

UNIVERZITET U BEOGRADU
FIZIČKI FAKULTET

Mirjam P. Vujadinović Mandić

MODELIRANJE HIDROLOŠKOG CIKLUSA
U INTEGRISANOM GEOFIZIČKOM
SISTEMU

doktorska disertacija

Beograd, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF PHYSICS

Mirjam P. Vujadinović Mandić

MODELING OF THE HYDROLOGICAL
CYCLE IN THE INTEGRATED
GEOPHYSICAL SYSTEM

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

Mentor:

vanr. prof. dr Borivoj Rajković, Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Članovi komisije:

vanr. prof. dr Borivoj Rajković, Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu

doc. dr Vladimir Đurđević, Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu

doc. dr Ana Vuković, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane:

2015.

Modeliranje hidrološkog ciklusa u integrisanom geofizičkom sistemu

Rezime

Hidrološki ciklus u integrisanom geofizičkom sistemu ima ulogu da simulira procese vezane za kopnene vode i međusobne interakcije komponenti klimatskog sistema koji opisuju kruženje vode u prirodi. Numerički modeli za prognozu vremena i simulaciju klime obuhvataju najveći deo ovih procesa i razvojem računarskih resursa postaju kompleksniji i prerastaju u modele za simulaciju celog geofizičkog sistema. Hidrološki ciklus u operativnim modelima nije zatvoren zbog nedostatka dinamičkog modela koji simulira kopneni oticaj vode.

U ovom radu je predstavljen numerički model za simulaciju i prognozu površinskog oticaja koji direktno utiče na stanje podloge, što je donji granični uslov za atmosferske procese i prognozu vremena. Model je razvijen u skladu sa modelom za prognozu vremena poslednje generacije, NMMB, koji ima sposobnost da simulira procese od globalnih do lokalnih razmera. Testiranje numeričke ispravnosti nove komponente hidrološkog ciklusa kvalifikovalo ga je za povezivanje sa atmosferskim modelom. Povezani numerički model sa zatvorenim hidrološkim ciklusom otvara mogućnost za poboljšanje kvaliteta prognoza i klimatskih simulacija i uvodi nove prognostičke produkte koji mogu naći upotrebu u sistemima najava i upozorenja na ekstremne vremenske prilike. Upotreba ovakvog modela u operativnoj prognozi demonstrirana je na primeru simulacije majskih poplava 2014. godine u oblasti zapadnog Balkana. Povezani model je uspešno reprodukovao hidrološki ciklus ove vremenske nepogode, tj. intenzivne padavine, njihovo oticanje po površini i akumulaciju, uključujući njegovu interakciju sa podlogom i atmosferom, sve do porasta signala u rečnom toku, u skladu sa osmatranjima.

Ključne reči: hidrološki ciklus, geofizički sistem, numeričko modeliranje

Uža naučna oblast: Dinamička meteorologija

UDK: 551.509.313 (043.3)

Modeling of the hydrological cycle in the integrated geophysical system

Abstract

Hydrological cycle in the integrated geophysical system simulates processes related to inland waters and interactions between the climate system components, that describes water cycle in its natural environment. Numerical models for weather forecast and climate simulations include majority of these processes and, following computer resource development, they are more complex and evolve into models of the integrated geophysical system. Hydrological cycle in operational numerical weather prediction models is not complete because dynamical overland water flow component is missing.

Here is presented numerical model for simulation and forecast of the surface runoff, which has direct impact on land surface conditions and thereby lower boundary condition for atmospheric processes and weather forecast as well. The model is developed following numerical approach in the last generation weather forecast model, NMMB, which has the ability to simulate processes from global to local scales. Tests for numerical stability of the new hydrological cycle component justified its implementation within the atmospheric model. Coupled numerical model with complete water cycle opens new possibilities for quality increase in weather forecast and climate simulation, and introduces new prognostic products, which can be used in extreme weather warning system. Such model performance in operational forecast is demonstrated in case study of May 2014 flood event over west Balkans. Coupled model successfully simulated hydrological cycle in this extreme weather event with high precipitation, intense water surface runoff and accumulation, including its interaction with land surface and atmosphere, and at the end producing high signal in river discharge as observed.

Key words: hydrological cycle, geophysical system, numerical modeling

Field of research: Dynamical meteorology

UDC: 551.509.313 (043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. NUMERIČKO MODELIRANJE HIDROLOŠKOG CIKLUSA	4
2.1 Hidrološki ciklus u atmosferskim modelima	7
2.2 Razvoj hidroloških modela	9
3. POVEZANI MODEL ZA PROGNOZU POVRŠINSKOG OTICAJA	15
3.1 Nehidrostatički atmosferski model NMMB	15
3.2 Model za prognozu površinskog oticaja	18
3.2.1 Osnovne jednačine	18
3.2.2 Diskretizacija jednačina u vremenu	20
3.2.3 Diskretizacija jednačina u prostoru	22
3.2.4 Model rečnog toka	26
3.3 Struktura povezanog modela	27
4. IDEALIZOVANI NUMERIČKI EKSPERIMENTI	30
4.1 Uticaj sile trenja na stabilnost rešenja	30
4.2 Tehnika redistribucije mase	32
4.2 Dinamika modela na realnoj topografiji	36
5. SIMULACIJA POVEZANIM MODELOM	37
5.1 Opis sinoptičke situacije	38
5.2 Numerička simulacija	39
5.3 Analiza rezultata	39
6. ZAKLJUČAK	48
Literatura	49
Prilog 1.	57
Prilog 2.	58
Prilog 3.	59
Biografija autora	60

1. UVOD

Procesi u atmosferi usko su povezani sa svim delovima geofizičkog sistema i ne mogu se proučavati niti prognozirati izvan tog konteksta. Zbog toga je ustaljena praksa tokom niza decenija da se atmosferski modeli povezuju sa drugim numeričkim modelima, kao što su: okeanski, modeli za prognozu morskog leda, za površinske procese u tlu, transport aerosola i drugi. U korak sa razvojem kompjuterskih resursa, došlo je do napretka numeričkog modeliranja u svim geofizičkim disciplinama, što je poslednjih godina dovelo do težnje za stvaranjem takozvanih integrisanih geofizičkih sistema. Ovi modeli imaju za konačni cilj simulaciju geofizičkog sistema kao celine i proučavanje uzročno-posledičnih veza između komponenti tog sistema (Jockel i dr., 2005).

Važnost hidrološkog ciklusa u geofizičkom sistemu počiva na činjenici da se voda prožima kroz sve njegove komponente: isparava sa tla, biljaka i vodenih površina, transportuje se kroz atmosferu, menja agregatna stanja oslobađajući ili vezujući pritom latentnu toplotu, u vidu čvrstih ili tečnih padavina se vraća na zemlju, otiče površinskim oticajem u reke i dalje u okean ili se infiltrira u tlo gde je na raspolaganju za korišćenje biljkama ili formira podzemne tokove.

