučajevima, na početku asimilacionog perioda, javljaju velike vrednosti (po apsolutnoj vrednosti) korektivnih dotoka a onda dolazi do njihove stabilizacije. Ove vrednosti korektivnih dotoka dovode i do većih oscilacija nivoa na početku asimilacionog perioda. Uzrok ovoga je potreba modela, u vidu vremena potrebnog da se prilagodi promenama koje u model unose kontroleri. Tada se, u početku, gomila greška jednog znaka (sve greške pozitivne ili sve greške negativne) što dovodi i do ovakvih oscilacija nivoa. Tek kada proces asimilacije odmakne malo, i pojave se i greške suprotnog znaka, integrativni faktor dobija na značaju i smanjuje grešku. Smanjenje ovog početnog velikog odstupanja (eng. *overshoot*) biće predmet ispitivanja u okviru narednog poglavlja, koje se tiče optimalnog podešavanja parametara (koeficijentata) kontrolera. Takođe, početno veliko odstupanje nivoa posledica je rada integrativnog člana u jednačini korektivnog dotoka (19), jer se u njemu nagomilavaju greške istog znaka koje dovode do prekoračenja (*overshoot*). Tačnije, ovaj fenomen je posledica toga što suma greške koja figuriše u integrativnom faktoru počinje sa vrednošću 0, nakon čega se u kratkom periodu javljaju vrednosti greške jednog znaka, dok asimilacija malo ne odmakne u vremenu. Ovaj problem moguće je rešiti (pored optimalnog podešavanja parametara kontrolera) i uvođenjem početne vrednosti greške u integrativnom članu (eng. *hotstart*). Na ovaj način početna vrednost sume greške nije 0, što može pomoći u smanjenju početnog *overshoot*-a. Ovo će biti predmet nekog od budućih istraživanja povezanih sa implementacijom asimilacije podataka pomoću PID kontrolera.

5.3 Podešavanje kontrolera

U prethodnom poglavlju (5.2) utvrđena je optimalna struktura (forma ili konfiguracija) kontrolera koji se primenjuju za asimilaciju nivoa u modelu otvorenog toka. Kroz sprovedenu analizu došlo se do zaključka da je Proporcionalno-Integrativni oblik kontrolera onaj koji daje zadovoljavajuće rezultate. Takođe, kroz analizu je utvrđen opseg vrednosti koje proporcionalni i integrativni koeficijenti mogu imati (na test primeru) a da pri tome ne narušavaju stabilnost proračuna i obezbeđuju zadovoljavajuće ažuriranje nivoa u postupku asimilacije podataka. Međutim, spovedena analiza strukture kontrolera ne daje odgovor na pitanje kako doći do optimalnih vrednosti parametara (K_p i K_i) svakog kontrolera u modelu ponaosob (Zadatak 3). Odgovor na to pitanje dobija se finim podešavanjem parametara na osnovu višekriterijumske

optimizacije. U ovom procesu određuju se opsezi optimalnih vrednosti parametara kontrolera minimizacijom kriterijumskih funkcija, na način opisan u poglavlju 3.7, gde se kao kriterijumske funkcije koriste indikatori performansi asimilacije podataka $RMSE$, $maxError$, $CorrVol$ i $AssimTRatio$. Ispitivanja se sprovode na test primeru sa hipotetičkim scenariom opisanim u poglavlju 4.2. U okviru NSGA-II algoritma za višekriterijumsku optimizaciju ne koriste se sve 4 kriterijumske funkcije odjednom, već se analiziraju 4 kombinacije od po 2 suprotstavljene kriterijumske funkcije (Tabela 1). Ovakav postupak se primenjuje jer se ne zna unapred kako svaka od funkcija može uticati na proces optimizacije. Ukoliko bi se u startu koristile sve 4 kriterijumske funkcije integralno, identifikacija eventualnih negativnih efekata upotrebe pojedinih funkcija bi bila znatno komplikovanija.

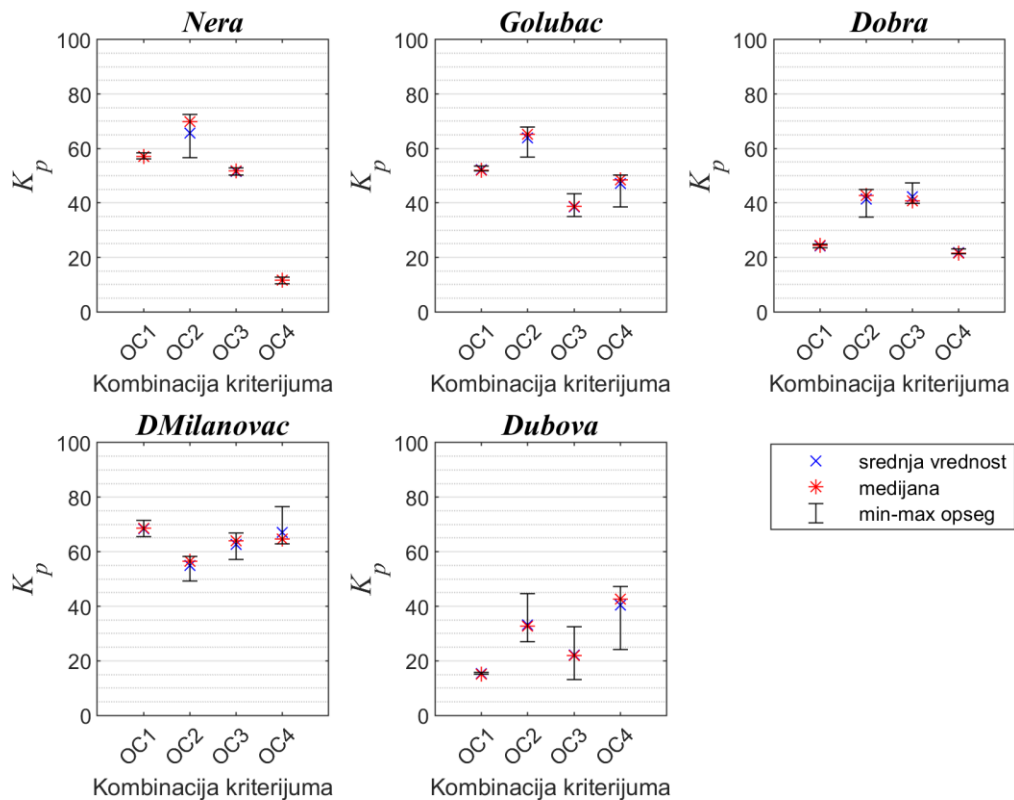
Kao glavni parametar NSGA-II algoritma figuriše brojnost populacije. U ovom ispitivanju korišćene su vrednosti od 30, 50 i 100 jedinki u populaciji (eng. *population size*). Optimizacijom su traženi opsezi optimalnih vrednosti parametara kontrolera. Odnos kriterijumskih funkcija pri traženju optimalnih vrednosti parametara prikazan je u vidu pareto fronta (Slika 50) za sve kombinacije kriterijumskih funkcija (eng. *objectives combination - OC*) i za sve analizirane veličine populacije koja se koristi u genetskom algoritmu.



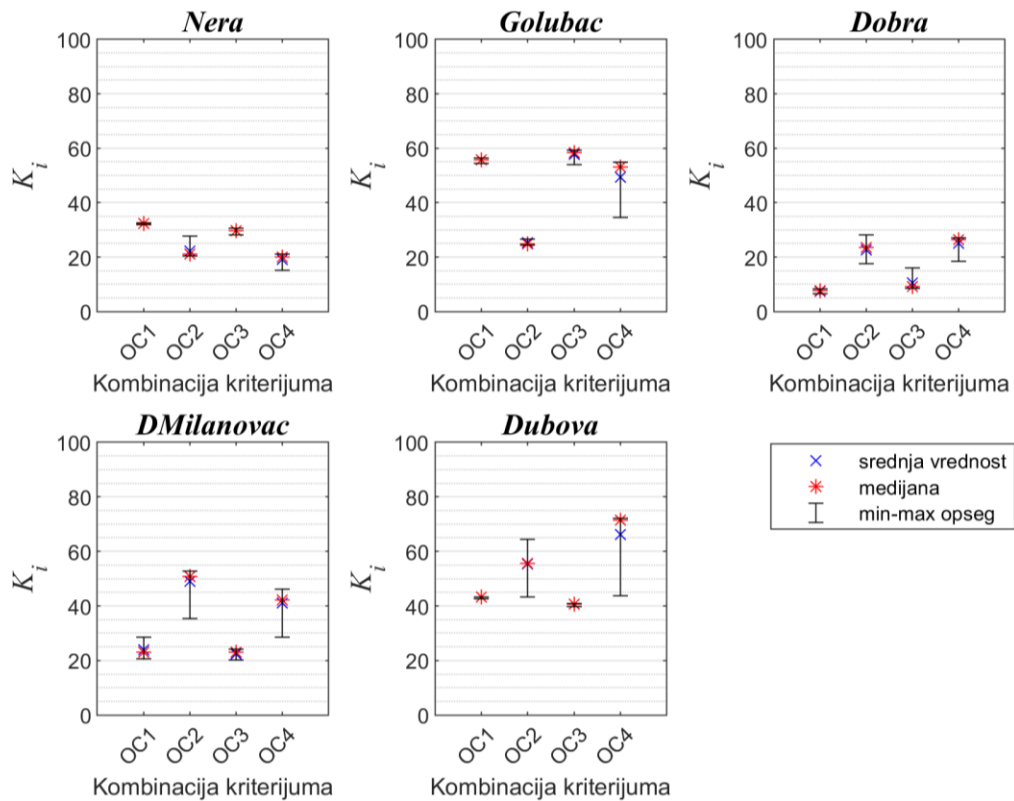
Slika 50. Pareto front za različitu kombinaciju kriterijumskih funkcija i za različitu veličinu populacije

Ono što se može uočiti je da skupovi optimalnih rešenja (pareto frontovi) dobijeni za sve tri veličine populacije izgledaju slično, tj. preklapaju se u pojedinim delovima, osim kada je kao kombinacija kriterijuma uzeta prva kombinacija ($OC1$). U ovom slučaju, pomalo neočekivano, najmanja populacija je uspeła da dodje do pareto fronta čije su tačke najbliže koordinatnom

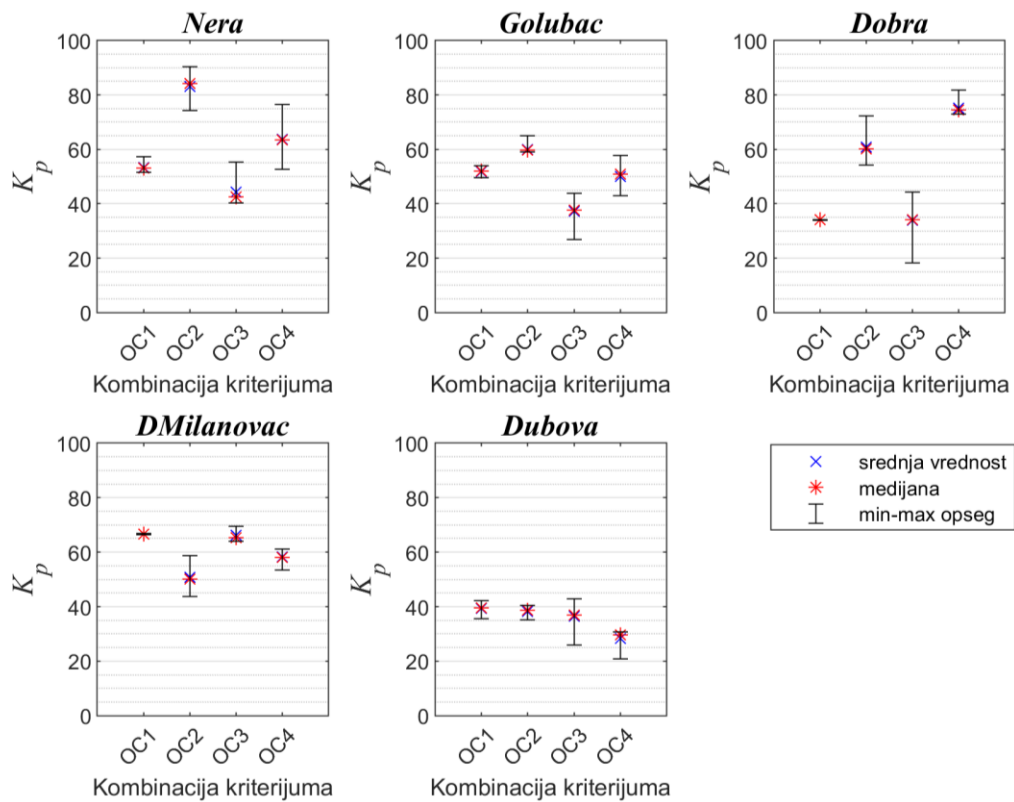
početku (koordinantni početak označava vrednost 0 za obe kriterijumkse funkcije i predstavlja idealno rešenje kome se teži). Međutim, ovo se može objasniti stohastičkom prirodom genetskog algoritma, odnosno procesa selekcije, ukrštanja i mutacije, pri čemu se može desiti da se u ponovljenim proračunima ne dobiju apsolutno ista rešenja. Ono što je takođe evidentno na pareto frontovima je da veći broj jedinki u populaciji daje širi pareto front, a samim tim i širi opseg optimalnih vrednosti parametara kontrolera K_p i K_i (Slika 51 i Slika 52 za 30 jedinki, Slika 53 i Slika 54 za 50 jedinki, Slika 55 i Slika 56 za 100 jedinki u populaciji).



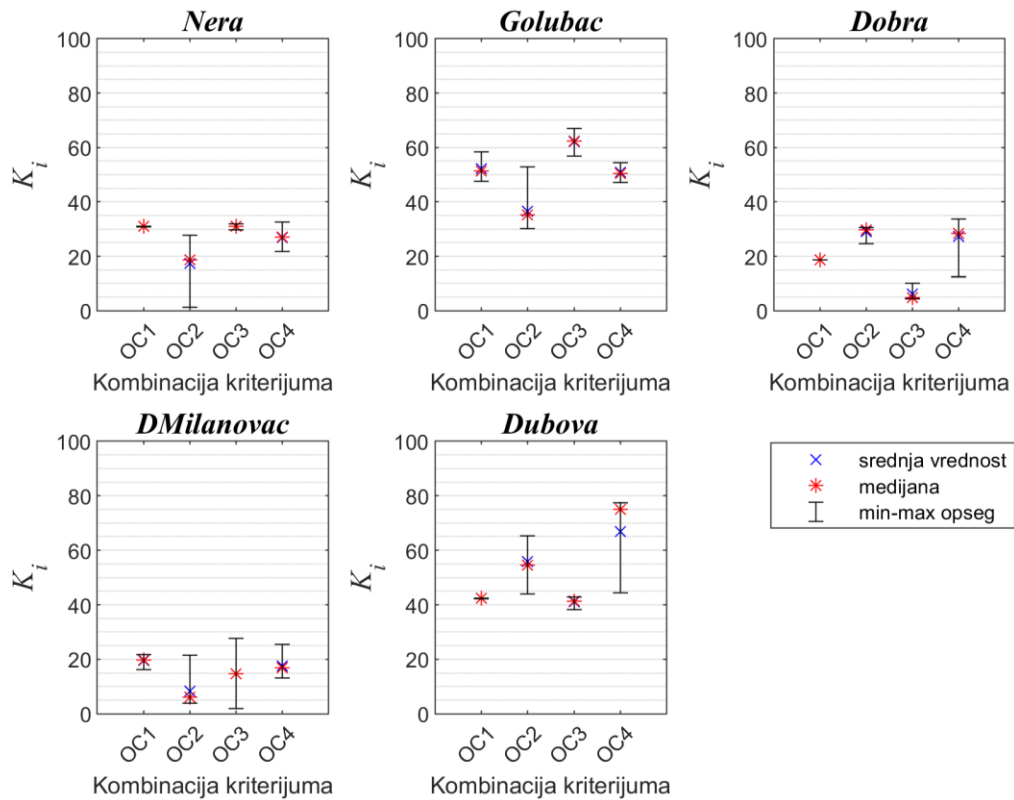
Slika 51. Opseg optimalnih vrednosti proporcionalnog koeficijenta K_p po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 30 jedinki



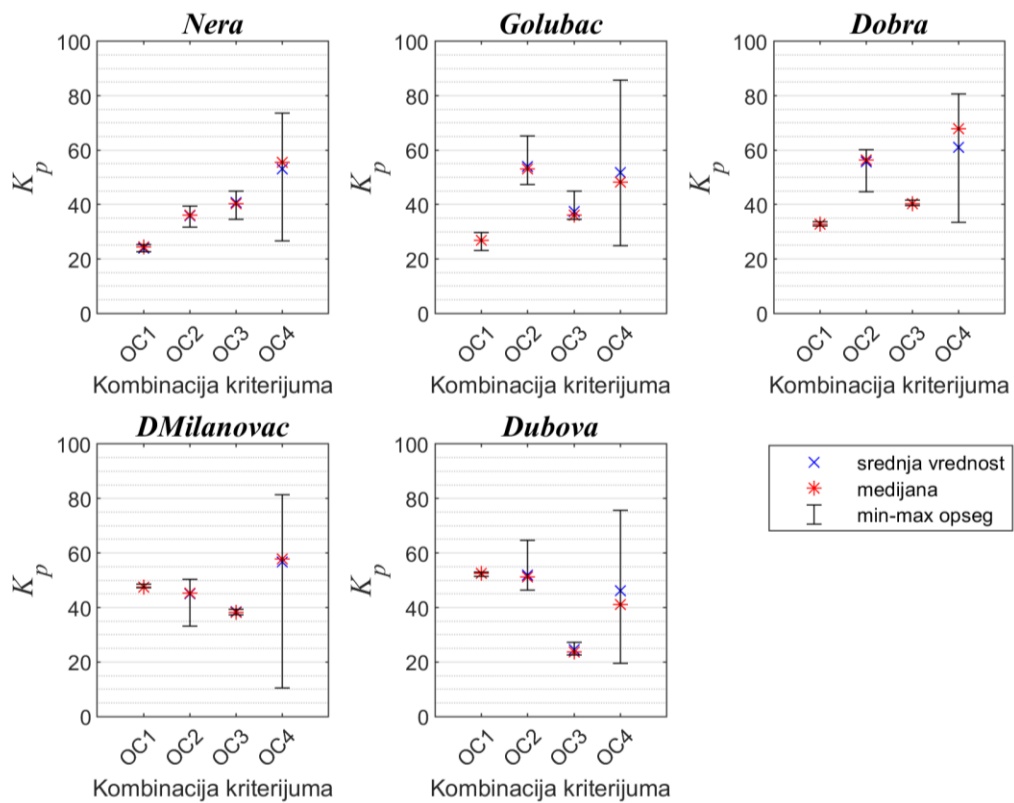
Slika 52. Opseg optimalnih vrednosti integrativnog koeficijenta K_i po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 30 jedinki



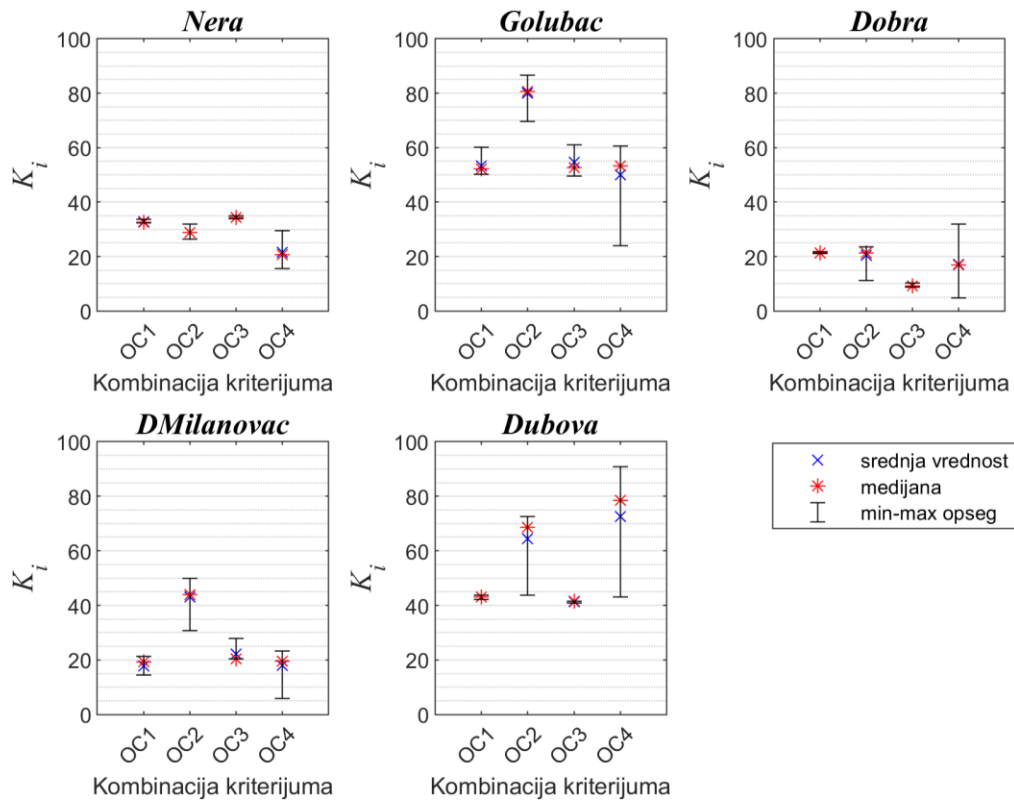
Slika 53. Opseg optimalnih vrednosti proporcionalnog koeficijenta K_p po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 50 jedinki



Slika 54. Opseg optimalnih vrednosti integrativnog koeficijenta K_i po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 50 jedinki



Slika 55. Opseg optimalnih vrednosti proporcionalnog koeficijenta K_p po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 100 jedinki



Slika 56. Opseg optimalnih vrednosti integrativnog koeficijenta K_i po asimilacionim stanicama kada se u NSGA-II algoritmu koristi populacija sastavljena od 100 jedinki

Tabela 4. Skup optimalnih vrednosti parametara kontrolera za različite kombinacije kriterijumskih funkcija kada je veličina populacije 30

Merna stanica	Kombinacija kriterijumskih funkcija	$K_{p,min}$	$K_{p,max}$	$K_{p,mean}$	$K_{p,median}$	$K_{i,min}$	$K_{i,max}$	$K_{i,mean}$	$K_{i,median}$
Nera	OC1	56.07	58.28	56.99	57.02	31.96	32.58	32.35	32.39
	OC2	56.65	72.43	65.77	69.82	20.48	27.65	22.27	21.10
	OC3	50.24	52.76	51.52	51.67	28.26	30.51	29.74	29.79
	OC4	10.21	12.79	11.65	11.52	15.16	21.02	19.17	20.04
Golubac	OC1	51.74	53.44	52.30	52.03	54.33	56.30	55.64	55.74
	OC2	56.91	67.94	63.79	65.15	24.32	26.64	25.26	24.82
	OC3	34.95	43.35	38.62	38.86	54.00	59.34	57.72	58.30
	OC4	38.48	50.28	47.09	48.38	34.66	54.80	49.27	52.99
Dobra	OC1	23.45	24.80	24.28	24.34	6.61	8.32	7.48	7.55
	OC2	34.89	44.96	41.49	42.80	17.51	28.20	22.69	23.56
	OC3	39.87	47.39	42.31	40.73	8.45	16.13	10.61	9.10
	OC4	21.35	23.00	21.77	21.62	18.44	27.04	24.98	26.48
D. Milanovac	OC1	65.49	71.39	68.46	68.70	20.53	28.51	23.92	23.00
	OC2	49.20	58.25	54.96	56.54	35.47	52.88	48.92	50.84
	OC3	57.06	66.92	62.70	63.98	20.24	24.09	22.38	23.00
	OC4	62.86	76.44	67.06	64.67	28.62	46.11	41.03	42.21
Dubova	OC1	15.10	15.75	15.33	15.22	42.69	43.40	43.19	43.35
	OC2	26.99	44.57	33.21	32.84	43.36	64.43	55.42	55.59
	OC3	13.26	32.56	22.27	21.89	39.76	40.99	40.66	40.77
	OC4	24.11	47.30	40.36	42.55	43.78	72.04	66.27	71.55

Tabela 5. Skup optimalnih vrednosti parametara kontrolera za različite kombinacije kriterijumskih funkcija kada je veličina populacije 50