Numerička reprezentacija komponenti hidrološkog ciklusa tradicionalno je zastupljena u atmosferskim modelima, na manje ili više eksplicitan način. Kretanje vodene pare kroz atmosferu u modelima je predstavljeno difuzijom, horizontalnom advekcijom pasivne supstance i vertikalnim mešanjem, odnosno turbulencijom. Fazni prelazi vode, procesi u oblaku i padavine parametrisani su kroz konvektivnu šemu ili dati eksplicitno kroz mikrofizički paket. Dešavanja sa vodom na tlu, u biljkama i dubini zemljišta predstavljani su šemom za procese u tlu, koja ima veoma veliki značaj u atmosferskim numeričkim modelima, jer zapravo služi za izračunavanje donjeg graničnog uslova za atmosferu. Model za površinske procese obuhvata zadržavanje vode na vegetaciji, infiltraciju vode kroz zemljište, izračunavanje vlažnosti zemljišta, korensku ekstrakciju vode od strane biljaka, snežni pokrivač i topljenje snega, zaleđeno zemljište i procese evapotranspiracije, površinski i podzemni oticaj. Površinski oticaj predstavlja deo vode (od padavina, otopljenog snega i voda ocedena sa biljaka) koji dođe do površine tla, ali se ne infiltrira u zemljište, već ostaje na površini. Podzemni oticaj je voda koja se iscedila kroz poslednji sloj zemljišta u modelu u dublje slojeve pod dejstvom

gravitacionog spiranja, odnosno drenaže. U atmosferskim modelima opisani oticaji se, skoro po pravilu, izračunavaju samo kao dijagnostičke veličine koje u sledećem vremenskom koraku nemaju nikakvog uticaja na nove vrednosti prognostičkih promenljivih iako bi se to, na osnovu poznavanja procesa u prirodi, očekivalo. Zbog toga se može reći da hidrološki ciklus u numeričkim atmosferskim modelima nije potpuno zatvoren, jer nedostaje veoma važna komponenta – prognoza vodenog oticaja.

Uporedo sa razvojem atmosferskih modela, razvijali su se i hidrološki numerički modeli koji se bave upravo modeliranjem površinskog i podzemnog oticaja i rečnih tokova. Danas postoji preko stotinu numeričkih hidroloških modela (Chen, 2004) različite kompleksnosti, od tzv. konceptualnih modela, koji u velikoj meri parametrišu hidrološke procese i delove slivova, do modela koji su zasnovani na zakonima fizike i rešavaju sisteme nelinearnih parcijalnih diferencijalnih jednačina na diskretnoj mreži tačaka. I dok se u razvoju atmosferskih modela teži ka unificiranju problema na različitim vremenskim i prostornim razmerama i stvaranju modela koji mogu da služe i za kratkororčnu prognozu vremena i za klimatske integracije, na prostornim razmerama od globalnih do regionalnih i takozvanih mezo razmera (Janjić i Gall, 2012), hidrološki numerički modeli se mahom konstruišu za određenu veličinu sliva, određenu dužinu integracije, a često i određenu svrhu. Pored svega, iza dinamike atmosfere i kretanja površinskog oticaja stoje isti fizički zakoni, što bi trebalo da je dovoljno za povezivanje ovih procesa u jednu celinu unutar integrisanog geofizičkog sistema. Na taj način, zatvaranjem hidrološkog ciklusa u atmosferskom modelu omogućiće se poboljšanje tretiranja komponenti vodnog bilansa, a naročito vlažnosti zemljišta, odnosno donjeg graničnog uslova modela. U isto vreme, ovo poboljšanje biće od velikog značaja u klimatskim integracijama jer će omogućiti pouzdaniju analizu uticaja klimatskih promena, pre svega u poljoprivredi, hidrologiji i energetici.

U ovom radu opisano je kako su procesi hidrološkog ciklusa predstavljeni u atmosferskim i hidrološkim modelima, prikazan je model za prognozu površinskog oticaja i objašnjen način na koji je povezan sa atmosferskim modelom. Model je testiran u idealizovanim numeričkim eksperimentima, kako bi se utvrdile njegove mogućnosti i ograničenja. Predstavljena je i nova tehnika za redistribuciju mase kojom se rešava problem visokofrekventnog šuma usled jakog i lokalizovanog forsiranja u polju visine.

Nakon toga prikazani su i analizirani rezultati povezanog modela, kojim je simulirana situacija sa ekstremnim padavinama koje su dovele do poplava u oblasti zapadnog Balkana u maju 2014. godine

2. NUMERIČKO MODELIRANJE HIDROLOŠKOG CIKLUSA

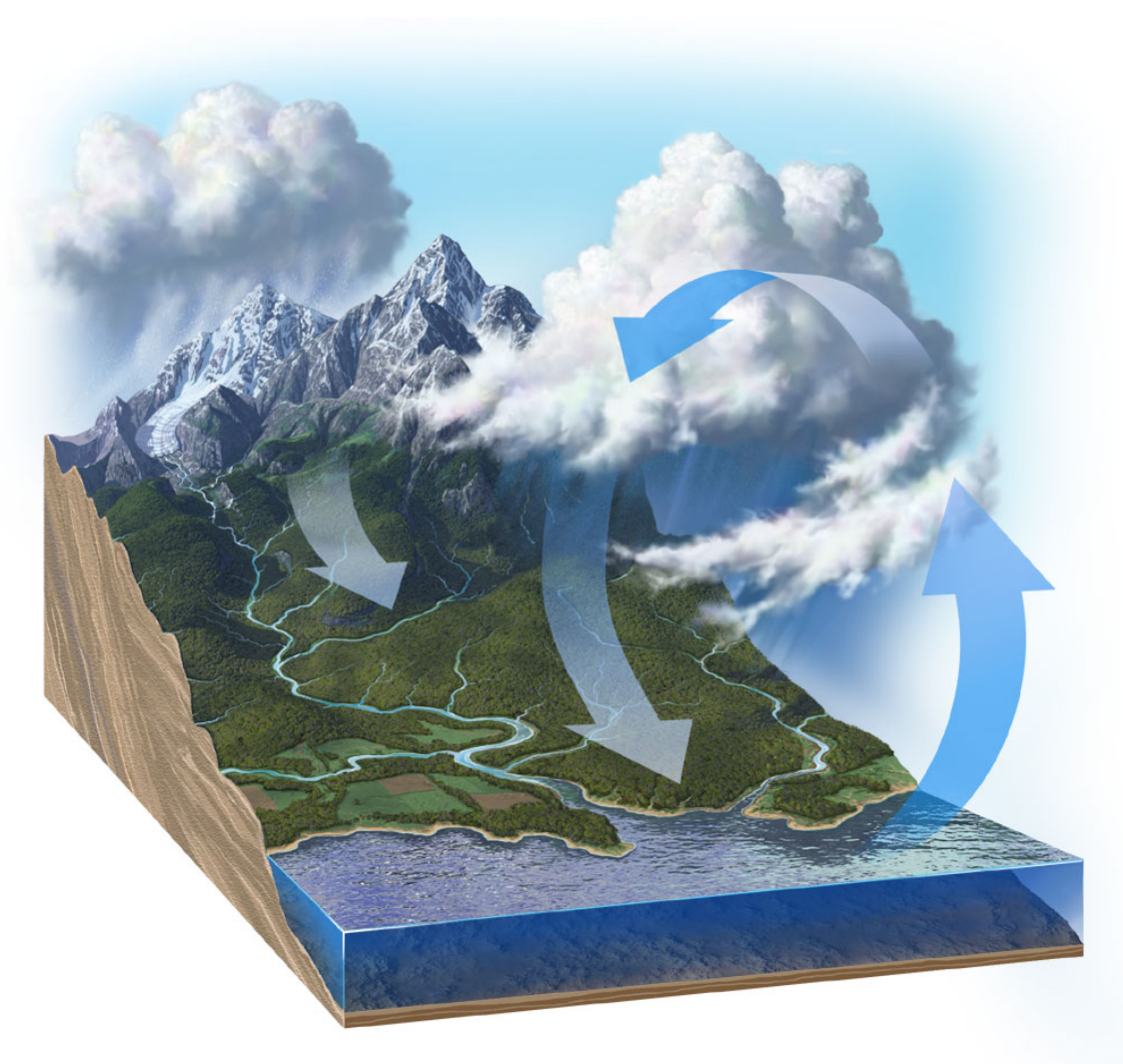
Hidrološki ciklus podrazumeva kretanje vode i promenu njenih agregatnih stanja u prirodi kroz sve delove geofizičkog sistema: atmosferu, hidrosferu, litosferu, kriosferu i biosferu. Kao jedan od biogeochemskih ciklusa na Zemlji, ima važnu ulogu u povezivanju svih delova geofizičkog sistema. Njegove komponente su prikazane na slici 1.

Padavine, u čvrstoj ili tečnoj formi, dospevaju do tla ili površine vode. Čvrste padavine formiraju snežni pokrivač koji može da se menja i pretvara delom u led ili topi. Pre nego što stigne do tla, deo padavina može da se zadrži na vegetaciji, odakle deo vode može da ispari nazad u atmosferu, a deo da iskapa niz biljku do zemlje. Koliki deo padavina će se zadržati na biljnom pokrivaču zavisi pre svega od tipa vegetacije i njene gustine.

Padavine koje stignu do zemlje i otopljeni sneg i/ili led mogu se delom zadržati u orografskim depresijama, mogu se infiltrirati u zemljište ili oteći preko površine tla u rečne tokove i dalje do okeana, mora ili jezera. Brzina infiltracije i količina vode koju upije zemljište zavise od uslova na samoj površini tla, fizičkih i hemijskih osobina zemljišta i njegove vlažnosti. Tip zemljišta zavisi od sadržaja gline, ilovače i peska i njihovog odnosa i definiše njegovu poroznost, provodljivost i difuzivnost. Poroznost zemljišta zavisi od količine i raspodele veličine pora, što je uglavnom određeno sadržajem organske materije (Bras, 1990), ali i postojanjem makropora, odnosno većih pukotina i kanala koje prave insekti, životinje i korenski sistem biljaka. Tokom kratkotrajnih jakih kiša najveći deo vode koji se infiltrira u zemljište se brzo slije kroz makropore u dublje slojeve i samo mala količina se apsorbuje u prvim slojevima. Obrnuto, u slučaju dugotrajnih padavina slabijeg intenziteta, najviše vode se zadrži u prvom sloju zemljišta koje se potom širi i sužava makropore, a samim tim smanjuje oticaj u dublje slojeve.

Voda u zemljištu može postojati u sva tri agregatna stanja. Ako je tlo dovoljno ohlađeno deo vode se može zamrznuti, smanjujući na taj način njegovu propustljivost. Ipak, u zemljištu se može kretati jedino voda u tečnom obliku. Deo tečne vode u zemljištu, takozvani matrički potencijal, vezan je molekularnim silama u kapilarama zemljišta

(Clapp i Hronenberger, 1978). Sa povećanjem količine vode u zemljištu, gravitaciona sila postaje dovoljno velika da može da nadvlada kapilarne veze. Najveća količina vode koju zemljište može da sadrži bez gravitacionog slivanja naziva se poljski vodni kapacitet (Vuković, 2009) i višak vode u odnosu na ovaj parametar se sliva kroz zemljište u dublje slojeve, sve dok ne dospe do sloja slabe propustljivosti, gde prestaje vertikalno kretanje i nastaje podzemni tok. Kada su sve pore zasićene vodom, tok vode kroz zemljište se može opisati Darsijevim zakonom kao gradijent zbira matričkog i gravitacionog potencijala (Stensrud, 2007).



Slika 1. Komponente hidrološkog ciklusa

Biljke u procesu korenske ekstrakcije mogu da potroše značajnu količinu vode iz zemljišta i da njen najveći deo transpiracijom vrata u atmosferu. Ovaj proces zavisi od bioloških faktora kao što su: tip i faza razvoja biljaka, struktura korenskog sistema i

lišća, veličina lišća i gustina i ponašanje stoma. Korenskom ekstrakcijom se, u određenoj meri, može izvući i voda koja se nalazi u kapilarama zemljišta. Vlažnost zemljišta ispod koje biljka ne može da crpi vodu kroz koren naziva se tačka uvenuća i ona je konstantna za određeni tip zemljišta.

Voda sa površine mora, okeana, jezera, reka, iz zemljišta i sa vegetacije može da isparava nazad u atmosferu. Brzina isparavanja sa vodene površine zavisi od razlike pritiska zasićenja vodenom parom na temperaturi vode i pritiska vodene pare u vazduhu neposredno iznad vodene površine. Brzina isparavanja sa tla određena je još i količinom vode na površini sa koje može da ispari i brzinom njenog kretanja iz dubljih slojeva zemljišta na površinu, u slučaju suvog tla. Takođe, na površini tla može doći i do kondenzacije vode, što je manje bitan proces od do sada nabrojanih. Prema Kuchment (2004) veća važnost može mu se pripisati u nekim planinskim oblastima (kondenzacija od magle u šumama) i veoma sušnim predelima (kondenzacija koja se javlja tokom noći, usled naglog pada temperature vazduha).

Voda koja se nije infiltrirala u tlo, već je ostala na njegovoj površini čini površinski oticaj. On se kreće niz topografiju i sakuplja u rečnu mrežu, kojom se dalje odnosi do jezera ili okeana. Deo vode koji se infiltrirao u tlo može da se kreće horizontalno, kroz zemljište, ali iznad nivoa podzemnog oticaja, i naziva se potpovršinski oticaj. Deo potpovršinskog oticaja može brzo da se vrati u rečnu mrežu, dok ostatku treba mnogo više vremena (Anderson i Brut, 1985). Podzemni oticaj čini voda koja prođe kroz zemljište sve do vodonepropusnog sloja i postane deo podzemnih voda.

Horton (1933) je objasnio da površinski oticaj nastaje kada je količina vode od padavina i/ili topljenja snega i leda veća od infiltracije vode u zemljište. Na početku epizode padavina, sva kiša koja dospe do površine tla se može infiltrirati u zemljište. Međutim, u toku vremena sadržaj vlage u zemljištu se povećava, pa se brzina infiltracije smanjuje. U trenutku kada brzina infiltracije postane manja od brzine padavina, na površini zemljišta se formira tanak sloj vode koji zatim otiče niz topografiju ka kanalima i rekama. Ovakav površinski oticaj se naziva zasićenim i obično nastaje nakon dugotrajnih padavina u oblastima gde je vodonepropusni sloj relativno plitak, kao što su doline, rečne doline i močvare (Beven, 2004). Nasuprot tome, potpovršinski tok može

nastati u nezasićenom zemljištu iznad sloja male propustljivosti, u trenutno zasićenom sloju zemljišta ili kroz makropore i pukotine između slojeva tla.

2.1 Hidrološki ciklus u atmosferskim modelima

Najveći broj opisanih komponenti hidrološkog ciklusa većinom zavisi od lokalnih karakteristika zemljišta, biljnog pokrivača i orografije ili drugih procesa malih prostornih razmera (turbulencija, konvekcija, mikrofizika oblaka). Kako je korak mreže atmosferskih modela veći od prostornih razmera na kojima se dešavaju ovi procesi, oni su u numeričkim modelima za prognozu vremena i klime predstavljeni takozvanim parametrizacijama (Stensurd, 2007). Sa druge strane, komponente hidrološkog ciklusa većih prostornih razmera, kao što je horizontalna advekcija vlage, uključeni su u dinamičke jednačine modela.