Merna stanica	Kombinacija kriterijumskih funkcija	Kp_{min}	Kp_{max}	Kp_{mean}	Kp_{median}	Ki_{min}	Ki_{max}	Ki_{mean}	Ki_{median}
Nera	OC1	51.65	57.30	53.37	53.09	30.78	31.10	30.98	30.99
	OC2	74.23	90.40	83.10	84.22	1.27	27.65	17.40	18.76
	OC3	40.38	55.27	44.35	42.56	29.64	31.93	30.95	30.93
	OC4	52.59	76.58	63.69	63.43	21.87	32.60	26.79	26.97
Golubac	OC1	49.47	53.92	51.78	52.02	47.60	58.37	52.20	51.23
	OC2	59.13	64.91	59.98	59.70	30.05	52.84	36.52	35.13
	OC3	26.95	43.78	37.25	37.69	56.81	67.04	62.08	62.47
	OC4	43.01	57.77	49.92	50.86	47.24	54.42	50.91	50.35
Dobra	OC1	33.80	34.21	34.04	34.11	18.62	18.75	18.68	18.66
	OC2	54.30	72.39	60.76	60.23	24.54	30.61	29.06	29.63
	OC3	18.35	44.35	33.85	34.02	4.33	10.12	6.17	4.73
	OC4	72.84	81.75	75.05	74.38	12.57	33.63	27.36	28.34
D. Milanovac	OC1	66.39	66.93	66.66	66.65	16.27	21.71	19.47	19.78
	OC2	43.64	58.80	50.71	50.13	3.92	21.50	8.24	6.10
	OC3	64.00	69.57	66.16	65.24	1.87	27.58	14.62	14.69
	OC4	53.44	61.13	58.22	58.06	13.07	25.55	17.45	16.90
Dubova	OC1	35.65	42.16	39.42	39.47	42.27	42.40	42.34	42.33
	OC2	35.06	40.55	38.19	38.70	43.88	65.27	55.89	54.58
	OC3	25.85	42.82	36.50	36.88	38.20	42.93	41.15	41.32
	OC4	20.96	30.85	28.40	29.56	44.48	77.39	66.84	75.10

Tabela 6. Skup optimalnih vrednosti parametara kontrolera za različite kombinacije kriterijumskih funkcija kada je veličina populacije 100

Merna stanica	Kombinacija kriterijumskih funkcija	Kp_{min}	Kp_{max}	Kp_{mean}	Kp_{median}	Ki_{min}	Ki_{max}	Ki_{mean}	Ki_{median}
Nera	OC1	22.71	25.27	24.09	24.36	32.32	33.77	32.80	32.67
	OC2	31.80	39.49	35.93	36.00	26.31	31.97	28.87	28.86
	OC3	34.67	44.96	40.72	40.38	33.84	34.98	34.42	34.41
	OC4	26.63	73.69	53.04	55.55	15.57	29.46	21.62	20.57
Golubac	OC1	23.03	29.70	26.77	26.75	50.21	60.05	53.21	52.21
	OC2	47.31	65.27	53.97	53.17	69.69	86.70	80.07	80.61
	OC3	34.58	45.00	37.34	36.21	49.48	61.03	54.67	52.75
	OC4	24.89	85.81	51.66	48.29	23.98	60.54	50.02	53.42
Dobra	OC1	32.10	33.69	32.82	32.74	21.10	21.69	21.34	21.34
	OC2	44.76	60.16	55.79	56.49	11.18	23.48	20.43	21.40
	OC3	39.55	41.71	40.35	40.23	8.75	10.20	9.15	9.14
	OC4	33.56	80.61	61.05	67.78	4.87	31.96	17.04	16.92
D. Milanovac	OC1	47.22	48.68	47.50	47.42	14.38	21.38	17.81	19.24
	OC2	33.11	50.44	45.14	45.22	30.70	49.86	43.02	44.05
	OC3	37.26	39.27	38.37	38.28	20.34	28.00	22.15	20.49
	OC4	10.58	81.41	56.76	57.77	5.99	23.35	17.95	19.52
Dubova	OC1	51.42	53.08	52.47	52.56	42.14	43.82	43.15	43.16
	OC2	46.43	64.55	51.84	51.31	43.70	72.64	64.33	68.68
	OC3	22.62	27.34	24.54	23.62	40.97	41.60	41.38	41.44
	OC4	19.52	75.55	46.15	41.07	43.02	90.95	72.50	78.60

Kao reprezent dobijenih skupova optimalnih vrednosti parametara kontrolera koriste se minimalna i maksimalna vrednost parametara, kako bi se definisao opseg u kom se kreću vrednosti K_p i K_i (eng. *min-max range*), kao i srednja vrednost (eng. *mean*) i medijana (eng. *median*) skupa (Tabela 4 za 30 jedinki, Tabela 5 za 50 jedinki i Tabela 6 za 100 jedinki u populaciji).

Na skupovima optimalnih vrednosti proporcionalnih koeficijenata po mernim stanicama (Slika 51, Slika 53 i Slika 55) može se uočiti da kombinacija kriterijuma *OC1* (Tabela 1) daje relativno najuže opsege u kojima se nalaze optimalne vrednosti ovog koeficijenta. Za stanicu Nera ove vrednosti se kreću u (celobrojnom) opsegu 56-58 (za 30 jedinki u populaciji), 51-57 (za 50 jedinki), dok se za slučaj najbrojnije populacije dobija opseg vrednosti u rasponu 22-26. Za stanicu Golubac ove vrednosti se kreću u sledećim rasponima: 51-74, 59-65 i 23-30, za 30, 50 i 100 jedinki respektivno. Za stanicu Dobra rasponi su sledeći: 23-25, 33-35, 32-34. Na stanici Donji Milanovac dobijeni su rasponi: 65-72, 66-67 i 47-49. Na kraju, na stanici Dubova donijeni su rasponi 15-16, 35-43 i 51-53.

Kada se analiziraju rasponi istog parametra dobijeni na osnovu kombinacije kriterijumskih funkcija *OC2* jasno se može uočiti povećanje opsega optimalnih vrednosti na skoro svim mernim stanicama na kojima se direktno vrši asimilacija nivoa: 56-73, 74-91, 31-40 (Nera), 56-68, 59-65 i 47-66 (Golubac), 34-46, 54-73 i 44-61 (Dobra), 49-59, 43-59 i 33-51 (D. Milanovac), 27-45, 35-41 i 46-65 (Dubova). Prelazak na kombinaciju kriterijumskih funkcija *OC3* u nekim slučajevima donosi smanjenje a u nekim povećanje opsega optimalnih vrednosti. Poslednja kombinacija kriterijumskih funkcija (*OC4*) na svim stanicama na kojima se sprovodi asimilacija uglavno dovodi do značajnog proširenja opsega optimalnih vrednosti. Slična stvar može se uočiti i za raspone optimalnih vrednosti integrativnog koeficijenta K_i za sve asimilacione stanice (Slika 52, Slika 54 i Slika 56). Na prvi pogled, proširenje raspona optimalnih vrednosti ima pozitivan efekat ako se proces podešavanja parametara kontrolera gleda sa stanovišta da više rešenja daje dovoljno dobre rezultate. Da bi se to proverilo potrebno je testirati asimilaciju sa optimalnim vrednostima parametara iz različitih kombinacija kriterijumskih funkcija i uporediti indikatore kvaliteta asimilacije podataka. Zbog toga, za dalju analizu uzimaju se samo rezultati koji su produkt optimalnog podešavanja sa 100 jedinki u populaciji u genetskom algoritmu, jer oni daju najšire pareto frontove (Slika 50) a samim tim i najšire raspone optimalnih vrednosti parametara. Testiranje se vrši za slučajeve kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara K_p i K_i po svim stanicama koriste srednja vrednost - *mean* (Tabela 7) i medijana - *median* (Tabela 8) iz dobijenih opsega, za sve 4 kombinacije kriterijumskih funkcija.

Tabela 7. Vrednosti indikatora performansi asimilacije podataka za nekoliko varijanti optimalnih vrednosti parametara kontrolera (kada se za vrednost parametara usvaja srednja vrednost i veličina populacije 100)

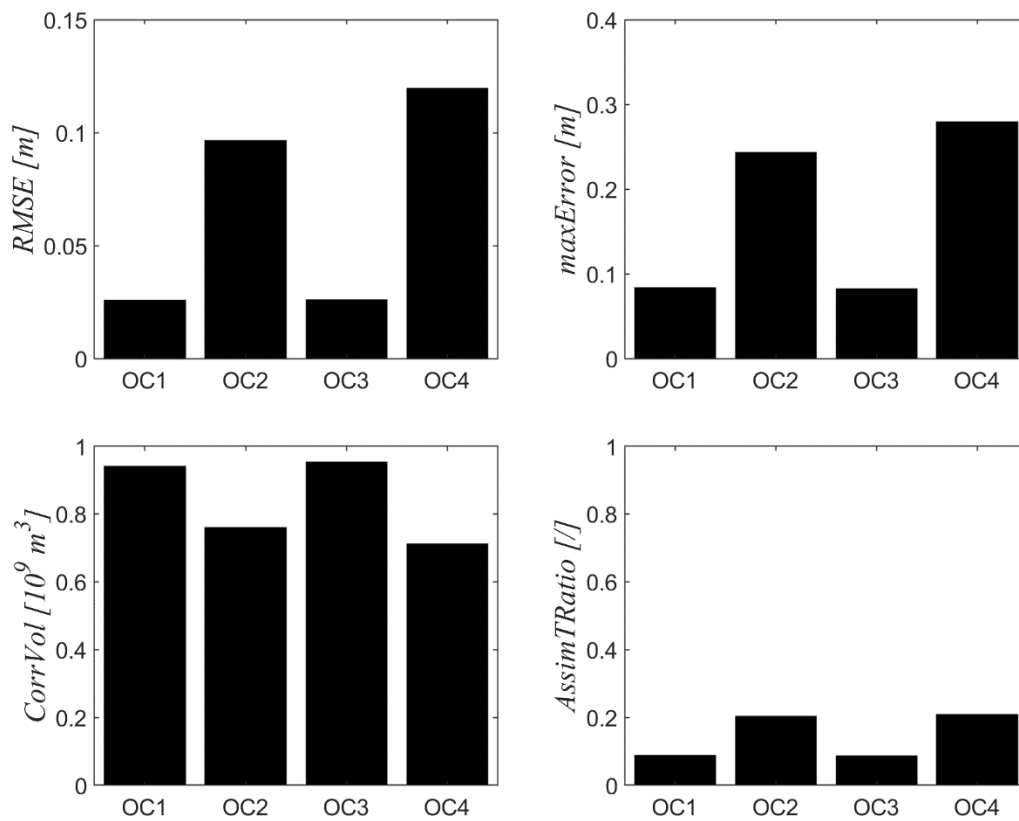
Kombinacija kriterijumskih funkcija	Merna stanica	K_p	K_i	$RMSE$	$maxError$	$AssimTRatio$	$CorrVol$
OC1	Nera	24.09	32.80	0.026	0.084	0.087	0.94
	Golubac	26.77	53.21				
	Dobra	32.82	21.34				
	D. Milanovac	47.50	17.81				
	Dubova	52.47	43.15				
	Oršava	/	/				
OC2	Nera	35.93	28.87	0.097	0.243	0.202	0.759
	Golubac	53.97	80.07				
	Dobra	55.79	20.43				
	D. Milanovac	45.14	43.02				
	Dubova	51.84	64.33				
	Oršava	/	/				
OC3	Nera	40.72	34.42	0.026	0.082	0.086	0.953
	Golubac	45.00	54.67				
	Dobra	41.71	9.15				
	D. Milanovac	38.37	22.15				
	Dubova	24.54	72.50				
	Oršava	/	/				
OC4	Nera	53.04	21.62	0.12	0.279	0.209	0.712
	Golubac	51.66	50.02				
	Dobra	61.05	17.04				
	D. Milanovac	56.76	17.95				
	Dubova	46.15	72.50				
	Oršava	/	/				

Uočava se da upotreba kombinacija kriterijumskih funkcija *OC1* i *OC3* daje iste rezultate po pitanju indikatora *RMSE*. Ove vrednosti su 0.026 m kada se kao reprezentativna optimalna vrednost parametara koristi *mean* vrednost (Slika 57), a ista vrednost *RMSE* indikatora se dobija i kada se *median* koristi kao reprezentativna optimalna vrednost (Slika 58). Kada se koriste kombinacije kriterijuma *OC2* i *OC4* dobijaju se osetno veće vrednosti *RMSE* indikatora, 0.097 m kada se koristi kombinacija *OC2* i *mean* vrednost kao optimalna i 0.12 m kada se koristi kombinacija *OC4* i *mean* vrednost kao optimalna. Kada se koristi *median* vrednost kao optimalna dobijaju se vrednosti *RMSE* indikatora 0.12 m (*OC2*) i 0.141 m (*OC4*).

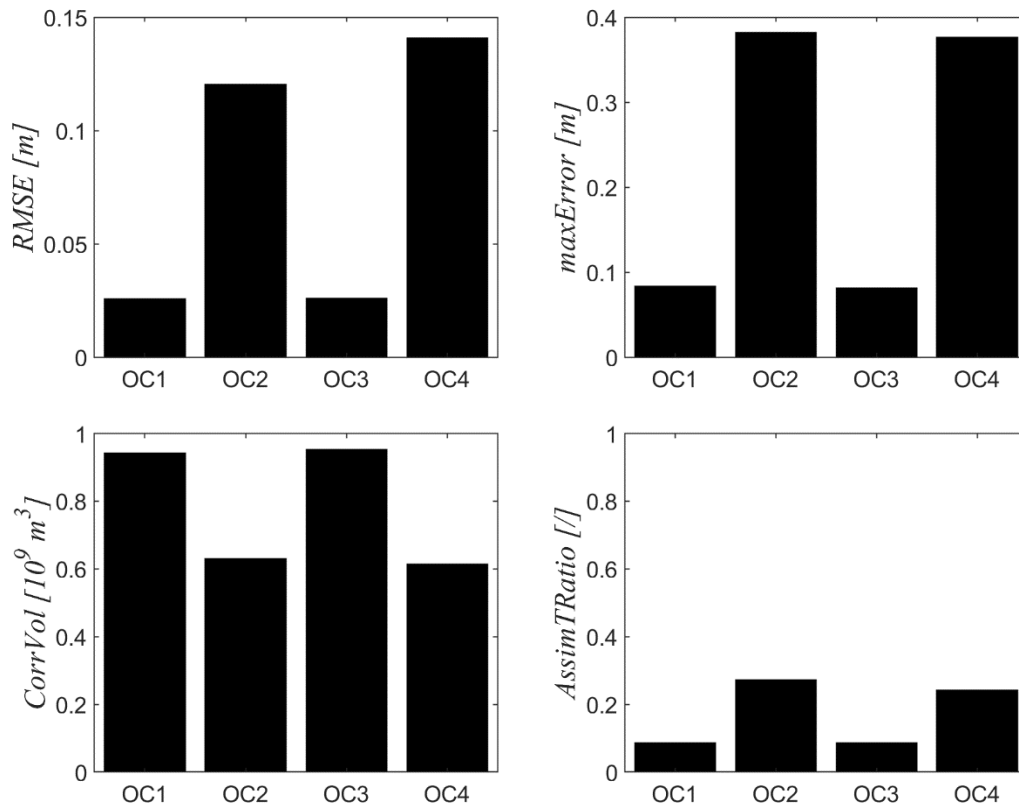
Sa stanovišta indikatora *maxError*, uočljivo je pogoršanje ovog indikatora kada se koriste rezultati dobijeni optimizacijom *OC2* (0.243 m kada je *mean* reprezentativan, 0.382 m kada je *median* reprezentativan) i *OC4* kriterijuma (0.279 m kada je *mean* reprezentativan, 0.376 m kada je *median* reprezentativan). Za slučaj kada se koriste rezultati na osnovu *OC1* i *OC3* ovaj indikator ima vrednost 0.084 m i 0.082 m (i kada se koriste *mean* i kada se koriste *median* vrednosti kao optimalne), što je osetno manje.

Tabela 8. Vrednosti indikatora performansi asimilacije podataka za nekoliko varijanti optimalnih vrednosti parametara kontrolera (kada se za vrednost parametara usvaja medijana i veličina populacije 100)

Varijanta (iz kombinacije kriterijumskih funkcija)	Merna stanica	K_p	K_i	RMSE	maxError	AssimTRatio	CorrVol
OC1	Nera	24.36	32.67	0.026	0.084	0.086	0.941
	Golubac	36	28.86				
	Dobra	40.38	34.41				
	D. Milanovac	55.55	20.57				
	Dubova	26.75	52.21				
	Oršava	/	/				
OC2	Nera	36	28.86	0.120	0.382	0.271	0.630
	Golubac	40.38	34.41				
	Dobra	55.55	20.57				
	D. Milanovac	26.75	52.21				
	Dubova	53.17	80.61				
	Oršava	/	/				
OC3	Nera	40.38	34.41	0.026	0.082	0.087	0.95
	Golubac	55.55	20.57				
	Dobra	26.75	52.21				
	D. Milanovac	53.17	80.61				
	Dubova	36.21	52.75				
	Oršava	/	/				
OC4	Nera	55.55	20.57	0.141	0.376	0.241	0.615
	Golubac	26.75	52.21				
	Dobra	53.17	80.61				
	D. Milanovac	36.21	52.75				
	Dubova	48.29	53.42				
	Oršava	/	/				



Slika 57. Indikatori performansi kada se srednja vrednost (mean) koristi kao optimalna vrednost za parametre kontrolera dobijena optimizacijom sa veličinom populacije od 100 jedinki



Slika 58. Indikatori performansi kada se medijana koristi kao optimalna vrednost za parametre kontrolera dobijena optimizacijom sa veličinom populacije od 100 jedinki

Isti trend vidi se i pri analizi indikatora *AssimTRatio*. Primena rezultata dobijenih na osnovu kombinacija kriterijuma u kojima nema indikatora *CorrVol* daje značajno bolje rezultate i za kombinaciju *OC1* (0.087 kada se koristi *mean* vrednost a 0.086 kada se koristi *median* vrednost) i za kombinaciju *OC3* (0.086 kada se koristi *mean* vrednost a 0.087 kada se koristi *median* vrednost). Nasuprot tome dobijaju se osetno lošija rešenja pri upotrebi rezultata dobijenih na osnovu kombinacija *OC2* (0.202 kada se koristi *mean* vrednost a 0.271 kada se koristi *median* vrednost) i *OC4* (0.209 kada se koristi *mean* vrednost a 0.241 kada se koristi *median* vrednost).

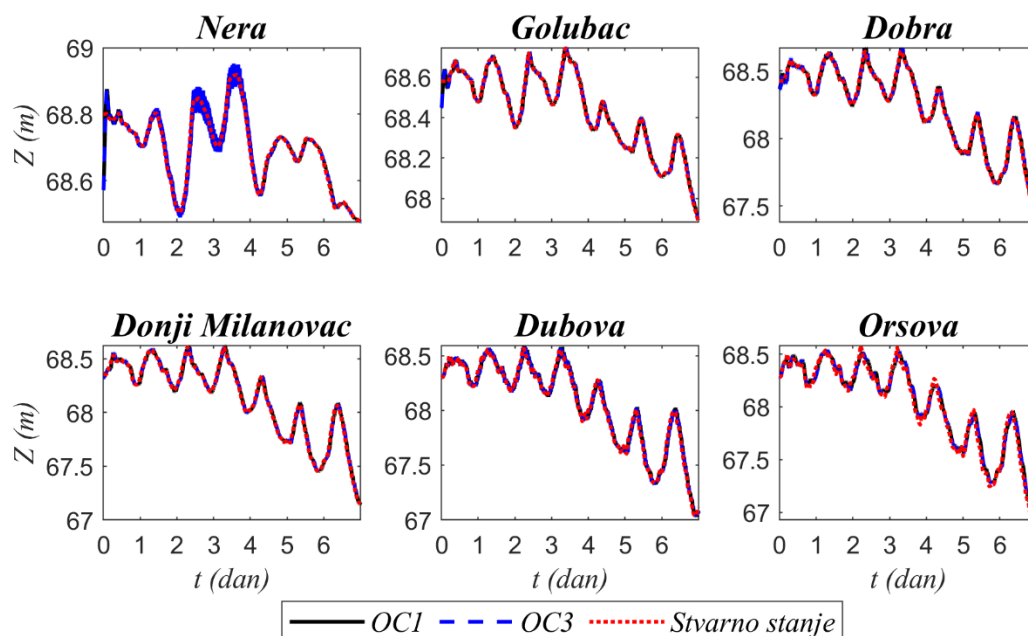
Upotreba kombinacija kriterijuma *OC2* i *OC4* dovodi samo do poboljšanja indikatora *CorrVol* (Slika 57 i Slika 58), dok se vrednosti svih ostalih indikatora pogoršavaju, tj. svako značajnije smanjivanje ovog indikatora značajno utiče na povećanje ostalih indikatora. Na osnovu toga, upotreba kriterijumske funkcije *CorrVol* ne daje dobre rezultate. Iako je ovaj indikator koristan, jer pokazuje intenzitet intervencija u modelu, njegova vrednost je na neki način predodređena i zavisi isključivo od toga kakvi su granični uslovi implementirani. Ovo čini *CorrVol* indikator nepogodnim za minimizaciju u procesu optimalnog podešavanja parametara kontrolera. Drugim rečima, podešavanjem parametara kontrolera nije moguće umanjiti intenzitet intervencije kontrolera u modelu, već naprotiv, rezultati se mogu samo pogoršati, stoga ga ne treba koristiti kao kriterijum pri podešavanju kontrolera. Podešavanjem kontrolera ukupan intenzitet intervencije u model može se eventualno bolje rasporediti po modelu, dok u sumi ostaje približno isti. Sa druge strane, ovaj indikator ostaje značajan jer se na osnovu njega može zaključiti u kojoj meri granični uslovi određuju nepouzdanost modela i da li je potrebno poboljšati implementaciju tih graničnih uslova. Zbog ovoga, dalje analize u ovom poglavlju uzimaju u obzir samo rezultate dobijene na osnovu upotrebe kombinacija *OC1* i *OC3* u podešavanju kontrolera. Ovim se može opravdati tvrdnja, postavljena u okviru poglavlja 3.7, da ne treba odmah sprovesti optimizaciju parametara kontrolera po svim kriterijumskim funkcijama integralno (4 funkcije), već je dovoljno upotrebiti neku od dvokriterijumskih kombinacija koje su se pokazale kao efikasne. Prema tome, kao glavni rezultat analize optimalnog podešavanja kontrolera može se smatrati preporuka da se pri optimizaciji koriste samo kombinacije kriterijumskih funkcija *RMSE-maxError (OC1)* ili *AssimTRatio-maxError (OC2)*.

Dodatno treba napomenuti i potencijalni problem kada se kao kriterijumska funkcija koristi *AssimTRatio*. Ovaj indikator performansi asimilacije podataka govori o tome koliko je vremena (od ukupnog vremena simulacije) potrebno da se razlike između merenih i modeliranih nivoa svedu na zadatu meru. Međutim, problem pri korišćenju ovog indikatora predstavlja njegova ograničenost sa „gornje“ strane, tj. to što ima maksimalnu vrednost 1 (ili 100%). Pri korišćenju optimizacionih algoritama za optimalno podešavanje parametara kontrolera, može se desiti da se optimalno rešenje „zaglavi“ u blizini maksimalne vrednosti ovog indikatora. Drugim rečima, koliko god predloženo rešenje (od strane algoritma) bilo loše dobiće ocenu 1. Na ovaj način ne razlikuju se loša rešenja od ekstremno loših rešenja, pa se može desiti da optimalno rešenje konvergira ovoj maksimalnoj vrednosti indikatora.

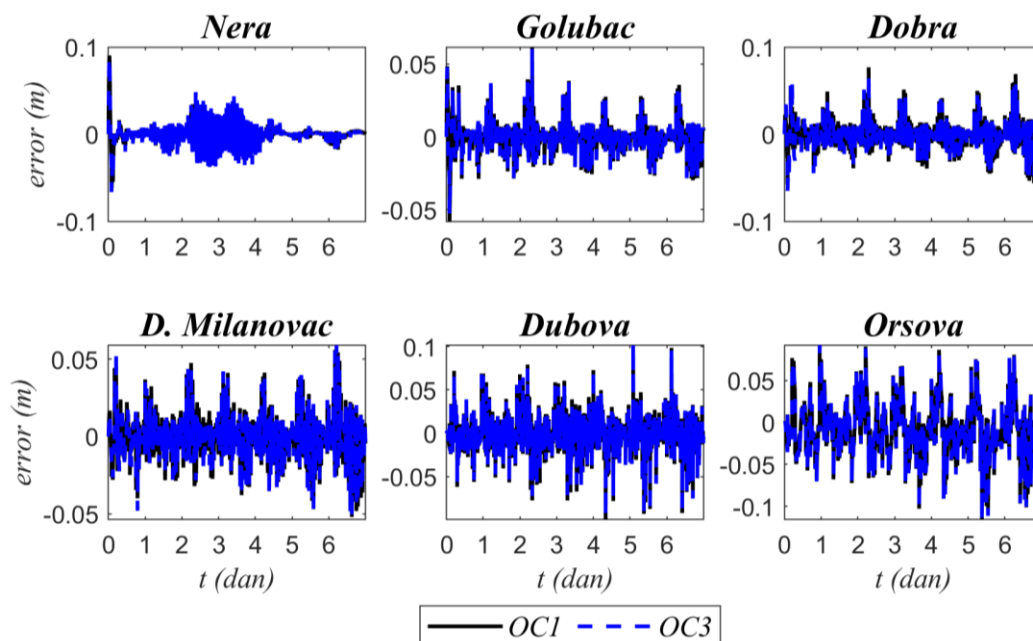
Kada se sprovede proces simulacije sa asimilacijom podataka gde u kontrolerima figurišu optimalni parametri dobijeni minimizacijom kombinacija kriterijuma *OC1* i *OC2* (*mean* vrednosti) dobija se veoma dobro poklapanje nivoa na svim mernim stanicama sistema za više od 90% vremena procesa (Slika 59). Ono što se može uočiti je blaga numerička nestabilnost

nivoa na stanici Nera koja je izazvana radom kontrolera podešenim prema kriterijumu *OC3*. ovo se vidi i na osnovu vrednosti greške (*error*) tokom procesa asimilacije (Slika 60).