Model za površinske procese predstavlja važan deo atmosferskih numeričkih modela, jer izračunava donji granični uslov, tačnije flukseve osetne i latentne toplote. Ispravnost donjeg graničnog uslova utiče na kvalitet prognoze površinskog bilansa zračenja, procesa u površinskom grančnom sloju, a samim tim i na intenzitet vlažne konvekcije (Viterbo, 2002). Današnji modeli obično razlažu zemljište na četiri vertikalna nivoa. Ovi nivoi su definisani na različitim dubinama koje se razlikuju od modela do modela, ali je uobičajeno da se poslednji nivo definiše na dubini od oko 2 ili 2.5 m. Modeli integrale prognostičke jednačine za temperaturu i vlažnost tla, količinu istopljenog snega i količinu vode koja se zadržava na biljkama (Vuković, 2009).

Temperatura površine tla se računa iz energetskog bilansa flukseva na površini, i to: dolaznog kratkotalsnog Sunčevog zračenja, dolaznog dugotalasnog zračenja atmosfere, odlaznog dugotalasnog zračenja površine tla i flukseva osetne i latentne toplote (Janjić, 1993b). Temperature dubljih slojeva tla se računaju po Furijeovom zakonu difuzije, sa dodatkom člana koji predstavlja uticaj latentne toplote koja se oslobađa ili troši pri faznim promenama vode u tlu (Janjić, 1993b).

Volumetrijski sadržaj vode u svakom sloju zemljišta se računa pomoću razlike flukseva vode kroz granice posmatranog sloja i člana korenske ekstrakcije koji pokazuje koliko vode iz tla iskoristi biljka. Za rešavanje ove prognostičke jednačine neophodni su donji i

gornji granični uslov. Gornji granični uslov je zadat jednačinom za jednakost flukseva vode, i to: isparavanje sa površine golog tla, vodene površine i intercepcionog rezervoara (voda koja se zadrži na biljnom pokrivaču), fluks vode iz padavina koje dospeju do površine tla, fluks vode od otopljenog snega i površinski oticaj vode. Za donji granični uslov pretpostavlja se da je jedini fluks u dublje slojeve tla gravitaciono slivanje vode.

Procesi kao što su evpotranspiracija, korenska ekstrakcija i intercepcija (zadržavanje padavina na biljkama) predstavljeni su empirijskim zakonima (npr. Zeng, 2001) koji se oslanjaju na parametre koji zavise od tipa vegetacije. Druga vrsta parametara koji zavise od morfoloških, fizičkih i hemijskih osobina zemljišta, koristi se za izračunavanje veličina kao što su koeficijent provodljivosti (Peters-Lidard i dr., 1998), poljski vodni kapacitet (Chen i dr., 1996), vlažnost uvenuća i u jednačinama za hidrauličku provodljivost nezasićenog zemljišta i difuzivnost vlage (Kuchment, 2004). Vrednosti ovih parametara su konstantne za svaki tip vegetacije, odnosno tip zemljišta i u modele su uključeni kroz takozvane “look-up” tabele.

Površinski, potpovršinski i oticaj u podzemne vode se uglavnom računaju kao dijagnostičke veličine čija vrednost ni na koji način ne utiče na vlažnost zemljišta u sledećem vremenskom koraku (Ek i dr., 2003; Vuković, 2009). Površinski oticaj se određuje kao razlika vode koja od padavina i otopljenog snega i leda dospe do površine tla i dela vode koji se infiltrira u zemljište, a potpovršinski kao višak vode u odnosu na maksimalno mogući sadržaj vlage u posmatranom sloju zemljišta.

Fluks vodene pare sa podloge ulazi u model za turbulenciju koji je vertikalno meša, kako kroz površinski granični sloj tako i kroz slobodnu atmosferu. Konvektivna šema tretira plitku i duboku konvekciju i izračunava količinu padavina, dok se padavine i oblaci velikih razmera izračunavaju na osnovu sadržaja vlage u vazduhu. Padavine, na kraju, ponovo ulaze u šemu za procese na tlu.

Opisani fizički procesi u modelu transformišu vodu samo u jednoj, vertikalnoj, dimenziji, dok se horizontalna advekcija i difuzija vlage izračunavaju kroz dinamički modul modela.

Tokom poslednjih nekoliko godina postojeći modeli za procese na površini se dorađuju upravo u smeru preciznijeg izračunavanja površinskog, potpovršinskog i podzemnog oticaja. Tako je nova verzija NOAH modela, NOAH-MP povezana sa šemom za podzemni oticaj baziranom na TOPMODEL-u (Niu i dr., 2005), a TESSEL model unapređen u HTESSEL povezivanjem sa VIC modelom površinskog oticaja (Balsamo, 2009).

2.2 Razvoj hidroloških modela

Razvoj hidroloških modela započeo je u drugoj polovini 19. veka iz težnje da se što bolje razume veza između padavina i oticaja na rečnom slivu, a kako bi se rešili praktični problemi kao što su odbrana od poplava, projektovanje kanalizacionih i sistema za navodnjavanje i slično.

Jedan od najranijih modela je takozvana racionalna formula (Mulaney, 1851) pomoću koje se na osnovu količine padavina i veličine sliva može odrediti maksimalni protok. Glavni nedostatak ovog metoda bilo je ograničenje njegove primene na veoma male slivove. Početkom 20. veka hidrolozi su nastojali da generalizuju racionalni metod kako bi bio primenljiv i na velikim slivovima sa heterogenim karakteristikama i prostorno neuniformnim padavinama. Kao rezultat istraživanja nastao je metod jediničnog hidrografa (Sherman, 1932). To je prvi model kojim je bilo moguće odrediti čitav hidrogram (grafik zavisnosti protoka od vremena), a ne samo njegovu maksimalnu vrednost. Zbog svoje jednostavnosti i praktičnosti ovaj metod je dugo bio dominantan, a i danas je u širokoj upotrebi. Ovi i slični modeli koji su se kasnije razvijali zasnovani su isključivo na statističkim, empirijskim, vezama između padavina i oticaja na izlaznom profilu sliva. Oni ne uzimaju direktno u obzir fizičke procese koji uzrokuju vezu između padavina i oticaja, pa se često nazivaju i modeli crne kutije. Moderne verzije empirijskih modela oslanjaju se između ostalog i na regresione analize (Young, 2002) i veštačke neuralne mreže (ASCE, 2000). Obično funkcionišu dobro u okviru opsega osmotrenih vrednosti, dok izvan toga njihova uspešnost zavisi od primenjenih matematičkih metoda.

U korak sa unapređivanjem kompjuterskih resursa tokom 50-ih i 60-ih godina 20. veka, započeo je i razvoj numeričkih hidroloških modela nastankom tzv. konceptualnih modela. Oni se sastoje od jednog ili više međusobno povezanih rezervoara, tzv. konceptualnih elemenata, koji veoma uprošćeno predstavljaju pojedinačne procese hidrološkog sistema kao što su: topljenje snega, vlažnost tla, evapotranspiracija, površinski i potpovršinski oticaj i slično. Funkcije koje opisuju vodni bilans svakog rezervoara su kontrolisane nizom parametara. Oni najčešće nisu direktno povezani sa fizičkim karakteristikama sliva, pa se moraju oceniti kroz proces kalibracije modela (Reed i dr., 2004). Kalibracija najčešće podrazumeva poređenje osmotrenih i modeliranih protoka tokom dužeg niza godina na izabranom slivu. U početku se vršila manuelno, putem pokušaja i grešaka, a kasnije su razvijene automatizovane procedure za optimizaciju parametara (Dawdy i O'Donnel, 1965). Zbog neophodnosti kalibracije, ove modele je moguće koristiti jedino na slivovima na kojima postoje osmatranja za duži niz godina. Prema načinu prostorne diskretizacije, konceptualni modeli se mogu podeliti u tri kategorije: homogeni, delimično distribuirani i distribuirani (Chow i dr., 1988).