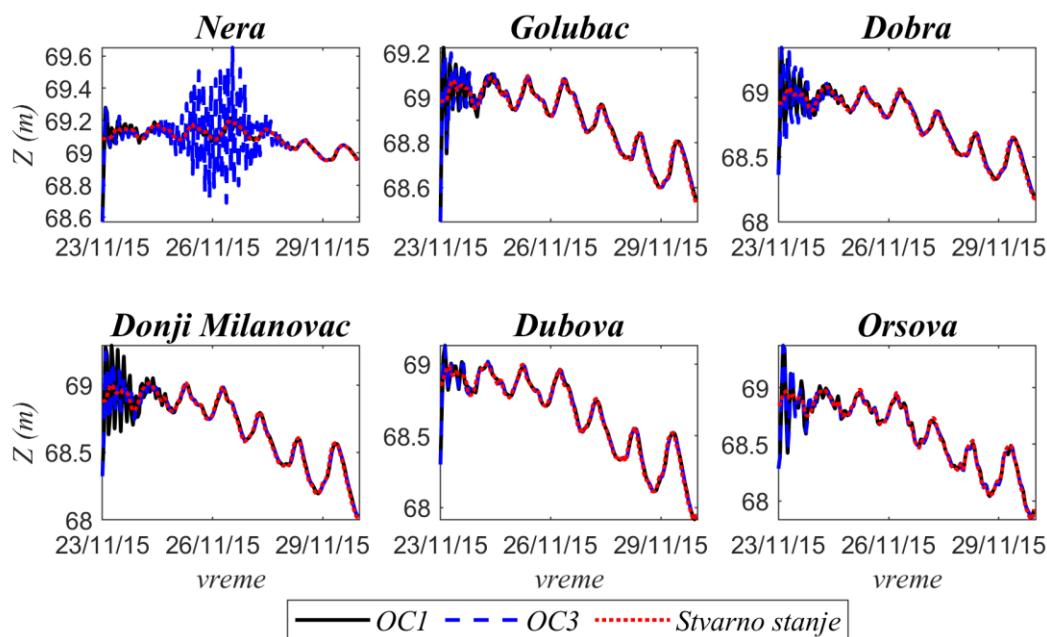
Celokupna analiza optimalnog podešavanja kontrolera rađena je za sintetički (hipotetički) scenario na stvarnom hidrosistemu. Podaci dobijeni na taj način primenjeni su i za jedan zabeleženi (stvarni) scenario (zabeleženi su samo nivoi na stanicama).



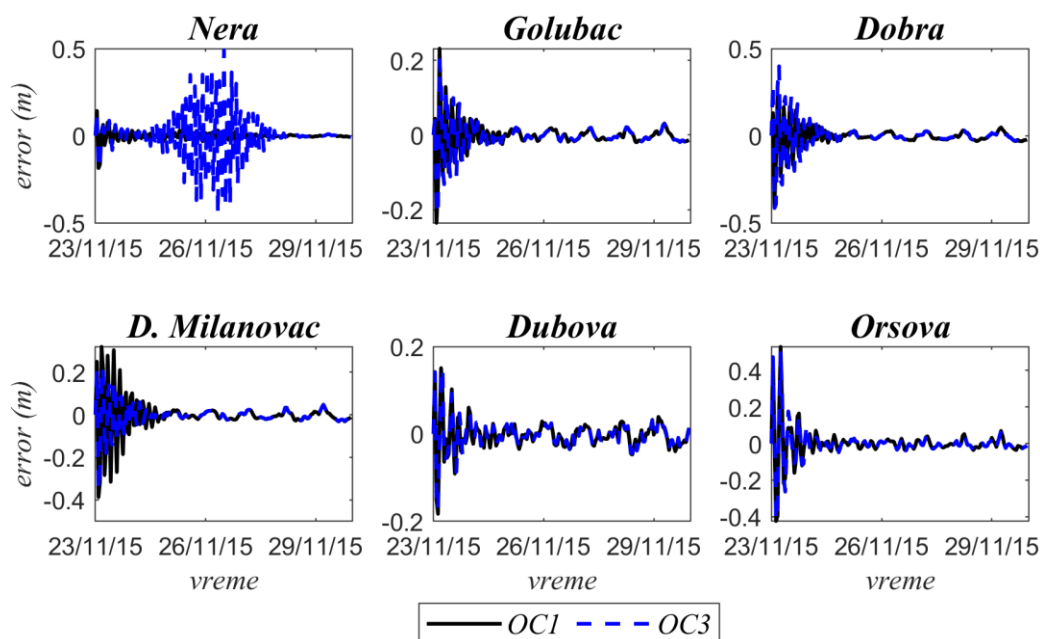
Slika 59. Nivoi na vodomernim stanicama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija *OC1* i *OC3* i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja sa veličinom populacije 100 – sintetički scenario



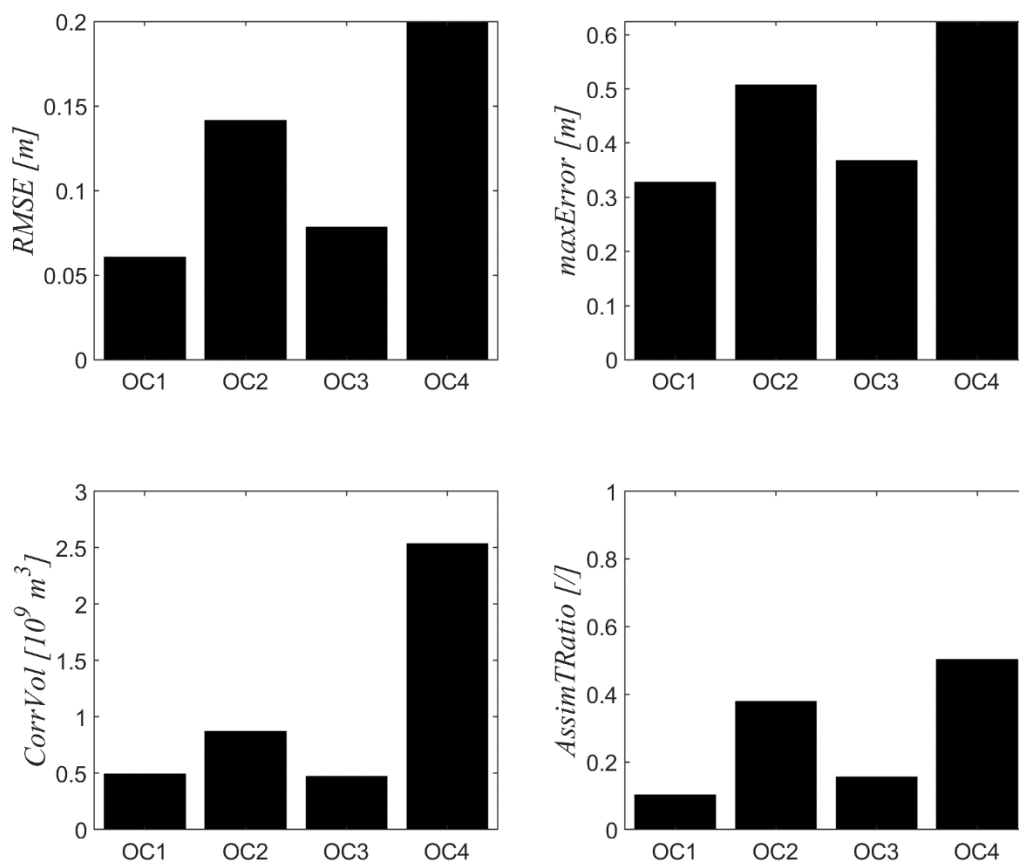
Slika 60. Razlike nivoa (greške - errors) na vodomernim stanicama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija *OC1* i *OC3* i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja – sintetički scenario



Slika 61. Nivoi na vodomernim stanicama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja sa veličinom populacije 100 – stvarni scenario



Slika 62. Razlike nivoa (greške - errors) na vodomernim stanicama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja – stvarni scenario

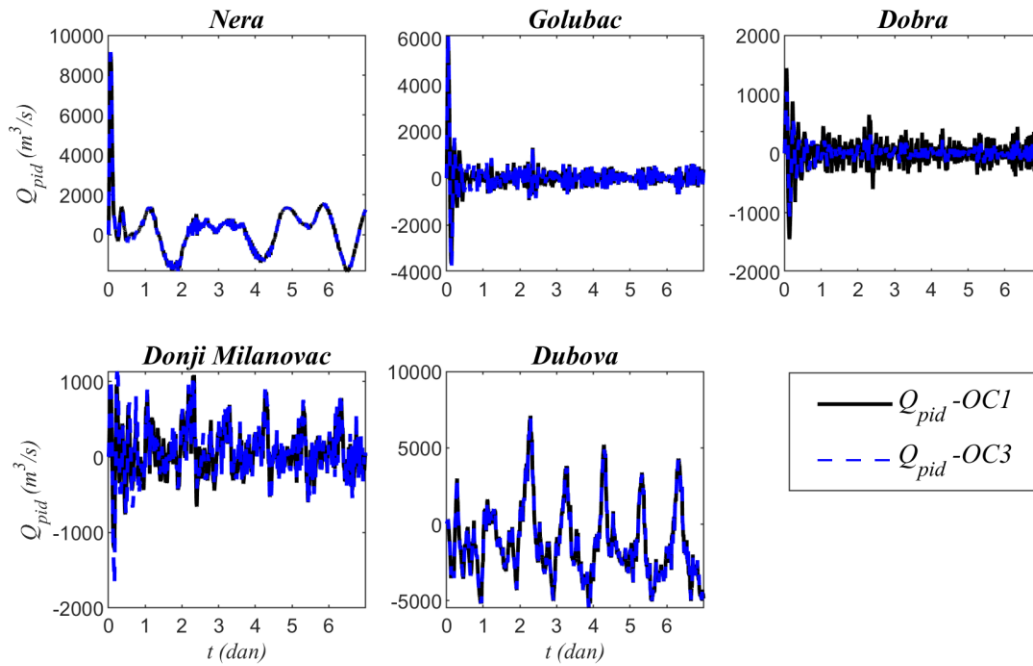


Slika 63. Indikatori performansi kada se srednja vrednost koristi kao reprezent optimalne vrednosti – stvarni scenario

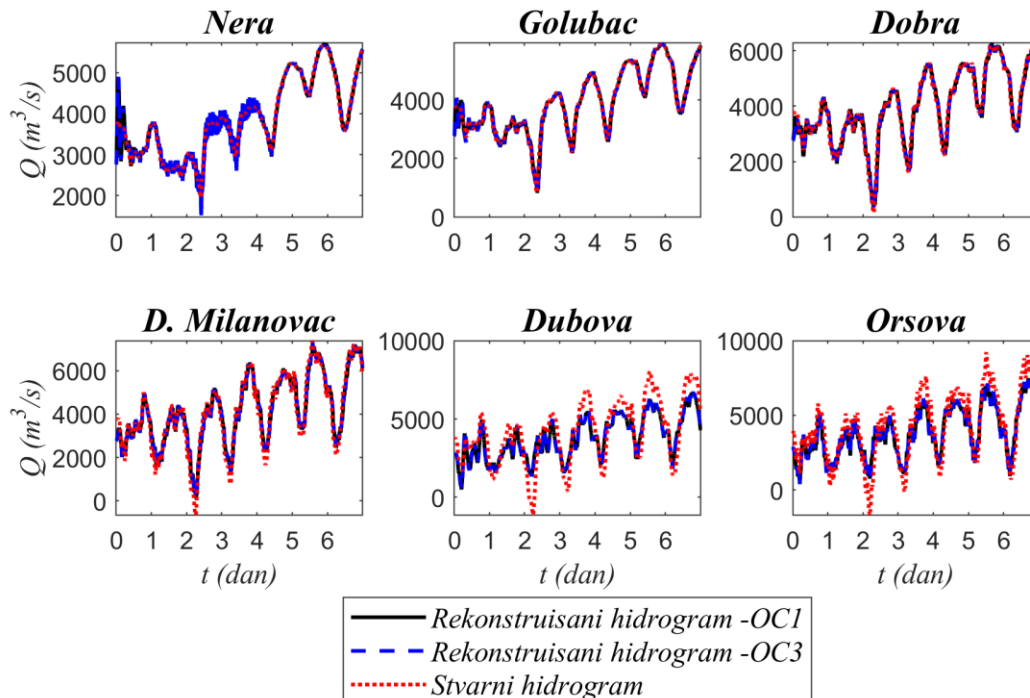
Evidentno je da su, na ovom primeru sa stvarnim scenariom nivoa na stanicama (Slika 61), prisutne veće oscilacije nivoa, odnosno da su vrednosti oscilacija (*error*) veći nego u slučaju sa hipotetičkim scenariom (Slika 62). Samim tim, proces dostizanja željenog nivoa zahteva malo više vremena što se može videti na blagom povećanju vrednosti indikatora *AssimTRatio* (Slika 63). Ovo je, donekle, i očekivana pojava jer su optimalne vrednosti parametara kontrolera dobijene analizom relativno katkog (sedmodnevnog) hipotetičkog scenarija (kako bi se pokazala celokupna procedura optimalnog podešavanja). Za primenu ovih kontrolera u svakodnevnim situacijama potrebno je prethodno prikupiti dovoljno podataka na sistemu (par meseci ili godina) koji bi se koristili za optimalno podešavanje čime bi se dobile pouzdanije vrednosti parametara kontrolera. Cilj analize u ovom poglavlju nije određivanje univerzalnih i konačnih vrednosti koeficijenata Kp i Ki za sve kontrolere i njihovu primenu, već davanje odgovora na pitanja: kojim algoritmom je moguće odrediti optimalne vrednosti ovih koeficijenata i na osnovu kog ili kojih kriterijuma.

5.4 Rekonstrukcija hidrograma

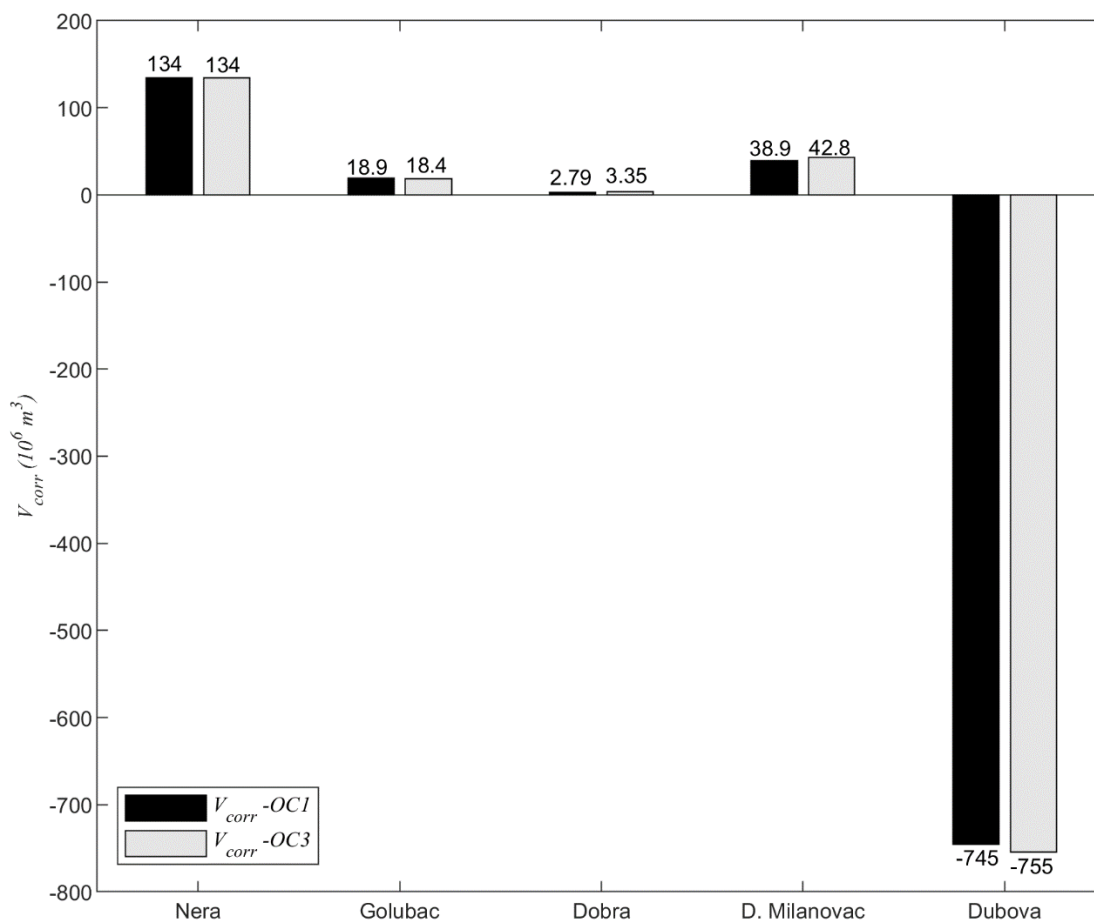
Još jedna korist indirektnog pristupa asimilaciji nivoa u modelima otvorenih tokova, preko korektivnih dotoka (uočen tokom istraživanja) je mogućnost rekonstrukcije stvarnih hidrograma na samim mernim stanicama. Uz zabeležene nivoe i rekonstruisane hidrograme moguće je u određenoj meri proceniti krive protoka za dati period na stanicama gde nisu definisane ili smanjiti neopouzdanost krivih protoka na stanicama na kojima već postoje.



Slika 64. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja – sintetički scenario



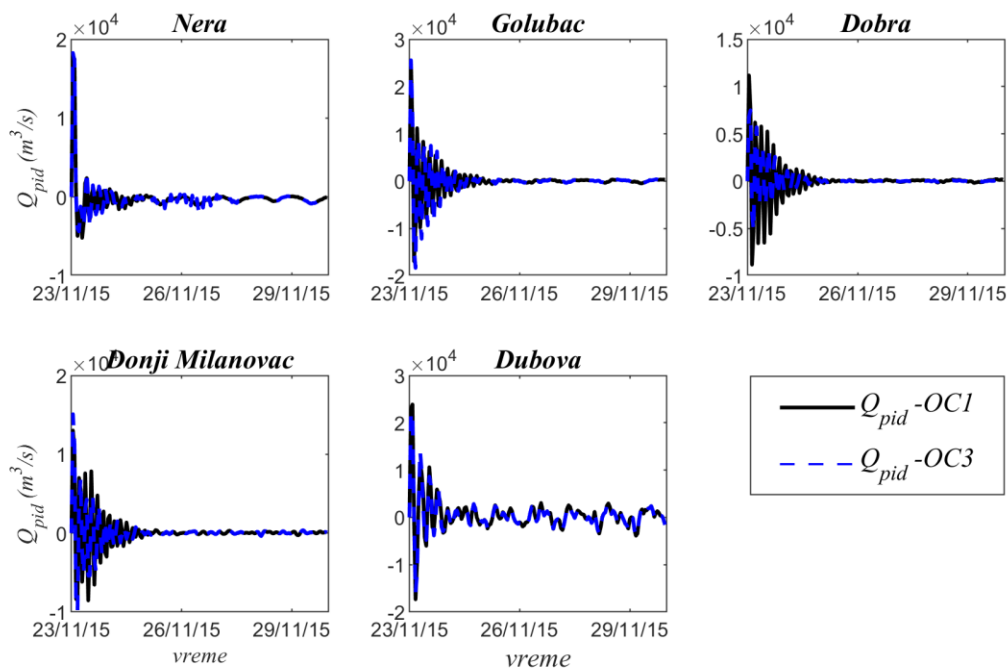
Slika 65. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama Hidroenergetskog sistema Đerdap za hipotetički scenario kada su parametri kontrolera dobijeni kao srednje vrednosti pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



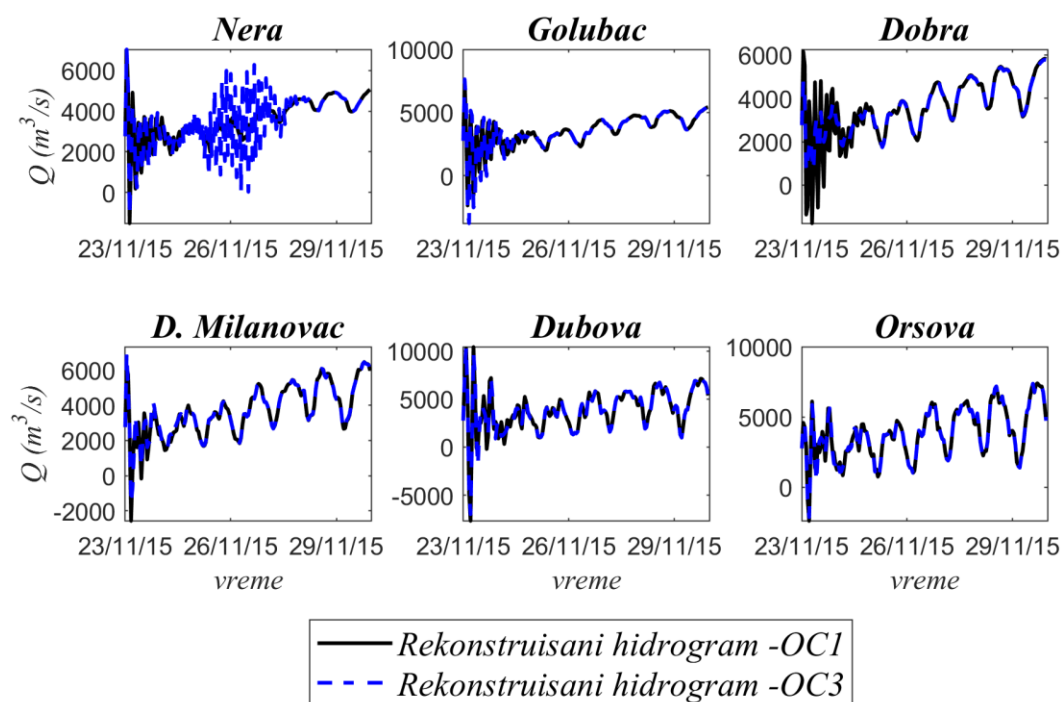
Slika 66. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao srednje vrednosti pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario

Hidrogrami korektivnih dotoka, $Q_{pid}(t)$, prikazani su za sintetički scenario na hidrosistemu Đerdap 1 (Slika 64). Dodavanjem hidrograma korektivnih dotoka na hidrogame u preseccima modela koji odgovaraju mernim mestima, prema jednačini (29), dobijaju se rekonstruisani hidrogrami, koji više odgovaraju zabeleženim nivogramima (Slika 64). Integracijom hidrogama korektivnih dotoka po vremenu dobijaju se korektivne zapremine dodate/oduzete na određenoj stanici u periodu asimilacije podataka (Slika 65). Na rekonstruisanim hidrogramima, za slučaj sintetičkog scenarija, vidi se da je predložena metoda u značajnoj meri uspeva da rekonstruiše stvarne hidrogame, posebno sa udaljenjem od nizvodnog graničnog uslova (hidroelektrane). Na stanicama koje su relativno blizu hidroelektrane, gde je tok Dunava više u režimu jezera nego reke, prisutno je u nekim trenucima i povratno tečenje i na tim stanicama (Dubova i Orsova) su veće greške između stvarnih i rekonstruisanih hidrograma. Takođe, na najzvodnijoj stanici (Nera) primetne su veće oscilacije protoka koje su posledica rada PI kontrolera podešenih na osnovu minimizacije kombinacije kriterijuma OC3 (kao i u slučaju nivograma na Slika 59). Na osnovu sračunatih korektivnih zapremina po stanicama, vidi se da je poreklo nepouzdanosti modela u graničnim uslovima, a u ovom slučaju dominantno od nizvodnog graničnog uslova (V_{corr} je cca $750 \times 10^6 m^3$ na najzvodnijoj lokaciji na kojoj se vrši asimilacija - Dubova). Za slučaj stvarnog scenarija (Slika 67 i Slika 68) nije moguće uporediti rekonstruisane i stvarne hidrogame jer se ne raspolaže osmotrenim

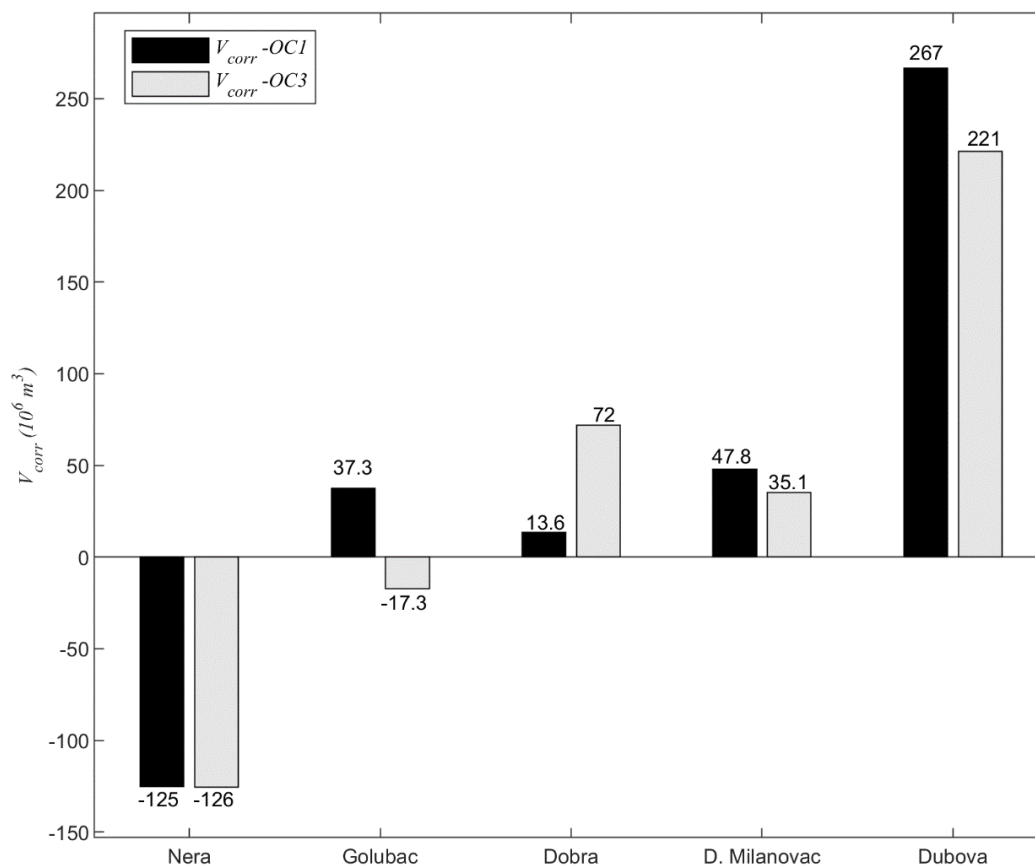
podacima o protocima. I u ovom slučaju se na osnovi korektivnih zapremina može uočiti da je nepouzdanost modela dominantno određena nepouzdanim graničnim uslovima (Slika 69).



Slika 67. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama hidrosistema Đerdap 1 nakon asimilacije za slučaj podešenih parametara kontrolera prema kombinacijama kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 i kada se kao reprezent optimalnih vrednosti parametara uzima srednja vrednost iz skupa optimalnih rešenja – stvarni scenario



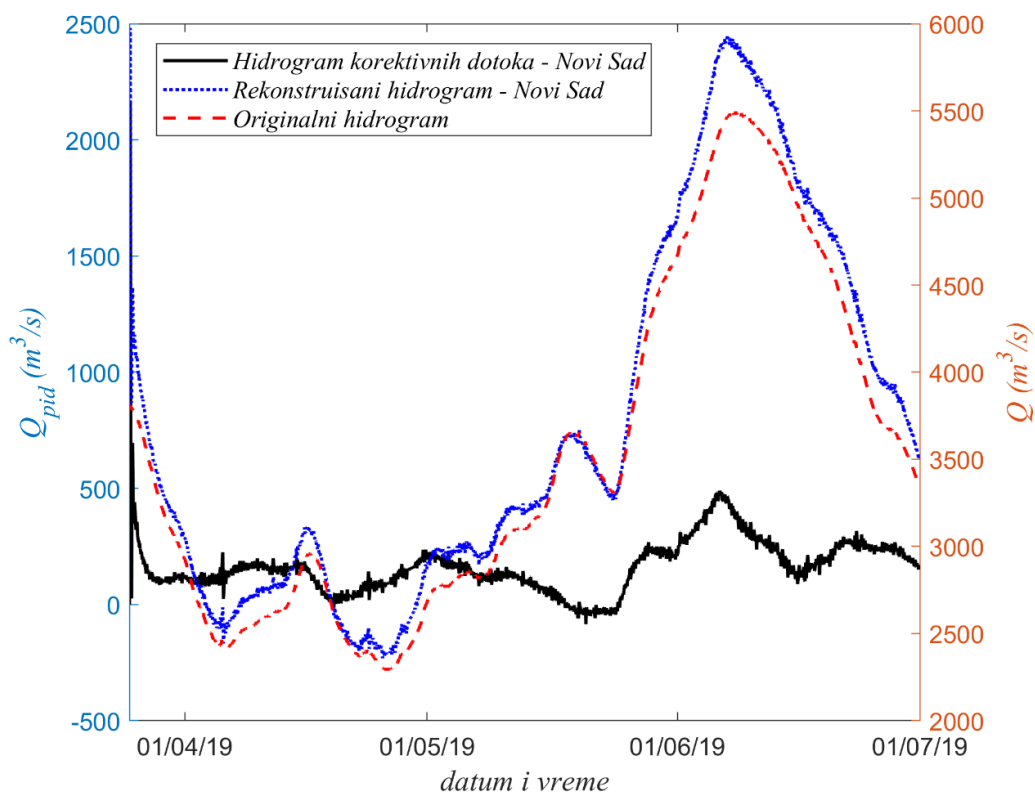
Slika 68. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama Hidroenergetskog sistema Đerdap za hipotetički scenario kada su parametri kontrolera dobijeni kao srednje vrednosti pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – stvarni scenario



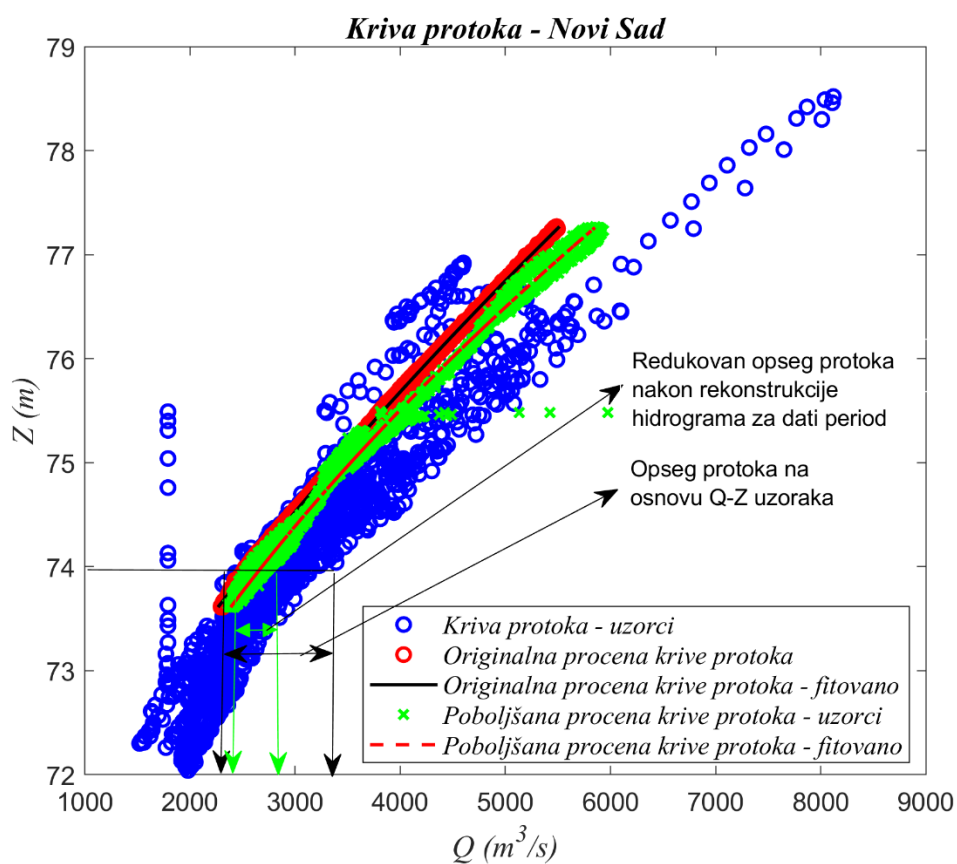
Slika 69. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao srednje vrednosti pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija 1 i 3 – stvarni scenario

Dobijeni rezultati još jednom ukazuju na značaj *CorrVol* indikatora kvaliteta asimilacije podataka. Ovaj indikator, kao što je utvrđeno, nije pogodan kao kriterijumska funkcija za podešavanje PI kontrolera, ali je značajan za detekciju loše implementiranih graničnih uslova i njihovu popravku.

Pošto za test primer hidrosistema Đerdap 1 koji obuhvata 170 km uzvodnu deonicu reke Dunav nisu dostupne krive protoka, za testiranje metodologije za smanjivanje nepouzdanosti postojećih krivih protoka korišće se za deo hidrosistema Dunav na najuzvodnijem kraju, u okolini vodomerne stanice Novi Sad (Slika 22), na kojoj postoje procenjene krive protoka (Slika 27). Za ovu stanicu raspolaže se izmerenim nivoima i procenjenim protocima za period 25.03.2019 – 01.07.2019. (Slika 28). Dodavanjem ručno podešenog (jer nije bio deo testa sa optimalnim podešavanjem) PI kontrolera na stanicu Novi Sad ($Kp=10$, $Ki=1$) dobijen je hidrogram korektivnih dotoka (crna linija, leva y osa na Slika 70). Dodavanjem na originalno procenjeni hidrogram (crvena linija, desna y osa na Slika 70) dobija se rekonstruisani hidrogram (plava linija, desna y osa na Slika 70). Kada se upare tako rekonstruisani hidrogram i zabeleženi nivogram na istoj stanici, moguće je bolje proceniti krivu protoka za razmatrani period (Slika 71), čime se sužava opseg mogućih protoka za zabeležene nivoe. Preliminarne analize koje su sprovedene u ovom poglavlju pokazuju dodatni potencijal indirektnog postupka asimilacije podataka. Međutim, mora se napomenuti da je celokupan postupak poboljšanja i/ili procene krivih protoka na osnovu rekonstruisanih hidrograma asimilacijom podataka potrebno dodatno testirati, što će i biti predmet jednog od budućih istraživanja iz ove oblasti.



Slika 70. Hidrogram korektivnih dotoka (leva osa) i rekonstruisani hidrogram (desna osa) na mernoj stanici Novi Sad za period od 25.03.2019. do 01.07.2019. (dugoročna rekonstrukcija hidrograma)



Slika 71. Smanjenje neodređenosti krive protoka za razmatrani period na mernoj stanici Novi Sad

6 Zaključci i preporuke

6.1 Pregled urađenog

U ovom istraživanju predstavljena je nova, brza metoda za asimilaciju podataka u linijskim (1D) modelima otvorenih tokova. Nova asimilaciona metoda se zasniva na indirektnom pristupu usaglašavanja stanja modela, koje je u ovom slučaju definisano nivoima vode u poprečnim presecima modela. Indirektni, fizički zasnovan pristup usaglašavanja stanja u modelima otvorenih tokova i merenja podrazumeva posrednu asimilaciju nivoa vode preko dodavanja ili oduzimanja vode iz modela pomoću korektivnih dotoka na mernim lokacijama. Ovakav pristup definisan je uvođenjem glavne pretpostavke na kojoj se nova asimilaciona metoda zasniva (Hipoteza 3): dominantan izvor nepouzdanosti modela koja dovodi do neslaganja modeliranih i izmerenih stanja sistema potiče od loše procenjeih ili neadekvatnih graničnih uslova, dok se uticaj nepouzdanosti parametara modela (hrapavost, lokalni gubici, uticaj geometrije) mogu zanemariti. Postupak proračuna korektivnih dotoka zasniva se na teoriji Proporcionalno-Integrativno-Derivativnih (PID) kontrolera, gde se ovi dotoci računaju kroz jednačinu kontrolera na osnovu razlika izmerenih i modeliranih nivoa vode. Korektivni dotoci za asimilaciju nivoa u linijski model otvorenog toka su implementirani u vidu fiktivnih bočnih dotoka u jednačini kontinuiteta (zakon održanja mase), na lokacijama u modelu koje odgovaraju mernim lokacijama na stvarnom sistemu.

Prvi korak u razvoju i primeni nove asimilacione metode je detaljan benchmark test u kome su upoređivani rezultati i performanse dve asimilacione metode. Ovde su upoređeni nova asimilaciona metoda zasnovana na PID kontrolerima (eng. *PID controller-based data assimilation*) i standardna metoda zasnovana na ansamblima (eng. *ensemble-based data assimilation*) koja se često koristi u istraživanjima iz oblasti hidrološko-hidrauličkog modeliranja. Kako bi se uporedile različite metode asimilacije podataka, uvedeni su indikatori kvaliteta asimilacije. Rezultati dobijeni primenom dve različite asimilacione metode porede se sa stanovišta ovih indikatora kvaliteta ali i sa stanovišta brzine proračuna. Cilj ove analize bio je davanje odgovora na istraživačko pitanje (Zadatak 1) koje se tiče opravdanosti primene pojednostavljene asimilacione metode sa stanovišta ubrzanja proračuna i istovremenog održanja kvaliteta rezultata.

Nakon toga, usledila je analiza primene PID kontrolera kao asimilacione metode na realnom sistemu (Hidrosistem Dunava) sa naglaskom na potrebu da se odredi optimalna konfiguracija (struktura, forma) kontrolera. Ovaj analiza sprovedena je u cilju davanja odgovora na drugo istraživačko pitanje (Zadatak 2). Sprovedena je analiza uticaja konfiguracije kontrolera na rezultate asimilacije kroz tri faze manuelnog podešavanja kontrolera (eng. *manual tuning*) uz praćenje promene indikatora performansi asimilacije. Pored definisanja optimalne konfiguracije kontrolera u ovoj fazi definisan je i najpouzdaniji opseg vrednosti parametara (koeficijenata) u jednačini korektivnog dotoka (jednačina kontrolera). Ovaj opseg poslužio je za sužavanje oblasti pretrage (samim tim i ubrzanje računice) u narednoj fazi ispitivanja koja se tiče optimalnog podešavanja parametara (koeficijenata) kontrolera.

Korak optimalnog podešavanja parametara kontrolera sproveden je sa ciljem da dâ odgovor na Zadatak 3 gde bi trebalo preporučiti algoritam za nalaženje opsega optimalnih vrednosti ovih parametara i kriterijume po kojima se taj proces sprovodi. U tu svrhu iskorišćena je višekriterijumska optimizacija pomoću genetskog algoritma sa nedominantnim sortiranjem (NSGA-II). U analizi su kao kriterijum za višekriterijumsku optimizaciju predložene

kombinacije od po dve suprotno orijentisane kriterijumske funkcije, umesto pristupa u kome se optimizacija radi integralno sa svim definisanim kriterijumskim funkcijama. Kriterijumi su definisani na osnovu indikatora kvaliteta asimilacije gde je cilj optimizacije naći pareto front (skup) rešenja koji predstavlja kompromis pri minimizaciji kriterijumskih funkcija. Na ovaj način dat je odgovor na pitanje koje kriterijume treba koristiti za optimalno podešavanje kontrolera kada se koriste za asimilaciju podataka.

Na kraju istraživanja uočena je mogućnost primene nove asimilacione metode kao alata za rekonstrukciju hidrograma na mernim lokacijama i bolju procenu krivih protoka u pojedinim periodima. Algoritam se zasniva na mogućnosti primene korektivnih dotoka za rekonstrukciju stvarnih hidrograma na lokacijama na kojima je vršena asimilacija nivoa, sabiranjem sa originalno procenjenim hidrogramima.

6.2 Odgovori na istraživačke zadatke

Na osnovu svih analiza koje su sprovedene u ovoj disertaciji, mogu se izvući konkretni zaključci i preporuke kao rezultat celokupnog istraživanja. Analizom sprovedenom u cilju davanja odgovora na Zadatak 1 (Poglavlje 5.1) došlo se do sledećih konkretnih zaključaka:

- Nova asimilaciona metoda zasnovana na teoriji PID kontrolera je jednostavna za implementaciju u linijske (1D) modele otvorenih tokova
- Upotreba ove metode, uz ispoštovane sve pretpostavke, dovodi do značajnog ubrzanja proračuna u odnosu na standardnu metodu asimilacije podataka, što je (zajedno sa prethodnim zaključkom) čini alatom pogodnijim, razumljivijim i poželjnijim za primenu od strane inženjera iz prakse
- Pored značajne uštede u računarskom vremenu, koja je posledica pojednostavljenja algoritma, nova metoda indirektno asimilacije podataka ne narušava „tačnost“, odnosno nijedan od uvedenih indikatora kvaliteta asimilacije se ne pogoršava, štaviše, u mnogim situacijama se poboljšavaju.

Analiza optimalne konfiguracije PID kontrolera kao alata za asimilaciju podataka (Poglavlje 5.2) sprovedena je u cilju davanja odgovora na Zadatak 2. Iz ove analize došlo se do sledećih zaključaka/preporuka:

- Optimalna konfiguracija kontrolera za primenu u hidrauličkim modelima tečenja sadrži proporcionalni i integrativni faktor (PI kontroler) te se stoga preporučuje korišćenje samo ovakve forme kontrolera.
- Dodavanje derivativnog faktora se ne preporučuje jer ne doprinosi poboljšanju performansi asimilacije, naprotiv, može samo da dovede do nestabilnosti proračuna usled neadekvatnog podešavanja

Iz rezultata dobijenih u okviru analize optimalnog podešavanja kontrolera u modelu (Poglavlje 5.3) kao odgovor na Zadatak 3 iskristalisali su se sledeći zaključci/preporuke:

- Za optimalno podešavanje parametara svih kontrolera u modelu, nezavisno i simultano, preporučuje se višekriterijumska optimizacija korišćenjem genetskog algoritma sa nedominantnim sortiranjem (NSGA-II)
- Pri izboru kriterijuma za optimizaciju dovoljno je koristiti neku kombinaciju od dve suprotno orijentisane (konfliktne) funkcije, konkretno kombinacija *RMSE-maxError* ili *AssimTRatio-maxError*.

- Indikator *CorrVol*, koji se odnosi na ukupnu korektivnu zapreminu u modelu, ne treba koristiti kao jedan od kriterijuma za optimizaciju, ali može poslužiti za detekciju neadekvatnih ili loše procenjenih graničnih uslova

Kao propratni efekat indirektnog, fizički zasnovanog pristupa asimilaciji podataka u modelima otvorenih tokova pojavljuje se mogućnost rekonstrukcije hidrograma na lokacijama na kojima se vrši asimilacija. Mogućnost rekonstrukcije hidrograma dovodi i do mogućnosti procene krivih protoka na mestima na kojima ne postoje ili do umanjenja nepouzdanosti postojećih krivih protoka za određeni period. Iako ovaj postupak rekonstrukcije hidrograma obećava na osnovu preliminarnih rezultata i može neophodno je sprovesti dodatna istraživanja kako bi se ova metoda potvrdila.

6.3 Buduća istraživanja

Na osnovu prethodnih zaključaka može se uvideti potencijal nove asimilacione metode za modele tečenja u otvorenim tokovima. U situacijama kada su potrebni brzi proračuni i pouzdane prognoze za potrebe upravljanja vodoprivrednim sistemima u realnom vremenu ili češće u približno realnom vremenu (eng. *near real-time*), dan za danom, otvara se prostor za primenu ove asimilacione metode. Jednostavnost matematičkog aparata koji stoji iza ovog pristupa takođe doprinosi potencijalu za primenu ove metode. Fizički zasnovan pristup, za razliku od standardnih metoda baziranih na statističkom usaglašavanju modela i merenja, takođe daje na značaju nove asimilacione metode. Međutim, kako bi implementacija ove metodologije u realnim sistemima i na realnim scenarijima bila potpuna potrebno je izvršiti dodatna istraživanja i unaprediti metodologiju za kompletnu primenu. Pre svega, metodologija prikazana u ovom istraživanju preskače korak poređenja neodređenosti modela i izmerenih podataka čime se štedi računarsko vreme. Ovaj korak je izbegnut primenom pretpostavke da su izmereni podaci, naročito izmereni nivoi, višestruko pouzdaniji reprezent stanja na pojedinim delovima sistema od rezultata modela. Tokom realne primene ove metodologije i prikupljanja podataka o nivoima na realnim sistemima uvek su prisutne anomalije u podacima koje mogu u značajnoj meri narušiti kvalitet izmerenih podataka. Stoga, neophodno je predvideti korak validacije podataka, tj. kontrole kvaliteta podataka, u fazi pretprocesiranja. Ocene kvaliteta podataka koristile bi se kao mera neodređenosti merenja. Time bi se podaci lošeg kvaliteta odbacili ili bi im se u jednačini kontrolera i proračunu procesne greške (*error*) dala manja težina (kroz faktor ublaženja *C*). Ovo odgovara slučaju kada je neodređenost merenja veće od modela u standardnom algoritmima asimilacije podataka, ali implementirano na način da ne narušava brzinu proračuna sa novom asimilacionom metodom. Detaljnije objašnjenje ovog algoritma dato je na strani 56.

Na osnovu rezultata optimalnog podešavanja parametara kontrolera, jasno se može videti da optimalne vrednosti koeficijenata u kontroleru važe za razmatrani period. Za očekivati je da tako određene vrednosti verovatno neće biti optimalne i prilikom primene pri nekom drugom hidrološkom scenariju koji se značajno razlikuje. Da bi se ovaj problem donekle umanjio potrebno je optimalno podešavanje kontrolera sprovesti za duži vremenski period. Međutim, pošto bi ponovno traženje optimalnih vrednosti svih parametara oduzelo dragoceno vreme, pogotovo u svakodnevnoj primeni ove metode, potrebno je osmisliti efikasan algoritam za periodičnu popravku parametara kontrolera, tj. za periodičnu dokalibraciju kontrolera. Ovaj problem bi se mogao rešiti kontinualnim praćenjem indikatora kvaliteta asimilacije podataka i primenom nekih od alata iz oblasti veštačke inteligencije, pre svega fazi (eng. *fuzzy*) logičnih

sistema upravljanja. Na ovaj način bi se vrednosti parametara kontrolera menjale prema utvrđenim pravilima, pri čemu bi okidač za primenu tih pravila bila osetna promena nekog od indikatora kvaliteta asimilacije.

Sledeći korak u budućim istraživanjima je detaljnija analiza potencijala ove metode za rekonstrukciju hidrograma i poboljšanu procenu krivih protoka. Preliminarna analiza na ovu temu sprovedena u ovom istraživanju pokazuje da je moguće u određenoj meri rekonstruisati hidrograme na samoj lokaciji na kojoj su se dodavali/oduzimali korektivni dotoci prilikom posredne asimilacije nivoa. Ono što je čest problem u realnim situacijama je taj da je potrebno proceniti ulazni hidrogram na neku deonicu, pri čemu su merne stanice na nekoj udaljenosti od uzvodnog kraja. Prema tome, dalja istraživanja kada je ova tema u pitanju ići će i u pravcu razvijanja algoritma za propagaciju rekonstruisanih hidrograma ka uzvodnim krajevima modela.

Na kraju, asimilacija podataka je alat koji služi da se na osnovu prethodno prikupljenih podataka stanje modela koriguje i na taj način obezbedi pouzdaniji početni uslov za dalje kratkoročne (eng. *nowcasting*) ili dugoročne prognoze (eng. *forecasting*). U idealnim slučajevima na kraju asimilacionog perioda razlika između rezultata modela i izmerenih podataka svedena je na minimum, čime se obezbeđuje pouzdan početni uslov. Međutim, u realnim situacijama to možda neće uvek biti ispunjeno. Zbog toga je potrebno nastaviti istraživanja koja će dati odgovor o tome kakav treba biti režim rada kontrolera u periodu prognoze, da li se oni naglo gase i model nastavlja samostalno da radi ili je potrebno obezbediti kontinuiran rad kontrolera i u jednom delu prognoznog perioda (tzv. prelazni period). Za ove potrebe biće neophodno uparivanje predložene asimilacione metode i tehnika mašinskog učenja čime bi se dobili hibridni prognozni modeli (kombinacija *model-driven* i *data-driven* pristupa).