Homogeni konceptualni modeli tretiraju sliv reke kao celinu (Jones, 1997). Njihovi parametri ne zavise direktno od fizičkih karakteristika sliva (npr. vegetacija, tip tla, orografija), niti prenose prostornu varijabilnost tih karakteristika. Osim toga, pretpostavlja se i uniformnost padavina, pa zato ovi modeli nisu pogodni za simulaciju bujičnih poplava i situacija u kojima intenzivna količina padavina zahvata samo jedan deo posmatranog sliva. Najčešće se koriste za kontrolu kvaliteta izmerenih oticaja, popunjavanje prekinutih nizova osmatranja, prognozu oticaja u realnom vremenu, procenu i upravljanje vodnim resursima i pravljenje simulacija u građevinske i druge svrhe (Blackie i Eeles, 1985). Prvi ovakvi modeli bili su Stanford Watershed Model (SWM, Linsley i Crawford, 1960) i Stream flow Synthesis and Reservoir Regulation Model (SSARR, Rockwood, 1958; Anderson, 1967), a zatim su usledili i mnogi drugi, među kojima i TANK (Sugawara, 1979) i Hydrologic Modeling System (HEC-HMS, USACE, 1998).

Delimično distribuirani modeli uzimaju donekle u obzir heterogenost sliva, tako što ga dele na podslivove na osnovu orografije (drenažne mreže). Ideja ovih modela je da se

na svakom podslivu uspostavi po jedan homogeni model, sa svim svojim konceptualnim elementima, kojim se izračunava oticaj na kraju podsliva. Izračunati oticaj iz uzvodnih predstavlja ulaz u nizvodne podslivove i na taj način se voda sprovodi do izlaznog profila sliva (Biftu i Gan, 2001). Unutar svakog podsliva parametri modela su konstantni, ali se razlikuju od jednog do drugog podsliva, što značajno povećava ukupan broj parametara i u mnogome otežava proces kalibracije. Veliki broj konceptualnih modela koji su napravljeni kao homogeni kasnije su unapređeni u delimično distribuirane. Neki od primera su Sacramento Soil Moisture Accounting model (SAC-SMA, Burnash i dr., 1995), Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV, Bergstorm, 1995), i Topography Based Hydrological Model (TOPMODEL, Beven i dr., 1995) među mnogim drugim.

Distribuirani konceptualni modeli su diskretizovani na veći broj zona koje imaju slične karakteristike. Diskretizacija se može izvršiti na osnovu izbora reprezentativnih jediničnih površina (Representative Elementary Area, REA) sa homogenim karakteristikama zemljišta i orografije (Wood i dr., 1988), hidroloških jedinica (Hydrology Response Units, HRU) koje imaju isti hidrološki odgovor na padavine, ili grupisanih hidroloških jedinica (Grouped Response Units, GRU) koje se sastoje od više hidroloških jedinica sa istim tipom vegetacije, zemljišta i površinskog pokrivača (Kouwen i dr., 1993). Svi procesi (konceptualni elementi) sadržani u modelu se posebno računaju u svakoj jedinici, a izračunati oticaj se prenosi iz jedne u drugu jedinicu kako bi se kao krajnji rezultat dobio oticaj na izlaznom profilu sliva. Za svaku jedinicu u modelu kroz proces kalibracije treba odrediti zaseban set parametara, što zahteva veliku količinu podataka o fizičkim karakteristikama sliva, a samim tim predstavlja i poteškoću u korišćenju ovih modela (Loague i Freeze, 1985). Najveća prednost distribuiranih u odnosu na homogene konceptualne modele je prostorna heterogenost kako ulaznih, tako i izlaznih podataka. To čini ove modele pogodnim za korišćenje pri analizi uticaja promene tipa vegetacije i površinskog pokrivača, kao i za simulaciju transporta sedimenta i zagađujućih materija u slivu (Beven i O'Connell, 1982). Neki od distribuiranih konceptualnih modela koji se često koriste su: WATFLOOD (Kouwen i dr., 1993), Soil and Water Assessment Tool (SWAT, Arnold i dr., 1998) i Agricultural Policy/Environmental Extender (APEX, Williams i dr., 2008).

Najkompleksniji su deterministički hidrološki modeli zasnovani na fizičkim zakonima. Friz i Harlan (1969) su prvi skicirali model vodnog bilansa koji je bio opisan fizičkim zakonima. Međutim, njihova ideja je bila uspešno realizovana tek 20 godina kasnije, zahvaljujući razvoju kompjuterskih resursa, najpre kroz Systeme Hydrologique Europeen (SHE, Abbott i dr., 1986a,b), a zatim i mnoge druge modele. Neki od najčešće korišćenih determinističkih modela danas su IHDM (Beven i dr., 1987), TOPKAPI (Ciarapica i Todini, 2002), a pre svega savremena verzija SHE modela, tzv. MIKE-SHE (DHI, 1993 i DHI, 2000).

Fizički procesi u ovim hidrološkim modelima opisani su uglavnom nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednačinama čije rešavanje zahteva prostornu i vremensku diskretizaciju, kao i primenu različitih numeričkih metoda, kao što su metod konačnih razlika (Freeze, 1971) i metod konačnih elemenata (Beven, 1977; Ross i dr., 1979) između ostalih. Površinski oticaj vode se obično opisuje dvodimenzionim ili jednodimenzionim sistemom jednačina za plitku vodu (Saint-Venant, 1871), kretanje vode kroz nezasićen sloj zemljišta Ričardsonovim jednačinama (Richards, 1931), a kretanje vode kroz zasićen sloj zemljišta pomoću Businesskovih jednačina (Boussinesq, 1871). Zbog kompleksnosti ovih sistema jednačina načešće se u modele uvode različite aproksimacije koje olakšavaju račun. Jedno od veoma čestih pojednostavljenja koje je gotovo neizostavno u postojećim modelima ovog tipa je tzv. kinematička aproksimacija kojom se pretpostavlja stabilan uniforman tok vode (Whitham, 1974).

Parametri u ovim modelima se uglavnom mogu izmeriti ili vezati za neku drugu karakteristiku sliva koja se meri (Willems, 2000). Zbog toga je za formulisanje početnih i graničnih uslova neophodan veliki broj različitih vrsta podataka, pa je tačnost modela često limitirana nedovoljnom rezolucijom i kvalitetom osmatranja padavina, vlažnosti i ostalih karakteristika zemljišta i vegetacije. Ovi problemi, kao i potrebno duže računsko vreme, doveli su do toga da se u operativnoj prognozi protoka više koriste jednostavniji, konceptualni modeli, dok su modeli zasnovani na fizičkim procesima svoju upotrebu našli u simuliranju događaja manjih prostornih i vremenskih razmera, kao što su bujične poplave (Hapaurachchi i Wang, 2008).

Poslednjih par decenija došlo je do povećanja rezolucije i raspoloživosti satelitskih i radarskih podataka različitih parametara (padavine, vlažnost na površini tla, vegetacija,

tip tla, itd.) što je omogućilo lakšu i precizniju kalibraciju modela (Mulligan, 2004) i njihovu širu upotrebu čak i na slivovima koji nisu dovoljno pokriveni osmatranjima (Hapaurachchi i Wang, 2008). Međutim, i dalje postoje veličine koje se ne mogu izmeriti satelitima (npr. profil zemljišta), pa se dostupnost takvih podataka još uvek oslanja na merenja na terenu koja često nisu dovoljna za adekvatno definisanje parametara u modelima (Mulligan, 2004).