7 Reference

- Abaza, Mabrouk, François Anctil, Vincent Fortin, и Richard Turcotte. 2014. „Sequential streamflow assimilation for short-term hydrological ensemble forecasting“. *Journal of Hydrology* 519 (PD): 2692–2706. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.038>.
- Abaza, Mabrouk, Cyril Garneau, и François Anctil. 2015. „Comparison of sequential and variational streamflow assimilation techniques for short-term hydrological forecasting“. *Journal of Hydrologic Engineering* 20 (2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001013](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001013).
- Abrahart, Robert J., и Linda See. 2000. „Comparing neural network and autoregressive moving average techniques for the provision of continuous river flow forecasts in two contrasting catchments“. *Hydrological Processes* 14 (11–12): 2157–72. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20000815/30\)14:11/12<2157::AID-HYP57>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<2157::AID-HYP57>3.0.CO;2-S).
- Addai, Elvis Boamah, Shoou-Yuh Chang, Godwin Appiah Assumaning, и Amirul Islam Rajib. 2016. „Groundwater Contaminant Transport Modeling Using Multiple Adaptive Data Assimilation Techniques“. *Advances in Water Resource and Protection* 3 (0): 1. <https://doi.org/10.14355/awrp.2016.03.001>.
- Aichouri, Imen, Azzedine Hani, Nabil Bougherira, Larbi Djabri, Hicham Chaffai, и Sami Lallahem. 2015. „River Flow Model Using Artificial Neural Networks“. *Energy Procedia* 74: 1007–14. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.832>.
- Alarcón, Rubén M., Oscar A. Briones, Oscar E. Link, и Alejandro J. Rojas. 2018. „Predictive PI strategy for hydrographs control in a experimental microscale flume“. *IFAC-PapersOnLine* 51 (4): 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.011>.
- Alexander, Ashlin Ann, Santosh G. Thampi, и Chithra N. R. 2018. „Development of hybrid wavelet-ANN model for hourly flood stage forecasting“. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 5010 (January): 1–9. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1422192>.
- Alizadeh, Mohamad Javad, Vahid Nourani, Mojtaba Mousavimehr, и Mohamad Reza Kavianpour. 2018. „Wavelet-IANN model for predicting flow discharge up to several days and months ahead“. *Journal of Hydroinformatics* 20 (1): 134–48. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.142>.
- Anderson, Jeffrey L. 2007. „An adaptive covariance inflation error correction algorithm for ensemble filters“. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 59 (2): 210–24. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00216.x>.
- Anderson, Jeffrey L., и Stephen L. Anderson. 1999. „A Monte Carlo Implementation of the Nonlinear Filtering Problem to Produce Ensemble Assimilations and Forecasts“. *Monthly Weather Review* 127: 2741–58. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2741:AMCIOT>2.0.CO;2](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2741:AMCIOT>2.0.CO;2). ISSN 0027-0644.
- Andreadis, Konstantinos M., Elizabeth A. Clark, Dennis P. Lettenmaier, и Douglas E. Alsdorf. 2007. „Prospects for river discharge and depth estimation through assimilation of swath-altimetry into a raster-based hydrodynamics model“. *Geophysical Research Letters* 34 (10): 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL029721>.
- Andreadis, Konstantinos M., и Guy J.P. Schumann. 2014. „Estimating the impact of satellite observations on the predictability of large-scale hydraulic models“. *Advances in Water Resources* 73: 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.06.006>.
- Ang, Kiam Heong, Gregory Chong, и Yun Li. 2005. „PID control system analysis, design, and technology“. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 13 (4): 559–76. <https://doi.org/10.1109/TCST.2005.847331>.
- Annis, Antonio, и Fernando Nardi. 2019. „Integrating VGI and 2D hydraulic models into a data assimilation framework for real time flood forecasting and mapping“. *Geo-Spatial Information Science* 22 (4): 223–36. <https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1626135>.
- Barthélémy, S., S. Ricci, M. C. Rochoux, E. Le Pape, и 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>.
- Bates, P D, и A P J De Roo. 2000. „A simple raster-based model for flood inundation simulation“ 236: 54–77. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X).
- Biancamaria, S., M. Durand, K. M. Andreadis, P. D. Bates, A. Boone, N. M. Mognard, E. Rodríguez, D. E. Alsdorf, D. P. Lettenmaier, и E. A. Clark. 2011. „Assimilation of virtual wide swath altimetry to improve Arctic river modeling“. *Remote Sensing of Environment* 115 (2): 373–81. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.008>.
- 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>.
- Borup, Morten, Morten Grum, H Madsen, и P S Mikkelsen. 2014. „Updating Distributed Hydrodynamic Urban Drainage

- Models“. *Proceedings of the 13th International Conference on Urban Drainage*, изд. September: 1–8. <https://doi.org/10.13140/2.1.1682.1766>.
- Borup, Morten, Morten Grum, и Peter Steen Mikkelsen. 2013. „Comparing the impact of time displaced and biased precipitation estimates for online updated urban runoff models“. *Water Science and Technology* 68 (1): 109–16. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.221>.
- Borup, Morten, Henrik Madsen, Morten Grum, и Peter Mikkelsen. 2018. „Technical Note on the Dynamic Changes in Kalman Gain when Updating Hydrodynamic Urban Drainage Models“. *Geosciences* 8 (11): 416. <https://doi.org/10.3390/geosciences8110416>.
- Bourgin, F., M. H. Ramos, G. Thirel, и V. Andréassian. 2014. „Investigating the interactions between data assimilation and post-processing in hydrological ensemble forecasting“. *Journal of Hydrology* 519 (PD): 2775–84. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.054>.
- Bouzaglou, Véronique, Elena Crestani, Paolo Salandin, Erwan Gloaguen, и Matteo Camporese. 2018. „Ensemble Kalman filter assimilation of ERT data for numerical modeling of seawater intrusion in a laboratory experiment“. *Water (Switzerland)* 10 (4): 1–26. <https://doi.org/10.3390/w10040397>.
- Bozzi, Silvia, Giuseppe Passoni, Pietro Bernardara, Nicole Goutal, и Aurélie Arnaud. 2015. „Roughness and Discharge Uncertainty in 1D Water Level Calculations“. *Environmental Modeling and Assessment* 20 (4): 343–53. <https://doi.org/10.1007/s10666-014-9430-6>.
- Branislavljević, N., D. Prodanović, и D. Pavlović. 2010. „Automatic, semi-automatic and manual validation of urban drainage data“. *Water Science and Technology* 62 (5): 1013–21. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.350>.
- Branislavljevic, Nemanja, Christopher Hutton, Zoran Kapelan, Lydia Vamvakiridou-Lyroudia, и Dragan Savić. 2014. „Real-Time Runoff Prediction Based on Data Assimilation And Model Bias Reduction“. *Proceedings of the 11th International Conference on Hydroinformatics, New York City, USA*, 1–8. http://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic.
- Branislavljević, Nemanja, Zoran Kapelan, и Dušan Prodanović. 2011. „Improved real-time data anomaly detection using context classification“. *Journal of Hydroinformatics* 13 (3): 307. <https://doi.org/10.2166/hydro.2011.042>.
- Brisset, Pierre, Jérôme Monnier, Pierre André Garambois, и Hélène Roux. 2018. „On the assimilation of altimetric data in 1D Saint-Venant river flow models“. *Advances in Water Resources* 119 (March 2017): 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.06.004>.
- Brunner, Gary W. 2010. „HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual“. Report for US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).
- Burgers, Gerrit, Peter Jan van Leeuwen, и Geir Evensen. 1998. „Analysis Scheme in the Ensemble Kalman Filter“. *Monthly Weather Review* 126 (6): 1719–24. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1719:ASITEK>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1719:ASITEK>2.0.CO;2).
- 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>.
- Campolo, Marina, Alfredo Soldati, и Paolo Andreussi. 2003. „Artificial neural network approach to flood forecasting in the River Arno“. *Hydrological Sciences Journal* 48 (3): 381–98. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.3.381.45286>.
- Cao, Yin, Yuntao Ye, Lili Liang, Hongli Zhao, Yunzhong Jiang, Hao Wang, Zhenyan Yi, Yizi Shang, и Dengming Yan. 2019. „A Modified Particle Filter-Based Data Assimilation Method for a High-Precision 2-D Hydrodynamic Model Considering Spatial-temporal Variability of Roughness: Simulation of Dam-Break Flood Inundation“. *Water Resources Research* 55 (7): 6049–68. <https://doi.org/10.1029/2018WR023568>.
- 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>.
- Chang, Haibin, Qinzhuo Liao, и Dongxiao Zhang. 2017. „Surrogate model based iterative ensemble smoother for subsurface flow data assimilation“. *Advances in Water Resources* 100: 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.12.001>.
- Chang, Shouu-Yuh, Tushar Chowhan, и Sikdar Latif. 2012. „State and Parameter Estimation with an SIR Particle Filter in a Three-Dimensional Groundwater Pollutant Transport Model“. *Journal of Environmental Engineering* 138 (11): 1114–21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000584](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000584).
- Chau, K. W., и Wen Wu Yang. 1992. „A knowledge-based expert system for unsteady open channel flow“. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 5 (5): 425–30. [https://doi.org/10.1016/0952-1976\(92\)90014-B](https://doi.org/10.1016/0952-1976(92)90014-B).
- Chen, Minghong, Juanjuan Pang, и Pengxiang Wu. 2018. „Flood routing model with particle filter-based data assimilation for flash flood forecasting in the micro-model of Lower Yellow River, China“. *Water (Switzerland)* 10 (11). <https://doi.org/10.3390/w10111612>.

- Cheng, Wei-Chen, Mario Putti, Donald R. Kendall, и William W.-G. Yeh. 2011. „A real-time groundwater management model using data assimilation“. *Water Resources Research* 47 (6): 1–10. <https://doi.org/10.1029/2010WR009770>.
- Chiha, Ibtissem, Nouredine Liouane, и Pierre Borne. 2012. „Tuning PID Controller Using Multiobjective Ant Colony Optimization“. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing* 2012 (1): 1–7. <https://doi.org/10.1155/2012/536326>.
- Clark, Martyn P., David E. Rupp, Ross A. Woods, Xiaogu Zheng, Richard P. Ibbitt, Andrew G. Slater, Jochen Schmidt, и 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>.
- 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>.
- Costabile, Pierfranco, и Francesco Macchione. 2012. „Analysis of One-Dimensional Modelling for Flood Routing in Compound Channels“. *Water Resources Management* 26 (5): 1065–87. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9947-2>.
- Coulibaly, P., F. Anctil, и B. Bobée. 2000. „Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach“. *Journal of Hydrology* 230 (3–4): 244–57. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00214-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00214-6).
- Crestani, E., M. Camporese, D. Baú, и P. Salandin. 2013. „Ensemble Kalman filter versus ensemble smoother for assessing hydraulic conductivity via tracer test data assimilation“. *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (4): 1517–31. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1517-2013>.
- Darlane, A. B., и Sh. Azimi. 2017. „Streamflow forecasting by combining neural networks and fuzzy models using advanced methods of input variable selection“. *Journal of Hydroinformatics*, jh2017076. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.076>.
- Deb, Kalyanmoy, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, и T. Meyarivan. 2002. „A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II“. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2): 182–97. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- Dechant, C. M., и H. Moradkhani. 2011. „Improving the characterization of initial condition for ensemble streamflow prediction using data assimilation“. *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (11): 3399–3410. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3399-2011>.
- Ding, Z., C. Wang, и G. Tan. 2009. „Study on gate deadband and dynamic response of unsteady flow in canal system“. *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering - Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*.
- Divac, D, N Milivojevi, N Grujovi, B Stojanovi, Z Simi, Nikola Milivojević, N Grujović, и остали. 2009. „A procedure for state updating of SWAT-based distributed hydrological model for operational runoff forecasting“. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics* 3 (1): 298–326.
- Dumedah, Gift, и Paulin Coulibaly. 2014a. „Examining differences in streamflow estimation for gauged and ungauged catchments using evolutionary data assimilation“. *Journal of Hydroinformatics* 16 (2): 392–406. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.193>.
- . 2014b. „Integration of an evolutionary algorithm into the ensemble kalman filter and the particle filter for hydrologic data assimilation“. *Journal of Hydroinformatics* 16 (1): 74–94. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.088>.
- Durand, Michael, Konstantinos M. Andreadis, Douglas E. Alsdorf, Dennis P. Lettenmaier, Delwyn Moller, и Matthew Wilson. 2008. „Estimation of bathymetric depth and slope from data assimilation of swath altimetry into a hydrodynamic model“. *Geophysical Research Letters* 35 (20): 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008GL034150>.
- EURELECTRIC. 2011. „Renewables Action Plan (RESAP)“.
- Evensen, G. 1992. „Using the extended Kalman filter with a multilayer quasi-geostrophic ocean model“. *Journal of Geophysical Research* 97 (C11). <https://doi.org/10.1029/92jc01972>.
- 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>.
- . 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>.
- . 2007. *Data assimilation - The Ensemble Kalman Filter*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03711-5>.
- 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 Mendionio, 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>.
- Franssen, H. J.Hendricks, и W. Kinzelbach. 2009. „Ensemble Kalman filtering versus sequential self-calibration for inverse modelling of dynamic groundwater flow systems“. *Journal of Hydrology* 365 (3–4): 261–74. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.033>.
- Garambois, P. A., K. Larnier, J. Monnier, P. Finaud-Guyot, J. Verley, A. S. Montazem, и S. Calmant. 2020. „Variational estimation of effective channel and ungauged anabranching river discharge from multi-satellite water heights of different spatial sparsity“. *Journal of Hydrology* 581 (November 2019): 124409. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124409>.
- García-Pintado, Javier, Jeff C. Neal, David C. Mason, Sarah L. Dance, и Paul D. Bates. 2013. „Scheduling satellite-based SAR acquisition for sequential assimilation of water level observations into flood modelling“. *Journal of Hydrology* 495: 252–66. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.050>.
- Gaspari, Gregory, и Stephen E Cohn. 1999. „Construction of correlation functions in two and three dimensions“. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 125 (April 1998): 723–57. <https://doi.org/10.1002/qj.49712555417>.
- Giustarini, L., P. Matgen, R. Hostache, M. Montanari, D. Plaza, V. R.N. Pauwels, G. J.M. De Lannoy, и остали. 2011. „Assimilating SAR-derived water level data into a hydraulic model: A case study“. *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (7): 2349–65. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2349-2011>.
- 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>.
- Goutal, N, и 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.
- Gragne, Ashenafi S., Knut Alfredsen, Ashish Sharma, и Raj Mehrotra. 2015. „Recursively updating the error forecasting scheme of a complementary modelling framework for improved reservoir inflow forecasts“. *Journal of Hydrology* 527: 967–77. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.039>.
- Habert, J., S. Ricci, E. Le Pape, O. Thual, A. Piacentini, N. Goutal, G. Jonville, и 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: 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.023>.
- Hamill, Thomas M., Jeffrey S. Whitaker, и Chris Snyder. 2001. „Distance-Dependent Filtering of Background Error Covariance Estimates in an Ensemble Kalman Filter“. *Monthly Weather Review* 129 (11): 2776–90. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2776:DDFOBE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2776:DDFOBE>2.0.CO;2).
- Hamid, Ali Thaeer, Mohd Herwan Bin Sulaiman, и Ahmed N. Abdalla. 2016. „Prediction of small hydropower plant power production in Himreen Lake dam (HLD) using artificial neural network“. *Alexandria Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.12.011>.
- Hansen, Lisbet Snefttrup, 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>.
- Holland, John H. 1962. „Outline for a Logical Theory of Adaptive Systems“. *Journal of the ACM (JACM)* 9 (3): 297–314. <https://doi.org/10.1145/321127.321128>.
- Hong, Yao-Ming. 2017. „Feasibility of using artificial neural networks to forecast groundwater levels in real time“. *Landslides* 14 (5): 1815–26. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0844-5>.
- Hostache, Renaud, Xijun Lai, Jérôme Monnier, и Christian Puech. 2010. „Assimilation of spatially distributed water levels into a shallow-water flood model. Part II: Use of a remote sensing image of Mosel River“. *Journal of Hydrology* 390 (3–4): 257–68. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.003>.
- Houtekamer, P. L., и Fuqing Zhang. 2016. „Review of the ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation“. *Monthly Weather Review* 144 (12): 4489–4532. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0440.1>.
- Hu, T. S., K. C. Lam, и S. Thomas Ng. 2005. „A Modified Neural Network for Improving River Flow Prediction/Un Réseau de Neurones Modifié pour Améliorer la Prévion de L’écoulement Fluvial“. *Hydrological Sciences Journal/Journal*

- des Sciences Hydrologiques* 50 (February 2015): 299–318. <https://doi.org/10.1623/hysj.50.2.299.60649>.
- Huo, Zailin, Shaoyuan Feng, Shaozhong Kang, Guanhua Huang, Fengxin Wang, и Ping Guo. 2012. „Integrated neural networks for monthly river flow estimation in arid inland basin of Northwest China“. *Journal of Hydrology* 420–421: 159–70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.054>.
- Javaheri, Amir, Meghna Babbar-Sebens, Robert N. Miller, Sascha L. Hallett, и Jerri L. Bartholomew. 2019. „An adaptive ensemble Kalman filter for assimilation of multi-sensor, multi-modal water temperature observations into hydrodynamic model of shallow rivers“. *Journal of Hydrology* 572 (October 2017): 682–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.036>.
- Jean-Baptiste, Nelly, Pierre Olivier Malaterre, Christophe Dorée, и 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): 2201–14. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2010.12.021>.
- Jiang, Simin, Jinhong Fan, Xuemin Xia, Xianwen Li, и Ruicheng Zhang. 2018. „An effective Kalman filter-based method for groundwater pollution source identification and plume morphology characterization“. *Water (Switzerland)* 10 (8). <https://doi.org/10.3390/w10081063>.
- Kabir, Sk Faisal, Godwin Appiah Assumaning, и Shouy Yuh Chang. 2017. „Efficiency of using 4DVar, 3DVar and EnKF data assimilation methods in groundwater contaminant transport modelling“. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 8189 (August): 1–17. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1304273>.
- Kalman, R. E. 1960. „A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems“. *Journal of Basic Engineering* 82 (1): 35. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>.
- Karl Astrom, Johan. 2002. „PID Control“. *Control System Design*. <https://doi.org/10.1007/1-84628-148-2>.
- Kim, Yeonsu. 2013. „Probabilistic estimation of river discharge considering channel characteristics uncertainty with particle filters“.
- Kim, Yeonsu, Y. Tachikawa, M. Shiiba, S. Kim, K. Yorozu, и S. J. Noh. 2013. „Simultaneous estimation of inflow and channel roughness using 2D hydraulic model and particle filters“. *Journal of Flood Risk Management* 6 (2): 112–23. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2012.01164.x>.
- Leach, James M., и Paulin Coulibaly. 2019. „An extension of data assimilation into the short-term hydrologic forecast for improved prediction reliability“. *Advances in Water Resources* 134 (August). <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103443>.
- Leach, James M., Kurt C. Kornelsen, и Paulin Coulibaly. 2018. „Assimilation of near-real time data products into models of an urban basin“. *Journal of Hydrology* 563 (April): 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.064>.
- 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>.
- Li, Liangping, Ryan Puzel, и Arden Davis. 2018. „Data assimilation in groundwater modelling: ensemble Kalman filter versus ensemble smoothers“. *Hydrological Processes* 32 (13): 2020–29. <https://doi.org/10.1002/hyp.13127>.
- Li, Liangping, Larry Stetler, Zhendan Cao, и Arden Davis. 2018. „An iterative normal-score ensemble smoother for dealing with non-Gaussianity in data assimilation“. *Journal of Hydrology*, изд. January. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.038>.
- Li, Xiao-Li, Haishen Lü, Robert Horton, Tianqing An, и Zhongbo Yu. 2014. „Real-time flood forecast using the coupling support vector machine and data assimilation method“. *Journal of Hydroinformatics* 16 (5): 973. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.075>.
- Li, Xiao Li, Haishen Lü, Robert Horton, Tianqing An, и Zhongbo Yu. 2014. „Real-time flood forecast using the coupling support vector machine and data assimilation method“. *Journal of Hydroinformatics* 16 (5): 973–88. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.075>.
- Li, Xue, Jian Sha, You-meng Li, и Zhong-Liang Wang. 2018. „Comparison of hybrid models for daily streamflow prediction in a forested basin“. *Journal of Hydroinformatics* 20 (1): 191–205. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.189>.
- Li, Yuan, Dongryeol Ryu, Andrew W. Western, Q. J. Wang, David E. Robertson, и Wade T. Crow. 2014. „An integrated error parameter estimation and lag-aware data assimilation scheme for real-time flood forecasting“. *Journal of Hydrology* 519 (PD): 2722–36. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.009>.
- 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.

- Loos, Sibren, Chang Min Shin, Julius Sumihar, Kyunghyun Kim, Jaegab Cho, и Albrecht H. Weerts. 2020. „Ensemble data assimilation methods for improving river water quality forecasting accuracy“. *Water Research* 171: 115343. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115343>.
- Lund, Nadia, Henrik Madsen, Maurizio Mazzoleni, Dimitri Solomatine, и Morten Borup. 2019. „Assimilating flow and level data into an urban drainage surrogate model for forecasting flows and overflows“. *Journal of Environmental Management* 248 (May): 109052. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.110>.
- Lund, Nadia, Maurizio Mazzoleni, Henrik Madsen, Ole Mark, Peter Steen Mikkelsen, и Dimitri Solomatine. 2018. „Using the Ensemble Kalman Filter to update a fast surrogate model for flow forecasting“. *11th International Conference on Urban Drainage Modelling*, 23–26.
- Madsen, Henrik, Dan Rosbjerg, Jesper Damgård, & Frands, и S0bjerg Hansen. 2003. „Data assimilation in the MIKE 11 Flood Forecasting system using Kalman filtering“. *Water Resources Systems— Hydrological Risk, Management and Development*, изд. 281: 75–81.
- 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>.
- Man, Jun, Weixuan Li, Lingzao Zeng, и Laosheng Wu. 2016. „Data assimilation for unsaturated flow models with restart adaptive probabilistic collocation based Kalman filter“. *Advances in Water Resources* 92 (June): 258–70. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.03.016>.
- Matgen, P., M. Montanari, R. Hostache, L. Pfister, L. Hoffmann, D. Plaza, V. R.N. Pauwels, G. J.M. De Lannoy, R. De Keyser, и H. H.G. Savenije. 2010. „Towards the sequential assimilation of SAR-derived water stages into hydraulic models using the Particle Filter: Proof of concept“. *Hydrology and Earth System Sciences* 14 (9): 1773–85. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1773-2010>.
- MathWorks Inc. 2015. „Matlab Version 8.6. 0.267246 (R2018b)“. The MathWorks Inc Natick, MA.
- Mazzoleni, Maurizio, Vivian Juliette Cortes Arevalo, Uta Wehn, Leonardo Alfonso, Daniele Norbiato, Martina Monego, Michele Ferri, и Dimitri P. Solomatine. 2017. „Towards assimilation of crowdsourced observations for different levels of citizen engagement: the flood event of 2013 in the Bacchiglione catchment“. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, изд. February: 1–40. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-59>.
- Mazzoleni, Maurizio, Vivian Juliette Cortes Arevalo, Uta Wehn, Leonardo Alfonso, Daniele Norbiato, Martina Monego, Michele Ferri, и Dimitri P. Solomatine. 2018. „Exploring the influence of citizen involvement on the assimilation of crowdsourced observations: A modelling study based on the 2013 flood event in the Bacchiglione catchment (Italy)“. *Hydrology and Earth System Sciences* 22 (1): 391–416. <https://doi.org/10.5194/hess-22-391-2018>.
- Mazzoleni, Maurizio, Seong Jin Noh, Haksu Lee, Yuqiong Liu, Dong Jun Seo, Alessandro Amaranto, Leonardo Alfonso, и Dimitri P. Solomatine. 2018. „Real-time assimilation of streamflow observations into a hydrological routing model: effects of model structures and updating methods“. *Hydrological Sciences Journal* 63 (3): 386–407. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1430898>.
- Mazzoleni, Maurizio, Martin Verlaan, Leonardo Alfonso, Martina Monego, Daniele Norbiato, Michele Ferri, и Dimitri P. Solomatine. 2017. „Can assimilation of crowdsourced data in hydrological modelling improve flood prediction?“. *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (2): 839–61. <https://doi.org/10.5194/hess-21-839-2017>.
- McMillan, H. K., E. O. Hreinsson, M. P. Clark, S. K. Singh, C. Zammit, и M. J. Uddstrom. 2013. „Operational hydrological data assimilation with the recursive ensemble Kalman filter“. *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (1): 21–38. <https://doi.org/10.5194/hess-17-21-2013>.
- 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>.
- Milasinovic, Milos, Budo Zindovic, Nikola Rosic, и Dusan Prodanovic. 2019. „PID controllers as data assimilation tool for 1D hydrodynamic models of different complexity“. *V Proceedings of the 5th International conference SimHydro 2019*. Nice.
- Milasinovic, Milos, Budo Zindovic, Nikola Rosic, и Dušan Prodanović. 2018. „ANALYSIS OF THE 1D HYDRODYNAMIC MODEL COMPLEXITY INFLUENCE ON PID CONTROLLER BASED DATA ASSIMILATION – PRELIMINARY RESULTS: In Serbian“. *Vodoprivreda* 50: 245–54.
- Miller, R N, M Ghil, и F Gauthiez. 1994. „Advanced Data Assimilation in Strongly Nonlinear Dynamical-Systems“. *Journal of the Atmospheric Sciences*. [https://doi.org/Doi.10.1175/1520-0469\(1994\)051<1037:Adain>2.0.Co;2](https://doi.org/Doi.10.1175/1520-0469(1994)051<1037:Adain>2.0.Co;2).
- Moradkhani, Hamid, Kuo-Lin Hsu, Hoshin Gupta, и Soroosh Sorooshian. 2005. „Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter“. *Water Resources Research* 41 (5): 1–17.

<https://doi.org/10.1029/2004WR003604>.

- Moral, Pierre Del. 1997. „Nonlinear Interacting filtering : particle“. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series I - Mathematics* 325 (1): 653–58.
- Munier, S., A. Polebitski, C. Brown, G. Belaud, и D.P. Lettenmaier. 2014. „SWOT data assimilation for operational reservoir management on the upper Niger River Basin“. *Water Resources Research* 51: 554–75. <https://doi.org/10.1002/2013WR014979>.Reply.
- Mure-Ravaud, Mathieu, Guillaume Binet, Michael Bracq, Jean Jacques Perarnaud, Antonin Fradin, и Xavier Litrico. 2016. „A web based tool for operational real-time flood forecasting using data assimilation to update hydraulic states“. *Environmental Modelling and Software* 84: 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.002>.
- Neal, Jeffrey C., Peter M. Atkinson, и Craig W. Hutton. 2007. „Flood inundation model updating using an ensemble Kalman filter and spatially distributed measurements“. *Journal of Hydrology* 336 (3–4): 401–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.012>.
- Neal, Jeffrey, Guy Schumann, Paul Bates, Wouter Buytaert, Patrick Matgen, и Florian Pappenberger. 2009. „A data assimilation approach to discharge estimation from space“. *Hydrological Processes* 23: 3641–49. <https://doi.org/10.1002/hyp>.
- Niedzielski, Tomasz, и Bartłomiej Miziński. 2017. „Real-time hydrograph modelling in the upper Nysa Kłodzka river basin (SW Poland): a two-model hydrologic ensemble prediction approach“. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 31 (6): 1555–76. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1251-5>.
- Ocio, David, Nataliya Le Vine, Ida Westerberg, Florian Pappenberger, и Wouter Buytaert. 2017. „The role of rating curve uncertainty in real-time flood forecasting“. *Water Resources Research* 53 (5): 4197–4213. <https://doi.org/10.1002/2016WR020225>.
- Paiva, R. C.D., W. Collischonn, M. P. Bonnet, L. G.G. De Gonçalves, S. Calmant, A. Getirana, и J. Santos Da Silva. 2013. „Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon“. *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (7): 2929–46. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2929-2013>.
- Palmitessa, Rocco, Peter Steen Mikkelsen, Adrian Wing Keiung Law, и Morten Borup. 2019. „A data assimilation scheme tailor-made for real-time modelling of urban drainage tunnels“. *У 17th International Computing & Control for the Water Industry Conference*. Exeter.
- Petrie, Ruth E., и Sarah L. Dance. 2010. „Ensemble-based data assimilation and the localisation problem“. *Weather* 65 (3): 65–69. <https://doi.org/10.1002/wea.505>.
- Petrovic, Jasna, Bojan Palmar, и Marko Ivetic. 1994. „Transformacija poplavnog talasa metodom razdvajanja operatora: In Serbian“. *У Zbornik radova 11. savetovanja JDHI i JDH*, 145–50. Belgrade.
- Pramanik, Niranjana, Rabindra K. Panda, и Adarsh Singh. 2010. „Daily river flow forecasting using wavelet ANN hybrid models“. *Journal of Hydroinformatics* 13 (1): 49. <https://doi.org/10.2166/hydro.2010.040>.
- Rakovec, O., A. H. Weerts, P. Hazenberg, P. J.J. F. Torfs, и R. Uijlenhoet. 2012. „State updating of a distributed hydrological model with ensemble kalman Filtering: Effects of updating frequency and observation network density on forecast accuracy“. *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (9): 3435–49. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3435-2012>.
- Randrianasolo, A., G. Thirel, M. H. Ramos, и E. Martin. 2014. „Impact of streamflow data assimilation and length of the verification period on the quality of short-term ensemble hydrologic forecasts“. *Journal of Hydrology* 519 (PD): 2676–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.032>.
- Rasmussen, J., H. Madsen, K. H. Jensen, и J. C. Refsgaard. 2015. „Data assimilation in integrated hydrological modeling using ensemble Kalman filtering: evaluating the effect of ensemble size and localization on filter performance“. *Hydrology and Earth System Sciences* 19 (7): 2999–3013. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2999-2015>.
- Reichle, Rolf H., Jeffrey P. Walker, Randal D. Koster, и Paul R. Houser. 2002. „Extended versus Ensemble Kalman Filtering for Land Data Assimilation“. *Journal of Hydrometeorology* 3 (6): 728–40. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0728:EVEKFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0728:EVEKFF>2.0.CO;2).
- Ricci, S., A. Piacentini, O. Thual, E. Le Pape, и G. Jonville. 2011. „Correction of upstream flow and hydraulic state with data assimilation in the context of flood forecasting“. *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (11): 3555–75. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3555-2011>.
- Romanowicz, Renata J., Peter C. Young, и Keith J. Beven. 2006. „Data assimilation and adaptive forecasting of water levels in the river Severn catchment, United Kingdom“. *Water Resources Research* 42 (6): 1–12. <https://doi.org/10.1029/2005WR004373>.
- Rosić, Nikola, Nenad Jaćimović, Dušan Prodanović, и 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.
- Rosić, Nikola, Dušan Prodanović, Boban Stojanović, и Dragana Obradović. 2017. „NEAR REAL TIME DATA ASSIMILATION OF NUMERICAL SIMULATION MODEL FOR DANUBE RIVER FROM NOVI SAD TO IRON GATE I, TEST RESULTS: In Serbian“. *Vodoprivreda* 49 (288): 253–61.
- Ruslan, Fazlina Ahmat, Abd Manan Samad, и Ramli Adnan. 2017. „River water level prediction modelling for flood monitoring using NNARX“. *Proceedings of the 2016 6th International Conference on System Engineering and Technology, ICSET 2016*, 18–22. <https://doi.org/10.1109/FIT.2016.7857511>.
- Samuel, Jos, Paulin Coulibaly, Gift Dumedah, и Hamid Moradkhani. 2014. „Assessing model state and forecasts variation in hydrologic data assimilation“. *Journal of Hydrology* 513: 127–41. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.048>.
- Schneider, Raphael, Marc Etienne Ridler, Peter Nygaard Godiksen, Henrik Madsen, и Peter Bauer-Gottwein. 2018. „A data assimilation system combining CryoSat-2 data and hydrodynamic river models“. *Journal of Hydrology* 557: 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.052>.
- 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>.
- Seo, Dong Jun, Lee Cajina, Robert Corby, и Tracy Howieson. 2009. „Automatic state updating for operational streamflow forecasting via variational data assimilation“. *Journal of Hydrology* 367 (3–4): 255–75. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.019>.
- Shin, Yongchul, Kyoung Jae Lim, Kyungwon Park, и Younghun Jung. 2016. „Development of dynamic ground water data assimilation for quantifying soil hydraulic properties from remotely sensed soil moisture“. *Water (Switzerland)* 8 (7). <https://doi.org/10.3390/w8070311>.
- Skogestad, Sigurd. 2004. „Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning“. *Modeling, Identification and Control* 25 (2): 85–120. <https://doi.org/10.4173/mic.2004.2.2>.
- Sun, Leqiang, Ioan Nistor, и Ousmane Seidou. 2015. „Streamflow data assimilation in SWAT model using Extended Kalman Filter“. *Journal of Hydrology* 531: 671–84. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.060>.
- Sun, Yabin, Chi Dung Doan, Anh Tuan Dao, Jiandong Liu, и Shie Yui Liong. 2014. „Improving numerical forecast accuracy with ensemble Kalman filter and chaos theory: Case study on Ciliwung river model“. *Journal of Hydrology* 512: 540–48. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.016>.
- Tang, Qi, Oliver S. Schilling, Wolfgang Kurtz, Philip Brunner, Harry Vereecken, и Harrie-Jan Hendricks Franssen. 2018. „Simulating Flood-Induced Riverbed Transience Using Unmanned Aerial Vehicles, Physically Based Hydrological Modeling, and the Ensemble Kalman Filter“. *Water Resources Research* 54 (11): 9342–63. <https://doi.org/10.1029/2018wr023067>.
- Thirel, G., E. Martin, J.-F. Mahfouf, S. Massart, S. Ricci, и F. Habets. 2010. „A past discharges assimilation system for ensemble streamflow forecasts over France – Part 1: Description and validation of the assimilation system“. *Hydrology and Earth System Sciences* 14 (8): 1623–37. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1623-2010>.
- Tirupathi, Seshu, Tigran T. Tchraikian, Sergiy Zhuk, и Sean McKenna. 2016. „Shock capturing data assimilation algorithm for 1D shallow water equations“. *Advances in Water Resources* 88: 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.12.021>.
- 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>.
- Vrugt, Jasper A., Hoshin V. Gupta, Breannán Ó Nualláin, и Willem Bouten. 2006. „Real-Time Data Assimilation for Operational Ensemble Streamflow Forecasting“. *Journal of Hydrometeorology* 7 (3): 548–65. <https://doi.org/10.1175/JHM504.1>.
- 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>.
- Wang, Bin, Juanjuan Liu, Li Liu, Shiming Xu, и Wenyu Huang. 2018. „An approach to localization for ensemble-based data assimilation“. *PLoS ONE* 13 (1): 11–26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191088>.
- Wang, Jiabiao, Jianshi Zhao, Xiaohui Lei, и Hao Wang. 2019. „An effective method for point pollution source identification in rivers with performance-improved ensemble Kalman filter“. *Journal of Hydrology* 577 (June): 123991.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123991>.

- Weerts, Albrecht H., и Ghada Y.H. El Serafy. 2006. „Particle filtering and ensemble Kalman filtering for state updating with hydrological conceptual rainfall-runoff models“. *Water Resources Research* 42 (9): 1–17. <https://doi.org/10.1029/2005WR004093>.
- Wu, Guocan, и Xiaogu Zheng. 2018. „The Error Covariance Matrix Inflation in Ensemble Kalman Filter“. *Kalman Filters - Theory for Advanced Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71960>.
- Xu, Xingya, Xuesong Zhang, Hongwei Fang, Ruixun Lai, Yuefeng Zhang, Lei Huang, и Xiaobo Liu. 2017. „A real-time probabilistic channel flood-forecasting model based on the Bayesian particle filter approach“. *Environmental Modelling and Software* 88: 151–67. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.010>.
- Yan, Jun, Jiaming Jin, Furong Chen, Guo Yu, Hailong Yin, и Wenjia Wang. 2018. „Urban flash flood forecast using support vector machine and numerical simulation“. *Journal of Hydroinformatics* 20 (1): 221–31. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.175>.
- Yoon, Yeosang, Michael Durand, Carolyn J. Merry, Elizabeth A. Clark, Konstantinos M. Andreadis, и Douglas E. Alsdorf. 2012. „Estimating river bathymetry from data assimilation of synthetic SWOT measurements“. *Journal of Hydrology* 464–465 (2012): 363–75. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.028>.
- Yu, S.-L., A. Tai, M.-Y. Tsai, M.-H. Hsu, N. Kimura, и M.-C. Tsao. 2014. „A river flash flood forecasting model coupled with ensemble Kalman filter“. *Journal of Flood Risk Management* 9 (2): 178–92. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12128>.
- Zamani Sabzi, Hamed, James Phillip King, и Shalamu Abudu. 2017. „Developing an intelligent expert system for streamflow prediction, integrated in a dynamic decision support system for managing multiple reservoirs: A case study“. *Expert Systems with Applications* 83: 145–63. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.04.039>.
- Zhang, Jian, и Yuansheng Lou. без датума. „Water level prediction based on Improved Grey RBF neural network (model“, 775–79.
- Ziegler, J. G., и N. B. Nichols. 1995. „Optimum settings for automatic controllers“. *InTech* 42 (6): 94–100. <https://doi.org/10.1115/1.2899060>.
- 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>.

8 Prilozi

8.1 Prilog 1 – Tabela sa pregledom literature koja se odnosi na primenu metoda asimilacije podataka u hidrološko-hidrauličkom modeliranju

Redni broj	Istraživanje	Problem koji se rešava/gde se daje poboljšanje	Model koji se koristi	Tip merenja	Asimilaciona metoda
1	(Abaza i ostali 2014)	Kratkoročne hidrološke prognoze protoka na izlazu sa sliva Saumon	Hidrološki model Hydrotel	Merenje protoka	EnKF
2	(Abaza, Garneau, i Anctil 2015)	Kratkoročne hidrološke prognoze	Hidrološki model GR4J	Protok	EnKF i Variational Data assimilation
3	(Addai i ostali 2016)	Poboljšanje prognoze za kretanje zagadjenja u podzemnoj vodi	Samostalno razvijen numerički model za hidrodinamiku i jednačina advekcije-disperzije za transport	Sintetički podaci o koncentraciji zagadjenja	EnKF
4	(Andreadis i ostali 2007)	Procena protoka i dubina u reci	2D hidrodinamički model LISFLOOD-FP	Satelitski snimci nivoa vode	EnKF
5	(Andreadis i Schumann 2014)	Procena nivoa vode i procena polavljenog područja	2D hidrodinamički model LISFLOOD-FP	Satelitski snimci nivoa vode	EnKF
6	(Annis i Nardi 2019)	Prognoza poplava na rekama	FLO-2D PRO hidraulički model	Crowdsourced data (VGI – Volunteered Geographic Information)	EnKF
7	(Barthélémy i ostali 2017)	Prognoza poplava na rekama	1D hidraulički model MASCARET	Nivoi i protoci	EnKF
8	(Biancamaria i ostali 2011)	Prognoza poplava na rekama koje se ulivaju u Severni ledeni okean	2D hidrodinamički model LISFLOOD-FP	Satelitski snimci površine vode (širine vodenog ogledala)	EnKF
9	(Borup i ostali 2014)	Prognoza izlivanja iz kombinovanog kanizacionog sistema	SWMM	Merenje protoka na ispuštima iz sistema	EnKF i deterministički metod
10	(Borup, Grum, i Mikkelsen 2013)	Poboljšanje prognoze oticaja sa sliva	Linearni hidrološki model	Kišomeri	Custom-made korekcije modela
11	(Borup i ostali 2018)	Prognoza protoka u sistemu za odvođenje kišnih voda	MIKE-URBAN	Nivo vode u šahtovima	EnKF
12	(Bourgin i ostali 2014)	Ispitivanje uticaja asimilacije podataka na hidrološke prognoze	GRP hidrološki model	Oticaj sa sliva – protok	Determinističko korigovanje rezultata modela
13	(Bouzaglou i ostali 2018)	Procena intruzije morske vode u priobalne akvifere	SUTRA – model za rešavanje kretanja podzemne vode i transport materije	ERT – electro resistivity tomography	EnKF
14	(Brisset i ostali 2018)	Procena dotoka u rečnu deonicu	1D Sen-Venanove jednačine	Satelitski snimci površine vode (širine vodenog ogledala) – SWOT (Surface Water and Ocean Topography mission)	Variational Data Assimilation

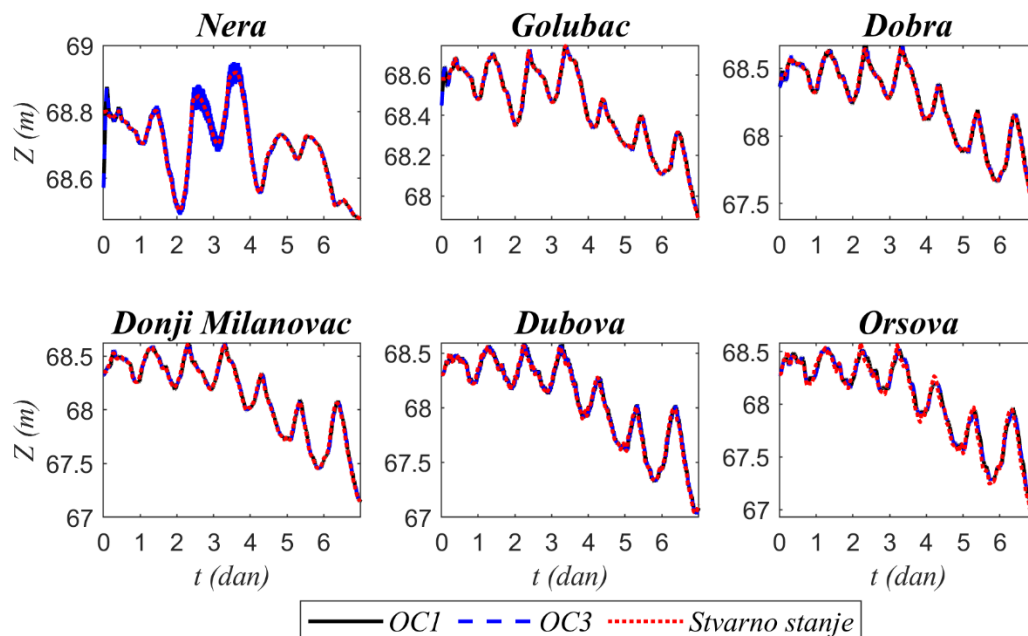
15	(Cao i ostali 2019)	Simulacije rušenja brane na eksperimentalnoj instalaciji	2D hidrodinamički model - HydroM2D	Merenje nivoa vode	Particle Filter
16	(H. Chang, Liao, i Zhang 2017)	Modeliranje pod površinskog strujanja vode pomoću surogat modela i asimilacije podataka	Surogat model pod površinskog tečenja	Sintetički podaci	Ensemble Smoother
17	(S.-Y. Chang, Chowhan, i Latif 2012)	Transport zagađenja u podzemnoj vodi	Razvijen numerički model samostalno	Sintetički podaci o koncentraciji	Particle Filter
18	(Chen, Pang, i Wu 2018)	Najava poplava u realnom vremenu na velikim rekama	1D Sen-Venanove jednačine	Mereni nivoi vode	Particle Filter
19	(Cheng i ostali 2011)	Prognoza proemen nivoa podzemne vode	MODFLOW	Mereni nivoi podzemne vode	Nudging Data Assimilation
20	(Clark i ostali 2008)	Popravljanje prognoze protoka	Distribuirani hidrološki model - TopNet	Mereni protoci	EnKF
21	(Cooper i ostali 2018)	Korekcija parametara hidrauličkog modela reke primenom asimilacije podataka	Razvijen hidraulički model za potrebe istraživanja	Sintetički podaci o protoku i nivou	EnKF
22	(Crestani i ostali 2013)	Procena filtracionih karakteristika akvifera	2D model razvijen za potrebe istraživanja	Sintetički podaci o koncentraciji trasera	EnKF vs. Ensemble Smoother
23	(Dechant i Moradkhani 2011)	Poboljšanje početnih uslova za prognozu protoka na slivovima pod snegom	SAC-SMA hidrološki model	Visina snežnog pokrivala	Particle Filter
24	(Divac i ostali 2009)	Kontinualna prognoza oticaja sa sliva	SWAT hidrološki model	Padavine	Deterministički pristup
25	(Dumedah i Coulibaly 2014a)	Modeliranje oticaja sa osmotrenih i neosmotrenih slivova	SAC-SMA hidrološki model	Merenje protoka - oticaja	Evolutionary data assimilation - NSGA-II
26	(Dumedah i Coulibaly 2014b)	Hidrološko modeliranje	SAC-SMA hidrološki model	Merenje protoka - oticaja	Kombinacija Evolutionary DA-EnKF i Evolutionary DA-Particle Filter
27	(Durand i ostali 2008)	Procena dubine i nagiba površine vode	2D hidrodinamički model LISFLOOD-FP	Satelitski snimci površine vode (širine vodenog ogledala) – SWOT (Surface Water and Ocean Topography mission)	EnKF
28	(Fava i ostali 2020)	Poboljšanje najave poplava na urbanim slivovima	SWMM	Nivoi vode	Custom-made indirektna korekcija stanja (nivoa) korekcijom ulaznih veličina (padavina)
29	(Franssen i Kinzelbach 2009)	Kalibracija modela za podzemne vode	Rešavanje Darsijeve jednačine	Sintetički podaci o nivou podzemne vode	EnKF
30	(Garambois i ostali 2020)	Procena protoka na reci	1D Sen-Venanove jednačine	Satelitski snimci površine vode	Variational Data Assimilation

31	(García-Pintado i ostali 2013)	Modeliranje poplava	2D hidrodinamički model LISFLOOD-FP	Satelitski snimci površine vode	Ensemble Transform Kalman Filter – ETKF
32	(Giustarini i ostali 2011)	Poboljšana prognoza nivoa vode	HEC-RAS	Satelitski i radarski snimci površine vode	Particle Filter
33	(Gragne i ostali 2015)	Poboljšana procena dotoka u akumulaciju za hidroenergetiku	HBV hidrološki model	Protok kao oticaj sa sliva	EnKF
34	(Habert i ostali 2016)	Najava poplava	MASCARET	Merenje nivoa vode	Extended Kalman Filter
35	(Hansen i ostali 2014)	Procena protoka u sistemima za urbano odvodnjavanje	MIKE-URBAN	Merenje nivoavode u šahtovima	Deterministička, custom-made (tailor-made) metoda
36	(Hostache i ostali 2010)	Najava poplava	2D Shallow Water Equations	Nivoi vode na osnovu daljinske detekcije	Variational Data Assimilation (4D-var)
37	(Javaheri i ostali 2019)	Prognoza temperature vode u reci	Environmetal Fluid Dynamic Code - EFDC	Merenje temperature vode	EnKF
38	(Jean-Baptiste i ostali 2011)	Hidrauličko modeliranje za potrebe prognoze poplava, hidroenergetike itd.	1D Sen-Venanove jednačine	Merenje nivoa vode	EnKF
39	(Jiang i ostali 2018)	Detekcija izvora zagađenja u podzemnoj vodi	MODFLOW i MT3DMS	Sintetički podaci o koncentraciji zagađujuće materije	EnKF
40	(Kim 2013)	Probabilistička procena protoka u otvorenim tokovima	2D dinamički talas	Merenje nivoa	Particle Filter
41	(Kim i ostali 2013)	Procena dotoka u kanal i hrapavosti kanala	2D dynamic wave model	Mereni nivoi	Particle Filter
42	(Leach i Coulibaly 2019)	Modeliranje procesa padavine-oticaaj	HyMod hidrološki model	Merenje oticaja - protoka	EnKF i Particle filter
43	(Leach, Kornelsen, i Coulibaly 2018)	Modeliranje procesa padavine-oticaaj	GR4J, HyMod, MAC-HBV i SAC-SMA hidrološki modeli	Visina snežnog pokrivača, vlažnost zemljišta i protoka (oticaaj)	EnKF
44	(L. Li, Puzel, i Davis 2018)	Modeliranje tečenja u poroznoj sredini	Darsijev zakon	Nivo podzemen vode	EnKF vs. Ensemble smother
45	(X. L. Li i ostali 2014)	Modeliranje procesa padavine-oticaaj za potrebe najave polava primenom mašinskog učenja i asimilacije podataka	Surogat model zasnovan na metodi mašinskog učenja Support Vector Machines	Merenje oticaja	EnKF
46	(Y. Li i ostali 2014)	Hidrološko modeliranje za potrebe najave poplava	GR4H hidrološki model	Padavine, evapotranspiracija i oticaaj	Ensemble Smoother
47	(Loos i ostali 2020)	Prognoza kvaliteta vode u rekama	Delft-FEWS model za hidrodinamiku i transport	Sintetički podaci o koncentraciji algi	EnKF
48	(Lund i ostali 2019)	Prognoza protoka i izlivanja iz kanalizacionih sistema	Surogat model, Mike-Urban	Mereni nivoi	EnKF

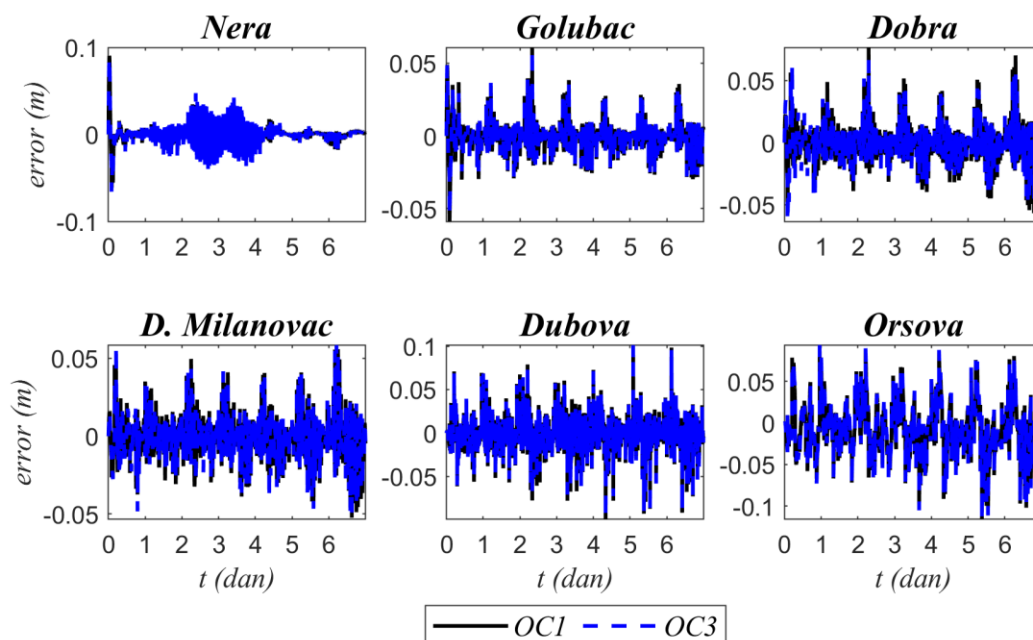
49	(Madsen i ostali 2003)	Najava poplava na otvorenim tokovima	MIKE 11	Mereni nivoi i protoci	EnKF
50	(Madsen i Skotner 2005)	Prognoza protoka na otvorenim tokovima u realnom-vremenu uz ubrzani asimilacioni algoritam	MIKE 11	Mereni nivoi	Custom-made metoda
51	(Man i ostali 2016)	Asimilacija podataka u modelima strujanja u nezasićenoj sredini	Ričardsove jednačine	Slobodna površina vode u nezasićenoj sredini	EnKF
52	(Matgen i ostali 2010)	Upravljanje rizicima od poplava	Community Land Model - CLM	Radarski snimci nivoa vode	Particle Filter
53	(Mazzoleni, Cortes Arevalo, i ostali 2017)	Prognoza poplava	Semi-distribuirani hidrološki model + Muskingam-Kanž hidraulički model	Crowdsourced data	Kalman filter
54	(Mazzoleni, Juliette Cortes Arevalo, i ostali 2018)	Prognoza poplava	Semi-distribuirani hidrološki model + Muskingam-Kanž hidraulički model	Crowdsourced data	Kalman filter
55	(Mazzoleni, Noh, i ostali 2018)	Prognoza poplava	Maskingam model (3p-Musk)	Merenje protoka	EnKF
56	(Mazzoleni, Verlaan, i ostali 2017)	Prognoza poplava	Semi-distribuirani hidrološki model	Crowdsourced data	Kalman filter
57	(McMillan i ostali 2013)	Najava poplava	TopNet hidrološki model	Merenje protoka	EnKF
58	(Milašinović i ostali 2020)	Prognoza nivoa na rekama	1D Difuzioni talas	Merenje nivoa	EnKF vs Custom-made DA
59	(Moradkhani i ostali 2005)	Procena neodređenosti hidroloških modela	Konceptualni hidrološki model HyMod	Merenje protoka	Particle Filter
60	(Munier i ostali 2014)	Upravljanje akumulacijom	Variable Infiltration Capacity (VIC) hidrološki model + LISFLOOD-FP hidraulički model	Satelitski snimci površine vode (širine vodenog ogledala) – SWOT (Surface Water and Ocean Topography mission)	EnKF
61	(Mure-Ravaud i ostali 2016)	Upravljanje sistemom za najavu poplava	Deterministički semi-distribuirani hidrološki model	Oticaji sa sliva	Kalman filter
62	(J. C. Neal, Atkinson, i Hutton 2007)	Prognoza protoka na rekama	Model dinamičkog talasa	Mereni nivoi	EnKF
63	(J. Neal i ostali 2009)	Procena protoka na rekama	Hec-RAS	Radarski snimci nivoa vode	EnKF
64	(Paiva i ostali 2013)	Procena protoka na velikim rekama	MGB-IPH hidrološko-hidraulički model	In-situ merenja i radarski snimci	EnKF
65	(Palmitessa i ostali 2019)	Procena oticaja i nivoa vode na urbanim slivovima	MIKE-URBAN	Nivoi vode	Custom-made DA
66	(Rakovec i ostali 2012)	Procena oticaja sa sliva	HBV-96 hidrološki model	Merenje oticaja sa sliva	EnKF
67	(Randrianasolo i ostali 2014)	Ispitivanje uticaja različitih parametara na kratkoročne hidrološke prognoze	SAFRAN–ISBA–MODCOU hidrometeorološki model	Mereni oticaji	Deterministički pristup, direktna korekcija