U poslednjih 60-ak godina, razvijeno je veoma mnogo različitih numeričkih hidroloških modela čiji broj lako prevazilazi stotinu (Chen, 2004). Međutim, i pored već tako velikog dijapazona postojećih modela, u današnje vreme se razvijaju novi, što znači da postojeći modeli ne odgovaraju u potpunosti svim potrebama. Kroz pregledne radove o principima i izazovima u numeričkom modeliranju hidroloških procesa najčešće se kao zajednički problemi provlače pravilan izbor prostorne rezolucije, vremenskog koraka, broja parametara, njihove kalibracije, neodređenosti rezultata usled grešaka merenja, numeričkih metoda i neodređenosti parametara.

U poslednjih 20-ak godina akcenat u ovoj oblasti je stavljen na razvijanje grafičkih korisničkih interfejsa (GUI), uglavnom kompatibilnih sa Windows operativnim sistemom, kao i njihova integracija sa geoinformacionim tehnologijama, naročito geografskim informacionim sistemom (GIS), sistemom za globalno pozicioniranje (GPS) i satelitskim i radarskim osmatranjima (Huber, 1995). Uvođenje GIS-a u hidrološko modeliranje omogućilo je korišćenje velikog broja podataka na većim rezolucijama (orografija, tip zemljišta, vegetacija, vlažnost zemljišta i slično) koji uglavnom do tada nisu bili dostupni, a samim tim i detaljniji prostorni prikaz karakteristika sliva. Znatno je olakšan pristup podacima, transformacije i baratanje velikim fajlovima, kao i grafički prikaz i analiza rezultata (Chen, 2004).

Modeli su obično formulisani ili za kratkoročne (npr. bujične poplave) ili za dugoročne prognoze (Borah i Bera, 2003). Kratkoročne prognoze su potrebne za dizajn i planiranje urbanih i atmosferskih voda, dok su dugoročne neophodne za upravljanje vodnim resursima i klimatske projekcije. Modeli predviđeni za kratkoročne integracije obično imaju kraće vremenske korake (nekoliko minuta ili sati), dok kod ostalih dužina jednog koraka može da dosegne i mesec dana (Borah i Bera, 2003). Takođe, dužina vremenskog koraka može da zavisi i od veličine samog basena i da se kreće od 5-15

minuta, u urbanim ili planinskim slivovima veličine do 1000 km², do 3 sata za veoma velike slivove do preko 20000 km² (Taschner, 2003).

Među korisnicima hidroloških modela postoje predrasude da su modeli sa distribuiranim parametrima komplikovani za upotrebu zbog velike količine potrebnih ulaznih podataka i dužeg računskog vremena (Paniconi i dr., 1999). Uglavnom se smatra da dodatne informacije koje se dobijaju ovim modelima ne opravdavaju uložene kapacitete i zbog toga je i danas upotreba homogenih i jednostavnijih konceptualnih modela češća, naročito za operativne prognoze, dok se modeli zasnovani na fizičkim procesima uglavnom koriste u naučno-istraživačke svrhe.

3. POVEZANI MODEL ZA PROGNOZU POVRŠINSKOG OTICAJA

3.1 Nehidrostatski atmosferski model NMMB

Nehidrostatski model NMMB, Non-hydrostatic Multiscale Model on the B grid (Janjić, 2005, 2009; Janjić i Black, 2007; Janjić i dr., 2001; Janjić i Gall, 2012), je atmosferski numerički model razvijen u NCEP-u (National Centers for Environmental Predictions) u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD), kao deo NOAA NEMS okvira (National Oceanic and Atmospheric Administration Environmental Modeling System). NMMB pripada drugoj generaciji regionalnih nehidrostatskih modela razvijenih u NCEP-u i nasljednik je WRF–NMM modela (Weather Research and Forecasting framework Nonhydrostatic Mesoscale Model, Janjić i dr., 2001; Janjić, 2003) koji se od 2006. godine koristi kao glavni numerički model za kratkoročnu regionalnu prognozu vremena u SAD. Za razliku od svog prethodnika, NMMB je specifičan po tome što se može koristiti kao globalni ili regionalni model na širokom spektru prostornih i vremenskih razmera, od simulacija velikih vrtloga, preko operativne prognoze vremena do klimatskih integracija (Janjić i Gall, 2012). Od 2010. godine se operativno koristi za kratkoročne prognoze u NCEP-u (Perez i dr., 2011).

NMMB je definisan na horizontalnoj polurazmaknutoj B mreži po Arakvinoj notaciji (Arakawa i Lamb, 1977). Horizontalni koordinatni sistem je definisan duž latituda i longituda za globalne integracije, dok je za regionalne transformisan tako da se centar domena nalazi na preseku ekvatora i graniča, kako bi se postigla veća uniformnost mreže. Vertikalna koordinata je hibridna p-sigma (Sangster, 1960), koja iznad visine od oko 300 mb prelazi u hidrostatsku p-koordinatu (Janjić i Gall, 2012).

Dinamički deo modela obuhvata brze talase, advekciju, termodinamičke procese, bočnu difuziju, horizontalnu divergenciju i transport pasivnih supstanci. U njemu se, prateći ranije postavljene principe (Janjić, 1977, 1979, 1984, 2003; Janjić i dr., 2001, 2011), održavaju masa, energija, enstrofija i mnoge druge važne osobine operatora pri horizontalnom diferenciranju. Za vremensko diferenciranje horizontalne advekcije i Koriolisovih članova koristi se Adams-Bashforth šema, za vertikalnu advekciju Crank-Nicholson šema, šema unapred-unazad za horizontalno proširivanje brzih talasa, a za njihovo vertikalno proširivanje implicitna šema (Janjić i Gall, 2012).

Nehidrostatički deo modela se nalazi u posebnom modulu koji računa korekciju hidrostatičkog sistema jednačina usled vertikalnog ubrzanja. On se može uključiti ili isključiti prema potrebi, u zavisnosti od izbora horizontalne rezolucije. Testovi su pokazali da uticaj nehidrostatike postaje vidljiv na rezolucijama od oko 8 km, a značajan na rezolucijama od oko 1 km (Janjić i dr., 2001; Janjić, 2003, 2004). Povećanje računskog vremena usled uključivanja nehidrostatičkog modula za globalne integracije je reda veličine 10 % (Janjić i Gall, 2012).

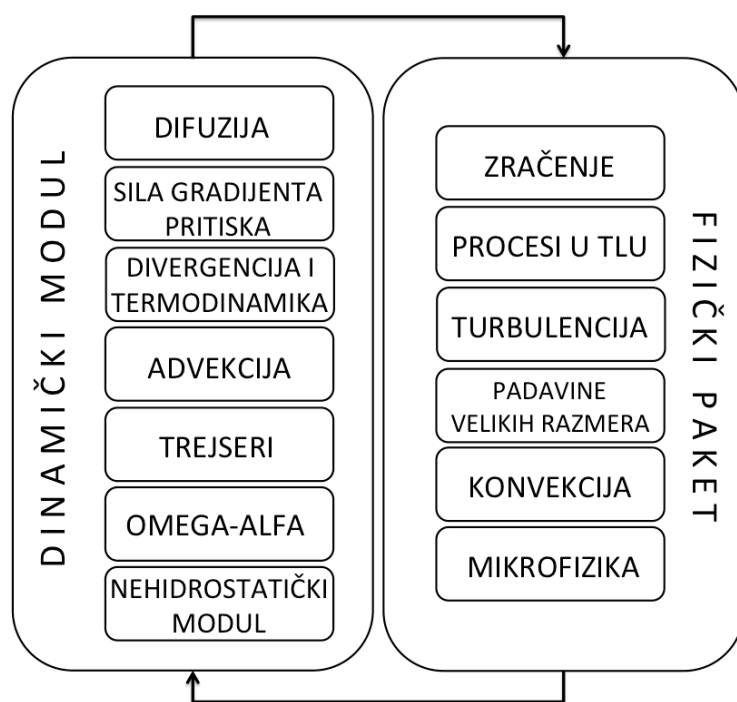
Fizički procesi u modelu se parametrišu standardnim fizičkim paketima, a obuhvataju sledeće:

- . zračenje: izbor između GFDL (Lacis i Hansen, 1974; Fels i Schwarzkopf, 1975) i RRTM (Mlawer i dr., 1997) šema za dugotalasno i kratkotalasno zračenje
- . površinski procesi: izbor između NCEP NOAA (Ek i dr., 2003) i LISS (Vuković, 2009; Vuković i dr., 2010)
- . Monin-Obuhov teorija sličnosti (Monin i Obukhov, 1954) za površinski sloj sa viskoznim podslojem iznad zemlje i vode (Zilitinkijevich, 1965)
- . trubulencija: Mellor-Yamada-Janjić turbulentno zatvaranje nivoa 2.5 (Mellor i Yamada, 1974, 1982; Janjić, 1990, 1994)
- . konvekcija: Betts-Miller-Janjić šema za konvekciju (Betts, 1986; Betts i Miller, 1986; Janjić, 1994, 2000)
- . mikrofizika: Ferrier mikrofizički paket (Ferrier i dr., 2002)

Vremenski korak za računanje fizičkih procesa je obično 4 puta duži od koraka za dinamiku modela. Pojednostavljeni algoritam NMMB-a prikazan je na slici 2.

Početni i granični uslovi za regionalne integracije se mogu koristiti iz različitih izvora, najčešće iz analize vremena ili rezultata bilo kog globalnog modela. Osim toga, postoji i opcija simultanog ugnježdavanja pod-domena većih rezolucija koji se mogu pomerati u toku integracije, što se obično koristi za simulaciju tropskih ciklona. Gornji granični uslov podrazumeva vrh atmosfere na konstantnom pritisku (10 mb), vertikalna komponenta brzine na vrhu je nula, a nehidrostatički pritisak je jednak hidrostatičkom. Donji granični uslov takođe zahteva da je vertikalna brzina na tlu nula, verikalni izvod

nehidrostatičke promene pritiska je nula, dok su fizički granični uslovi zadati u korišćenim fizičkim paketima.



Slika 2. Pojednostavljeni algoritam NMMB modela

Tokom poslednjih nekoliko godina, NMMB model se koristi u Republičkom hidrometeorološkom zavodu Srbije (RHMZ), kako u operativne, tako i u istraživačke svrhe. Od 1. januara 2011. godine ustanovljena je operativna globalna srednjeročna prognoza vremena do 10 dana unapred, koja se pušta jednom dnevno (Djurdjević i dr., 2013). Kvazi-operativna prognoza regionalnom verzijom NMMB-a je započela tokom 2012. godine i još uvek je u fazi testiranja. U okviru Virtuelnog centra za klimatske promene u jugoistočnoj Evropi (South East European Virtual Climate Change Center, SEEVCC) koji je ustanovljen unutar RHMZ-a, NMMB postaje jezgro oko koga se gradi Integrisani geofizički sistem (Earth Modeling System, EMS). Regionalna verzija modela koristi se za klimatske integracije (Djurdjević i Kržić, 2014) i studije uticaja klimatskih promena na različite grane privrede (između ostalih Ruml i dr., 2012; Vujadinović i dr., 2012; Stričev i dr, 2014; Vuković i dr., 2014; Stojičić i dr., 2013; Ivković i dr., 2013) i sezonsku prognozu (prognoza za 6 meseci unapred). Osim toga, u toku je povezivanje NMMB-a sa modelom za transport pustinjskog aerosola DREAM (Vuković, 2014), modelom dinamičke vegetacije i okeanskim modelom. Formulisanjem

dinamičkog hidrološkog modela za površinski oticaj koji je tema ove disertacije i njegovim povezivanjem sa NMMB-om pokriva se još jedna važna komponenta klimatskog sistema, što upotpunjuje integrisani geofizički sistem.

3.2 Model za prognozu površinskog oticaja

3.2.1 Osnovne jednačine

Model za prognozu površinskog oticaja zasnovan je na sistemu jednačina za plitku vodu (Saint-Venant, 1871) i prati ideje izložene u radu Ničković i dr. (2010). Sistem jednačina za plitku vodu standardno se izvodi iz Navije-Stoksove jednačine kretanja fluida pod hidrostatičkom aproksimacijom, tj. pretpostavkom da je horizontalna dimenzija posmatranog fluida mnogo veća od vertikalne. Osim pretpostavke da je voda na površini tla u hidrostatičkoj ravnoteži, u slučaju kretanja površinskog sloja vode može se zanemariti član viskoznog trenja i na posmatranim razmerama član Koriolisove sile (Ničković i dr., 2010). Sistem jednačina za plitku vodu pod ovim pretpostavkama se može napisati kao:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left[\frac{\partial h}{\partial x} + S_{fx} + \frac{\partial h_0}{\partial x} \right] &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left[\frac{\partial h}{\partial y} + S_{fy} + \frac{\partial h_0}{\partial y} \right] &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + \dot{H} &= 0,\end{aligned}\tag{1}$$

gde je:

h – visina vode na površini tla (m),

u – komponenta brzine kretanja vode duž x -ose (m/s),

v – komponenta brzine kretanja vode duž y -ose (m/s),

g – ubrzanje usled Zemljine gravitacije (m/s^2),

S_{fx} – komponenta sile trenja duž x -ose (m/s^2),

S_{fy} – komponenta sile trenja duž y -ose (m/s^2),

h_0 – nadmorska visina (m) i

$\dot{H}$ – izvor ili ponor visine vode (m).

Prve dve jednačine u sistemu (1) su jednačine za održanje momenta kretanja u x , odnosno y pravcu, dok treća predstavlja zakon održanja mase, odnosno jednačinu kontinuiteta. U ovom sistemu postoje tri prognostičke veličine, i to: brzina kretanja vode u x i y pravcu (u i v) i visina sloja vode (h).

U jednačinama kretanja prvi član predstavlja promenu odgovarajuće komponente brzine u toku vremena, a drugi i treći član njihovu advekciju u x i y pravcu, redom. Sledeća tri člana, grupisana u zagradi, predstavljaju redom silu gradijenta pritiska usled razlike u visini sloja vode, silu trenja i silu gradijenta pritiska usled nagiba topografije. Članovi trenja, S_{fx} i S_{fy} se obično predstavljaju pomoću Maningove empirijske formule (Chanson, 2004):

$$\begin{aligned} S_{fx} &= \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} u \\ S_{fy} &= \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} v, \end{aligned} \quad (2)$$

gde je n Maningov koeficijent, koji zavisi od tipa tla i vegetacije (Chanson, 2004).

Analogno sa prve dve jednačine sistema (1), prvi član u jednačini kontinuiteta tog sistema predstavlja promenu visine vode u toku vremena, a sledeća dva člana advekciju visine. Članovi advekcije visine iz jednačine kontinuiteta zajedno sa članovima sile gradijenta pritiska zbog razlike u visini fluida se jednim imenom nazivaju članovima geostrofskog podešavanja. Poslednji član u jednačini je izvor, odnosno ponor vode. Naime, voda od padavina ili topljenja snega koja se ne infiltrira u tlo ostaje na površini i u modelu predstavlja izvor za visinu vode. Slično, infiltracija u tlo i oticanje vode u tačke rečne mreže predstavljaju ponore za visinu vode u tačkama modela (Ničković i dr., 2010).