68	(Rasmussen i ostali 2015)	Prognoze oticaja sa sliva primenom integralnog hidrološkog modeliranja	MIKE-SHE hidrološki model	Mereni oticaji sa sliva i nivoi podzemne vode	Ensemble Transform Kalman Filter – ETKF
69	(Ricci i ostali 2011)	Prognoza poplava	MASCARET hidraulički model	Merenje nivoa	Kalmanov filter
70	(Romanowicz, Young, i Beven 2006)	Upravljanje rizikom od poplava	Nelinearni hidrološki model za transformaciju padavina u nivoa vode	Merenje nivoa	Kalmanov filter
71	(Samuel i ostali 2014)	Prognoza oticaja sa sliva	SAC-SMA hidrološki model	Merenje oticaja vlažnosti zemljišta	EnKF
72	(Schneider i ostali 2018)	Prognoza nivoa vode i protoka na rekama	MIKE HYDRO River software	Daljinska detekcija nivoa vode	Ensemble Transform Kalman Filter
73	(Seo i ostali 2009)	Prognoza protoka na slivovima	SAC-UH hidrološki model	Merenje protoka, evapotranspiracije i padavina	Variational Data Assimilation
74	(Shin i ostali 2016)	Procena filtracionih karakteristika zemljišta	Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP) hidrološki model	Daljinski detektovana vlažnost zemljišta	Custom-made DA
75	(L. Sun, Nistor, i Seidou 2015)	Asimilacija protoka u reci	SWAT hidrološki model	Merenje protoka	ETKF
76	(Y. Sun i ostali 2014)	Kombinacija asimilacije podataka i teorije haosa za prognozu stanja na reci do 4 dana u budućnost	MIKE 11 hidraulički model	Mereni nivoi	EnKF
77	(Tang i ostali 2018)	Procena stanja geometrije rečnog toka nakon poplava pomoću asimilacije podataka	HydroGeoSphere hidrološki model	UAV – dronovi za snimanje geometrije korita	EnKF
78	(Tirupathi i ostali 2016)	Modeliranje prostiranja poplavnog talasa usled rušenja brane	1D Sen Venanove jednačine	Mereni nivoi	Custom-made DA
79	(Vrugt i ostali 2006)	Prognoza protoka u otvorenim tokovima	SAC-SMA hidrološki model	Merenje protoka	EnKF
80	(J. Wang i ostali 2019)	Detekcija izvora zagađenja u reci pomoću asimilacije podataka	1D Sen-Venanove jednačine za hidrodinamiku i jednačina transporta	Sintetički podaci o koncentraciji zagađujuće materije	EnKF
81	(Weerts i El Serafy 2006)	Prognoza oticaja sa sliva	HBV-96	Mereni protoci i padavine	EnKF i Particle Filter
82	(Xu i ostali 2017)	Prognoza poplava	1D Sen-Venanove jednačine	Mereni nivoi	Particle Filter
83	(Yoon i ostali 2012)	Procena geometrije rečnog korita	LISFLOOD-FP	Satelitski snimci–SWOT (Surface Water and Ocean Topography mission)	EnKF
84	(Yu i ostali 2014)	Prognoza bujičnih poplava	Surogat model u kom se primenom veštačkih neuronskih mreža računaju nivoi na reci	Mereni nivoi	EnKF
85	(Ziliani i ostali 2019)	Prognoza poplava u slučaju proloma brane	Shallow Water Equations -SWE hidraulički model	Mereni nivoi	EnKF

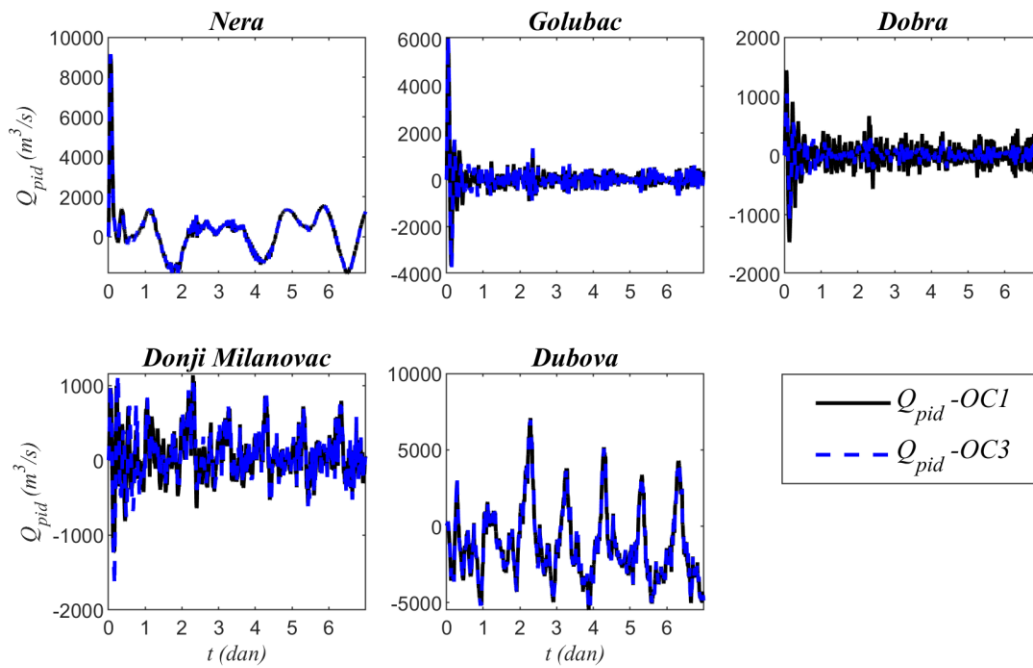
8.2 Prilog 2 – Rezultati simulacija kada se kao optimalne vrednosti parametara kontrolera koriste min, max i median vrednosti iz skupa nedominantnih rešenja



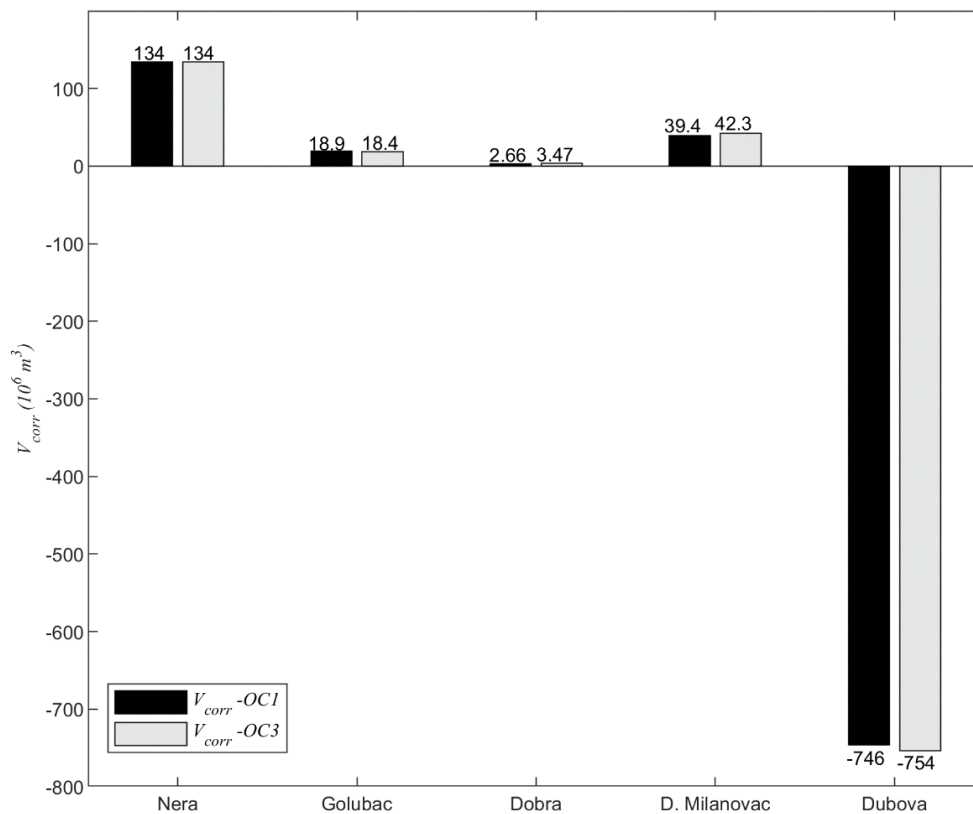
Slika 72. Nivoi na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



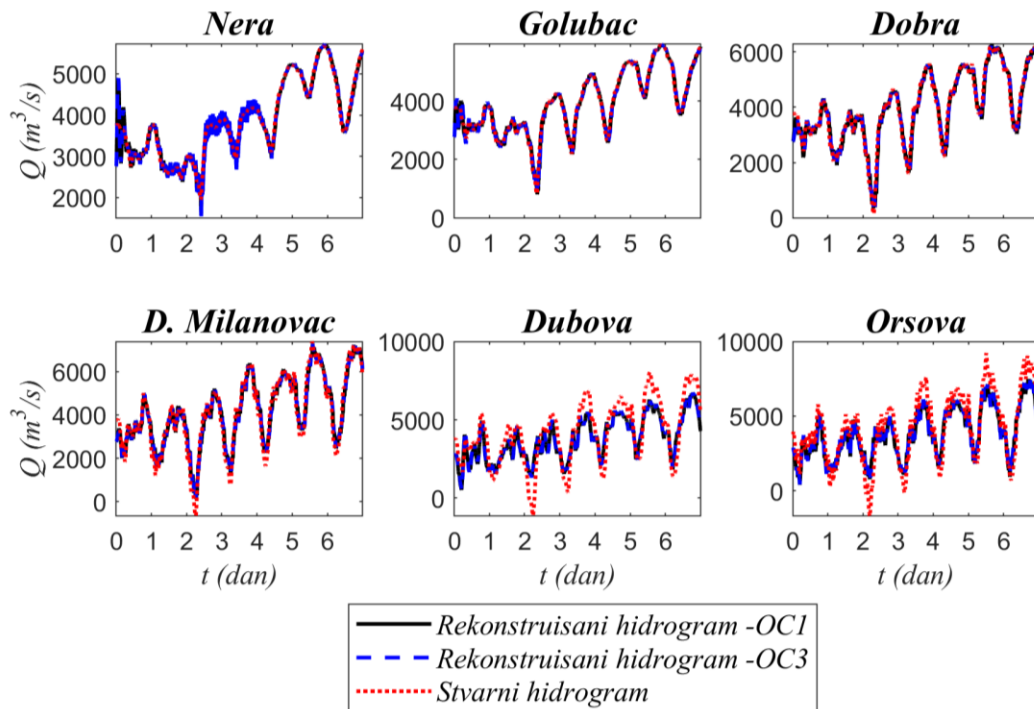
Slika 73. Odstupanja merenih i modeliranih nivoa (greške - errors) na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



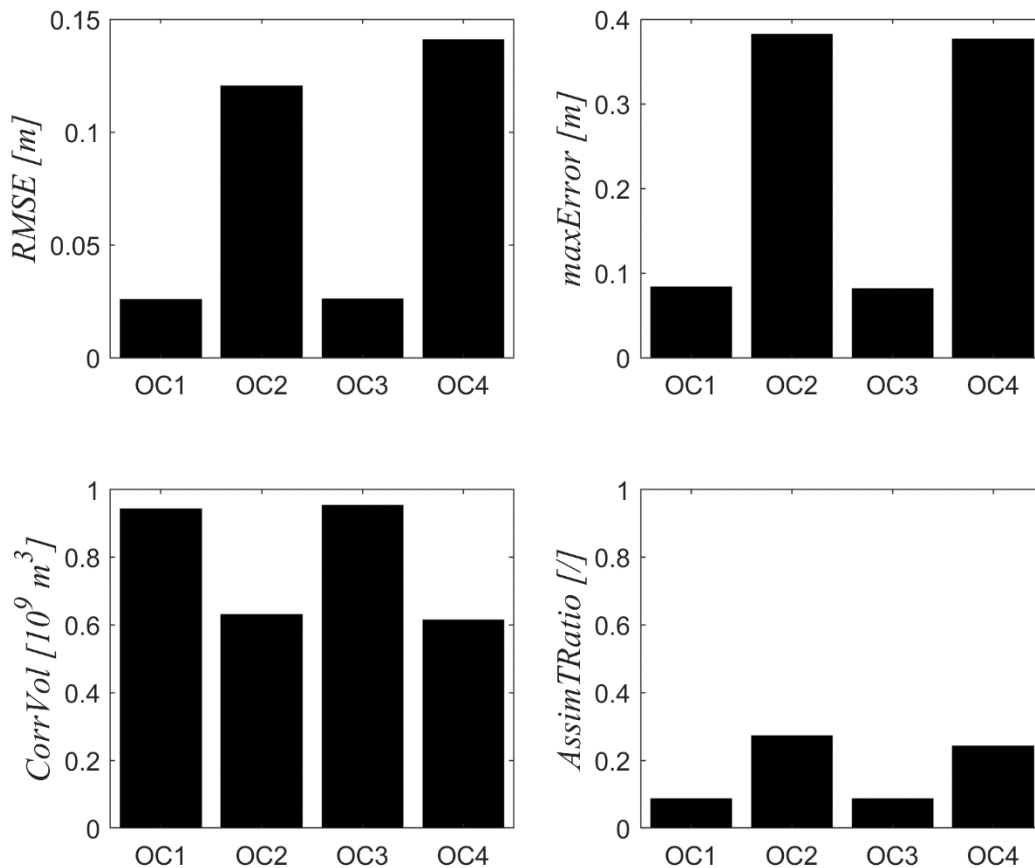
Slika 74. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



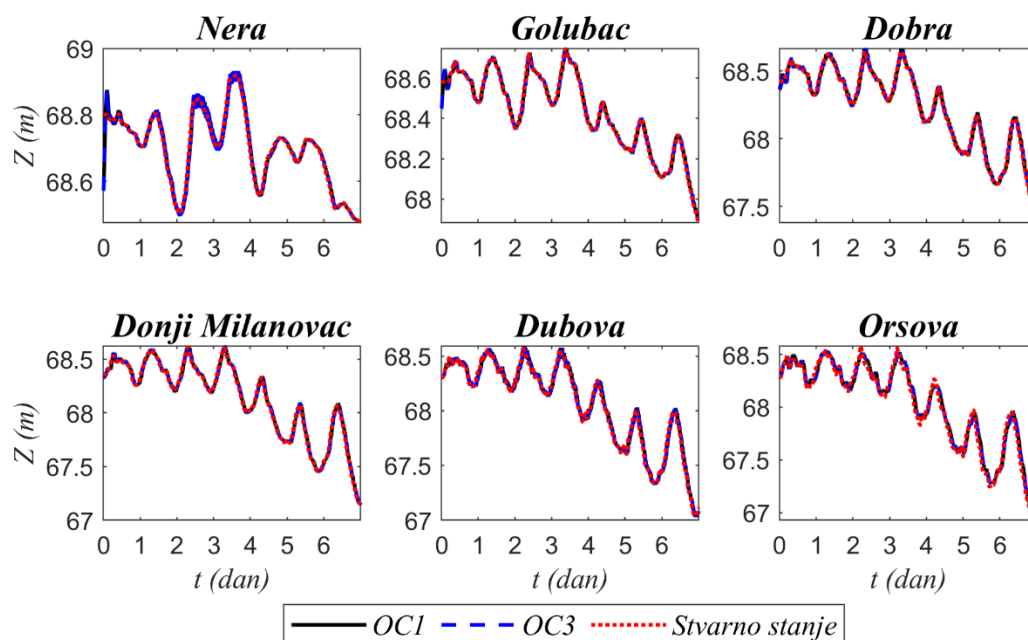
Slika 75. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija 1 i 3 – sintetički scenario



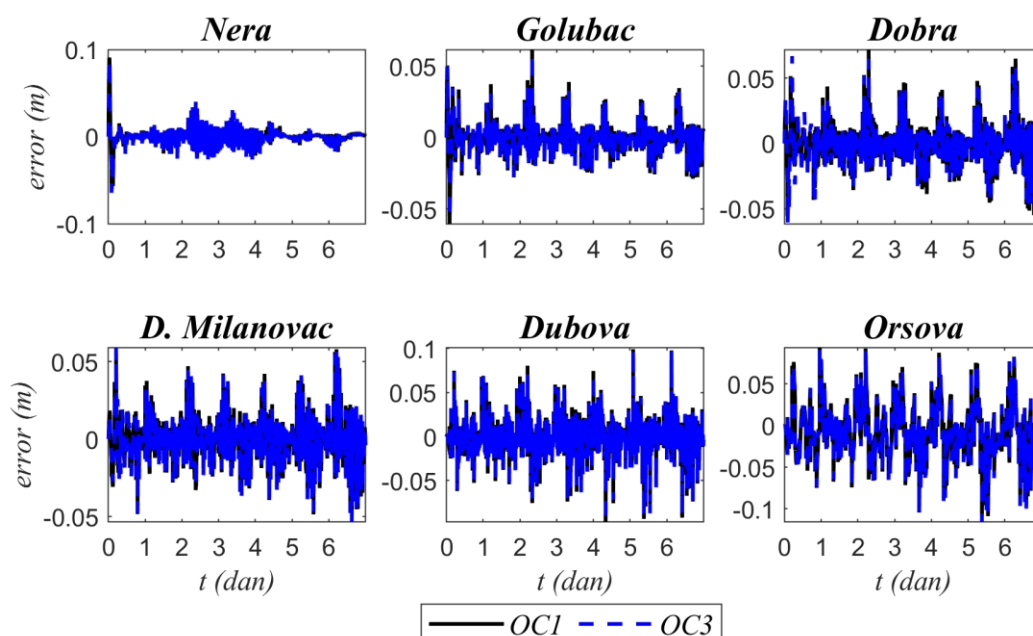
Slika 76. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



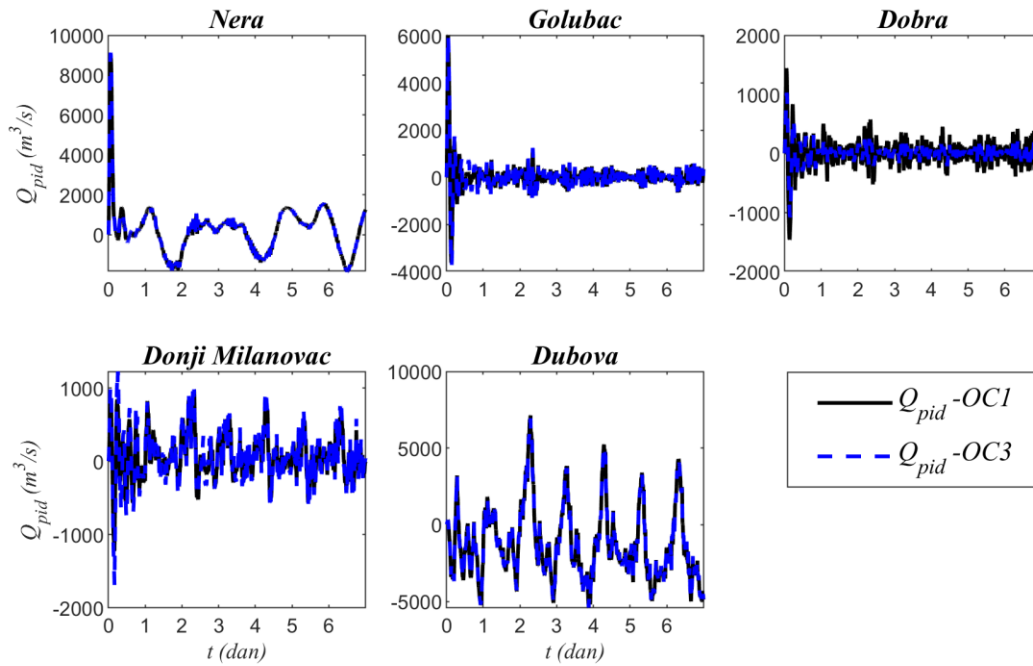
Slika 77. Indikatori performansi asimilacije podataka na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao medijana pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



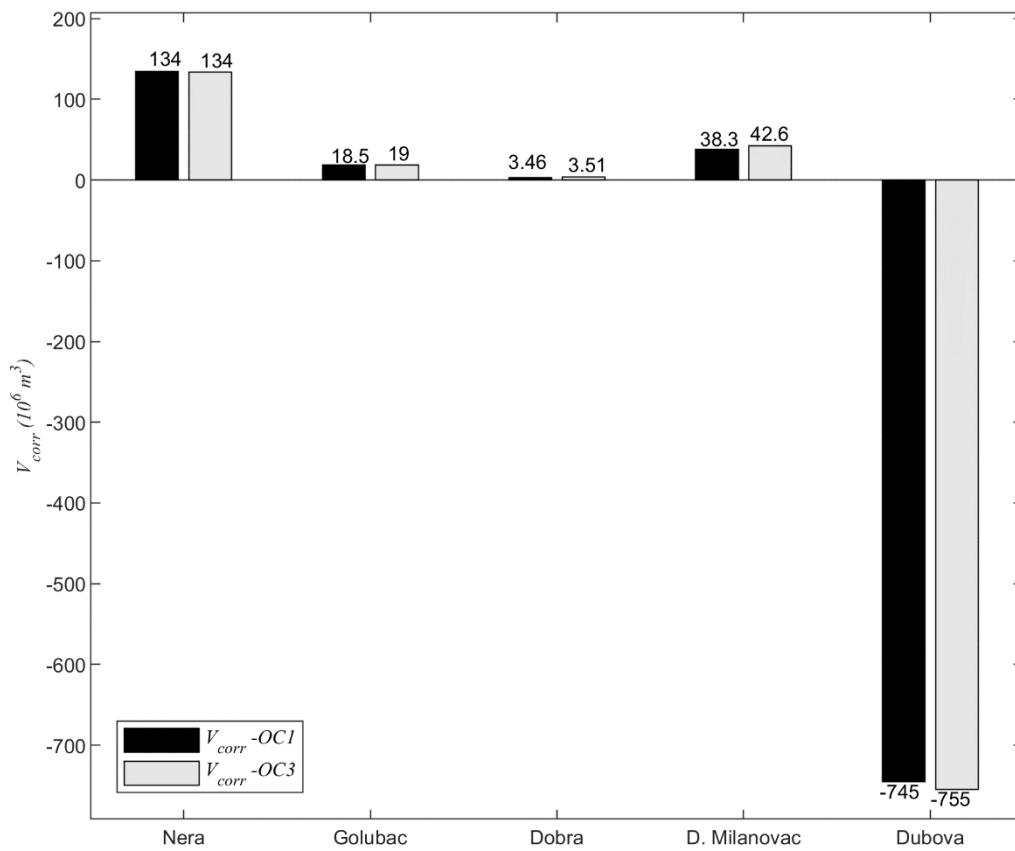
Slika 78. Nivoi na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



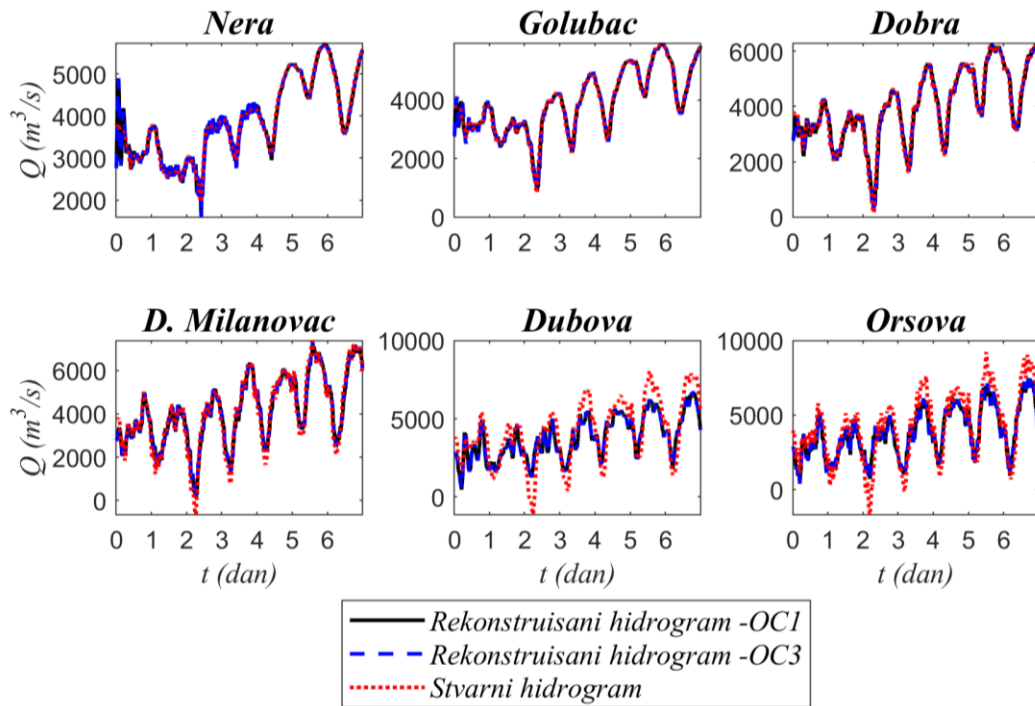
Slika 79. Odstupanja merenih i modeliranih nivoa (greške - errors) na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



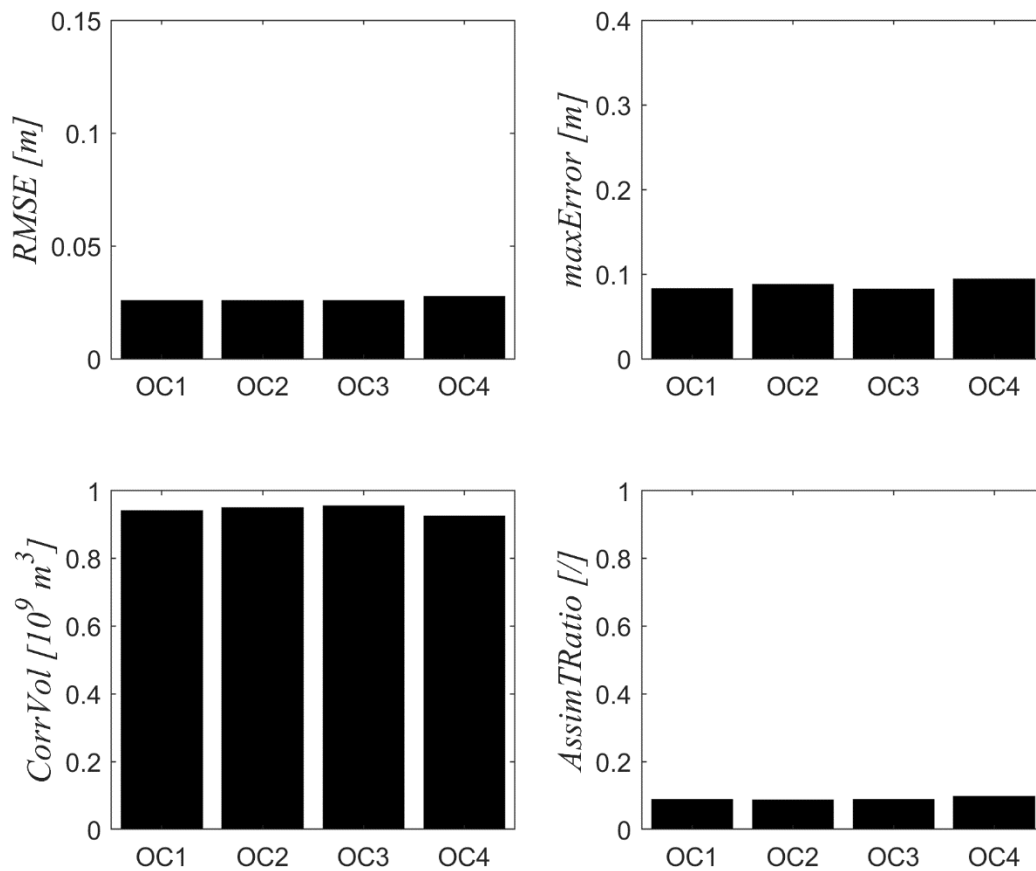
Slika 80. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



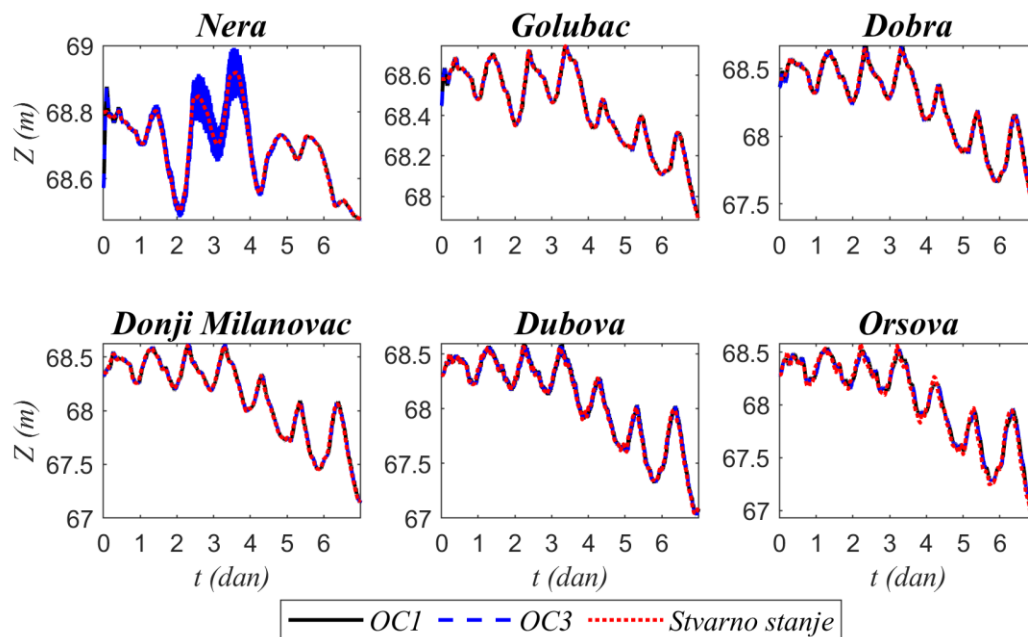
Slika 81. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



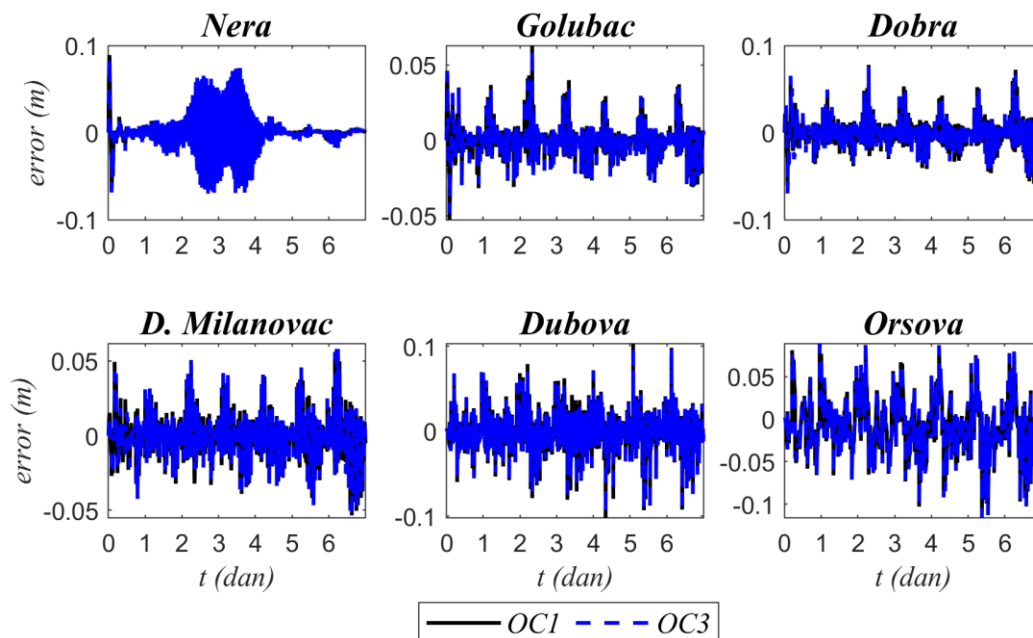
Slika 82. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



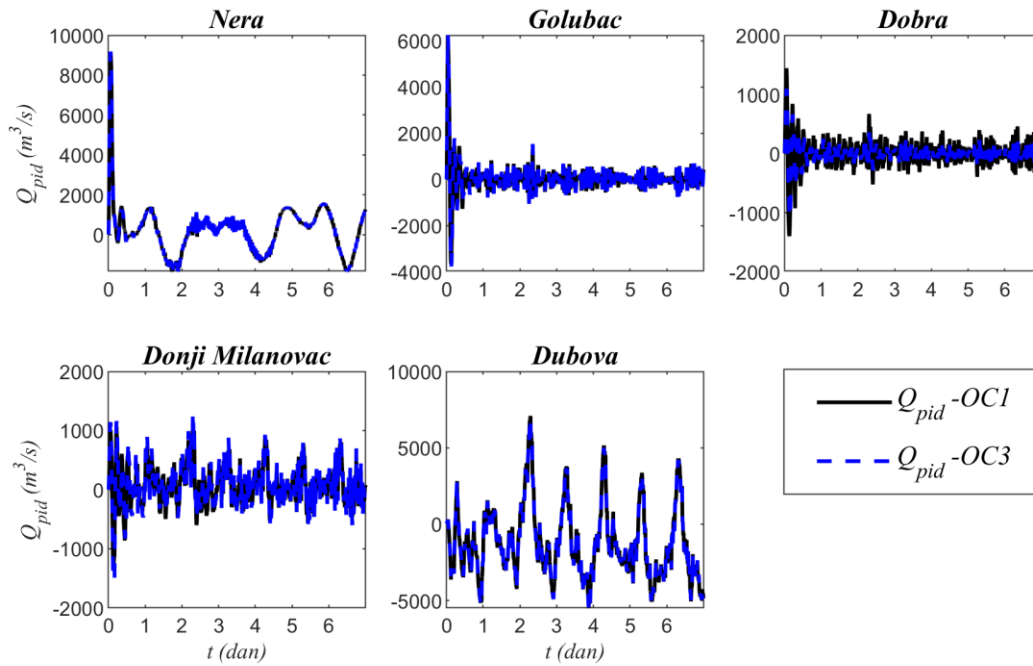
Slika 83. Indikatori performansi asimilacije podataka na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao minimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



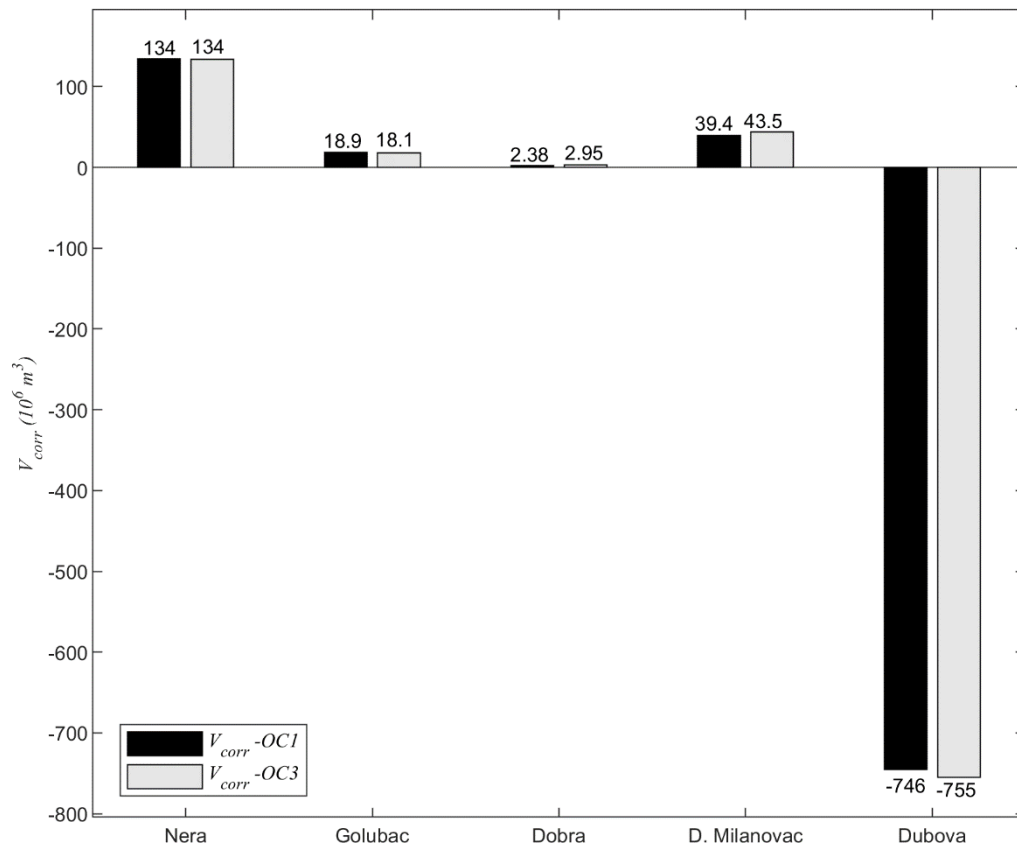
Slika 84. Nivoi na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



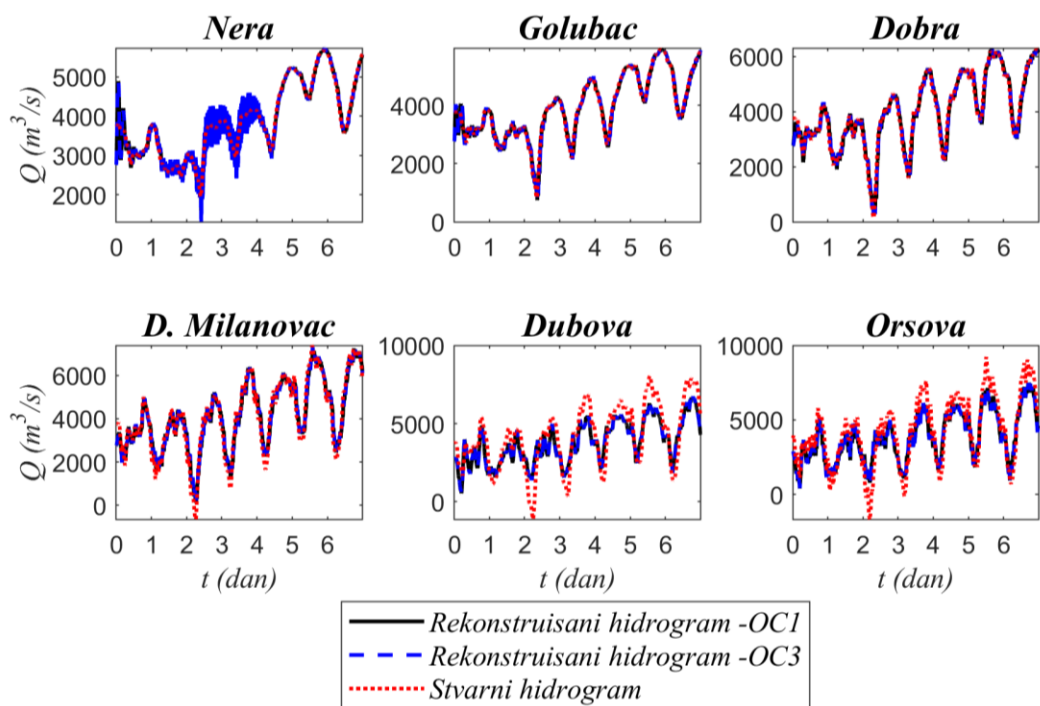
Slika 85. Odstupanja merenih i modeliranih nivoa (greške - errors) na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



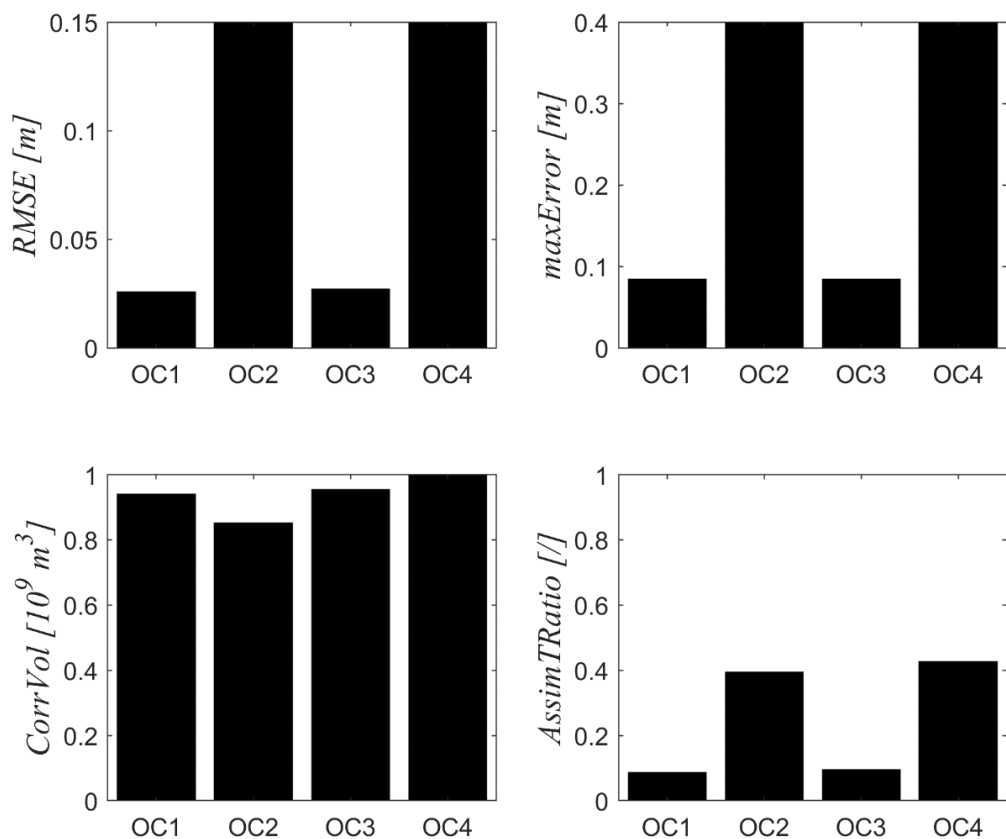
Slika 86. Korektivni dotoci na asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



Slika 87. Korektivne zapremine po asimilacionim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



Slika 88. Rekonstruisani hidrogrami na mernim lokacijama na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario



Slika 89. Indikatori performanis asimilacije podataka na primeru Hidroenergetskog sistema Đerdapa kada su parametri kontrolera dobijeni kao maksimalna vrednost pri korišćenju kombinacija kriterijumskih funkcija OC1 i OC3 – sintetički scenario

Tabela 9. Vrednosti indikatora performansi asimilacije podataka za nekoliko varijanti optimalnih vrednosti parametara kontrolera (kada se za vrednost parametara usvaja minimalna vrednost i veličina populacije 100)

Varijanta (iz kombinacije kriterijumskih funkcija)	Merna stanica	K_p	K_i	RMSE	maxError	AssimTRatio	CorrVol
OC1	Nera	22.71	32.32	0.026	0.083	0.088	0.940
	Golubac	31.80	26.31				
	Dobra	34.67	33.84				
	D. Milanovac	26.63	15.57				
	Dubova	23.03	50.21				
	Oršava	47.31	69.69				
OC2	Nera	31.80	39.49	0.026	0.088	0.085	0.949
	Golubac	34.67	44.96				
	Dobra	26.63	73.69				
	D. Milanovac	23.03	29.7				
	Dubova	47.31	65.27				
	Oršava	34.58	45.00				
OC3	Nera	34.67	44.96	0.026	0.082	0.087	0.953
	Golubac	26.63	73.69				
	Dobra	23.03	29.7				
	D. Milanovac	47.31	65.27				
	Dubova	34.58	45.00				
	Oršava	24.89	85.81				
OC4	Nera	26.63	73.69	0.027	0.094	0.096	0.924
	Golubac	23.03	29.67				
	Dobra	47.31	65.27				
	D. Milanovac	34.58	45.00				
	Dubova	24.89	85.81				
	Oršava	32.10	33.69				

Tabela 10. Vrednosti indikatora performansi asimilacije podataka za nekoliko varijanti optimalnih vrednosti parametara kontrolera (kada se za vrednost parametara usvaja maksimalna vrednost i veličina populacije 100)

Varijanta (iz kombinacije kriterijumskih funkcija)	Merna stanica	K_p	K_i	$RMSE$	$maxError$	$AssimTRatio$	$CorrVol$
OC1	<i>Nera</i>	25.27	24.09	0.026	0.084	0.086	0.941
	<i>Golubac</i>	39.49	35.93				
	<i>Dobra</i>	44.96	40.72				
	<i>D. Milanovac</i>	73.69	53.04				
	<i>Dubova</i>	29.70	26.77				
	<i>Oršava</i>	65.27	53.97				
OC2	<i>Nera</i>	39.49	35.93	0.180	0.58	0.393	0.851
	<i>Golubac</i>	44.96	40.72				
	<i>Dobra</i>	73.69	53.04				
	<i>D. Milanovac</i>	29.70	26.77				
	<i>Dubova</i>	65.27	53.97				
	<i>Oršava</i>	45.00	37.34				
OC3	<i>Nera</i>	44.96	40.72	0.027	0.085	0.095	0.954
	<i>Golubac</i>	73.69	53.04				
	<i>Dobra</i>	29.70	26.77				
	<i>D. Milanovac</i>	65.27	53.97				
	<i>Dubova</i>	45.00	37.34				
	<i>Oršava</i>	85.81	51.66				
OC4	<i>Nera</i>	73.69	53.04	0.233	0.623	0.426	1.733
	<i>Golubac</i>	29.70	26.77				
	<i>Dobra</i>	65.27	53.97				
	<i>D. Milanovac</i>	45.00	37.34				
	<i>Dubova</i>	85.81	51.66				
	<i>Oršava</i>	33.69	32.82				

BIOGRAFIJA AUTORA

Miloš Milašinović rođen je 01.05.1991. godine u Smederevskoj Palanci. Završio je osnovnu školu „Đorđe Jovanović“ u Selevcu 2006. godine i „Palanačku gimnaziju“ u Smederevskoj Palanci 2010. godine kao nosilac Vukove diplome. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu upisao je 2010. godine i završio osnovne akademske studije 2014. godine na odseku za Hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo. Master akademske studije na Građevinskom fakultetu završio je 2015. godine. Doktorske akademske studije na Građevinskom fakultetu upisao je 2015. godine, studijski program Građevinarstvo.

Nakon završetka master studija 2015. zaposlio se u JVP Srbijavode, na mestu inženjera saradnika u oblasti zaštite od voda. 2016. godine zaposlio se kao asistent student doktorskih studija na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu za uže naučne oblasti Mehanika nestišljivih fluida i hidraulika i Ekološko inženjerstvo, na period od 3 godine. 2019. ponovo je izabran za isto radno mesto.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Miloš Milašinović

Broj indeksa 907/15

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

METODOLOGIJA ZA BRZU ASIMILACIJU PODATAKA U MODELIMA OTVORENIH
TOKOVA

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime	Miloš Milašinović
Broj indeksa	907/15
Studijski program	GRAĐEVINARSTVO
Naslov rada	Metodologija za brzu asimilaciju podataka u modelima otvorenih tokova
Mentor	prof. dr Dušan Prodanović

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la radi pohranjivanja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

METODOLOGIJA ZA BRZU ASIMILACIJU PODATAKA U MODELIMA OTVORENIH
TOKOVA

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

Potpis autora

U Beogradu, _____

1. **Autorstvo** - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerade**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo - deliti pod istim uslovima**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.