U većini hidroloških modela u sistem jednačina (1) uvodi se takozvana kinematička aproksimacija kojom se pretpostavlja unifrmni tok fluida, a brzine u i v se mogu izraziti dijagnostički (Chanson, 2004). Dakle, u slučaju korišćenja kinematičke aproksimacije

toka fluida, koja je vrlo često zastupljena u hidrološkim modelima, jednačine kretanja se svode na ravnotežu sila trenja i nagiba terena, a komponente brzine u i v postaju dijagnostičke veličine, što donosi znajčajno pojednostavljenje procesa i smanjenje tačnosti.

3.2.2 Diskretizacija jednačina u vremenu

Za vremensku diskretizaciju sistema jednačina (1) korišćene su tri vrste šema, u glavnom po analogiji sa atmosferskim modelom (Janjić i dr., 2010; Janjić i Gall, 2012).

Članovi advekcije brzine diferencirani su u vremenu pomoću modifikovane Adams-Bašfortove šeme (Janjić, 1993a). Po definiciji, Adams-Bašfortovom šemom se računa buduća vrednost promenljive uz pomoć vrednosti iz sadašnjeg i prošlog vremenskog koraka kojima se dodeljuju težinski faktori $3/2$ i $1/2$, respektivno. Vremensko diferenciranje jednačine

$$\frac{dA}{dt} = f(A, t)$$

pomoću Adams-Bašfortove šeme bi imalo sledeći oblik:

$$\frac{A^{n+1} - A^n}{\Delta t} = \frac{3}{2}f(A^n) - \frac{1}{2}f(A^{n-1}),$$

gde je A prognostička promenljiva, Δt dužina vremenskog koraka, a f funkcija koja zavisi od vremena i vrednosti A . Indeks n označava vrednost promenljive A u sadašnjem vremenskom koraku, $n-1$ njenu vrednost u prošlom koraku, a $n+1$ prognozirano, odnosno vrednost A u sledećem vremenskom koraku (Janjić, 1993a). Pokazano je da ova šema uzrokuje blagu linearnu nestabilnost (Janjić, 1993a), što se lako prevazilazi neznatnom decentralizacijom težinskih faktora sa desne strane jednačine (Janjić i dr., 2010; Janjić i Gall, 2012). Primenom ove izmene, modifikovana Adams-Bašfortova šema dobija sledeći izgled:

$$\frac{A^{n+1} - A^n}{\Delta t} = 1.533 \cdot f(A^n) - 0.533 \cdot f(A^{n-1}).$$

Uobičajeni način za vremensku diskretizaciju članova geostrofskog podešavanja kroz više generacija atmosferskih modela je korišćenje šeme unapred-unazad (Ames, 1969;

Gadd, 1974; Janjić, 1979; Mesinger, 1977; Janjić i dr., 2010; Janjić i Gall, 2012, između ostalih). Ako se iz polaznog sistema jednačina (1) izdvoje samo članovi geostrofskog podešavanja i prognostički članovi, dobija se sledeći sistem:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -g \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -g \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= - \left[\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} \right].\end{aligned}\tag{3}$$

Primenom šeme unapred-unazad na sistem (3), najpre se unapred integrišu jednačina kontinuiteta i to korišćenjem vrednosti iz koraka n za vrednosti brzine i visine vode. Zatim se prognozirana vrednost za h koristi u integraciji unazad za jednačine kretanja:

$$\begin{aligned}\frac{h^{n+1} - h^n}{\Delta t} &= - \left[\frac{\partial(hu)^n}{\partial x} + \frac{\partial(hv)^n}{\partial y} \right] \\ \frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} &= -g \frac{\partial h^{n+1}}{\partial x} \\ \frac{v^{n+1} - v^n}{\Delta t} &= -g \frac{\partial h^{n+1}}{\partial y}.\end{aligned}$$

Članovi trenja iz jednačina kretanja se u hidrodinamičkim i okeanskim modelima obično vremenski razlažu pomoću implicitnih ili polu-implicitnih šema kako bi se izbegla numerička nestabilnost (Umgiesser i dr., 2004; Caleffi i dr., 2003; Casulli, 2008, između ostalih). Ako se u jednačinama kretanja polaznog sistema jednačina (1) izdvoje prognostički i članovi trenja i zamene izrazi (2) dobija se sistem:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} u \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} v.\end{aligned}\tag{4}$$

Primenom implicitne vremenske šeme na sistem (4) dobija se:

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = -B^n u^{n+1}\tag{5}$$

$$\frac{v^{n+1} - v^n}{\Delta t} = -B^n v^{n+1},$$

pri čemu je uvedena smena:

$$B = g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}.$$

Rešavanjem sistema (5) za vrednosti promenljivih na vremenskom nivou $n+1$ dobija se:

$$u^{n+1} = \frac{u^n}{1 + \Delta t B^n}$$

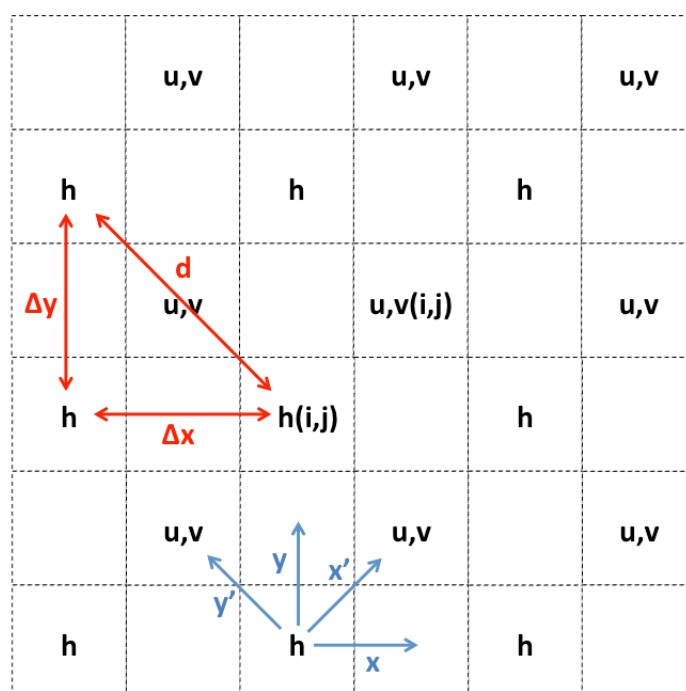
$$v^{n+1} = \frac{v^n}{1 + \Delta t B^n}.$$

Kada dužina vremenskog koraka Δt teži nuli, vrednosti komponenti brzina u koraku $n+1$ teže svojim vrednostima u koraku n . Pored toga, kada dubina vode teži nuli, vrednost B raste ka beskonačnosti, a samim tim i vrednosti brzina teže nuli, kao što bi se i očekivalo u prirodi. Iz ovoga se može zaključiti valjanost ovakvog izbora šeme, kao fizički opravdane, numerički stabilne i konvergentne (Ničković i dr., 2010).

3.2.3 Diskretizacija jednačina u prostoru

Izbor horizontalne mreže računskih tačaka je veoma važan problem u numeričkom modeliranju geofizičkih fluida, a naročito procesa u kojima su dominantne horizontalne razmere kretanja (Ničković i dr., 2011). Najčešće su u upotrebi praovugaone horizontalne mreže, a ređe se sreću još i heksagonalne (Ničković i dr., 2002 i Torsvik i dr., 2005) i trougaone (Lynch i Gray, 1979). Za razlaganje parametara modela na pravougaanim horizontalnim mrežama koristi se jedna od pet uobičajenih mogućnosti, odnosno jedna od mreža A, B, C, D i E po Arakavinoj notaciji (Arakawa i Lamb, 1977).

Kroz praksu i dugačku istoriju numeričkog modeliranja atmosfere i okeana se pokazalo da su neke od nabrojanih mreža pogodnije za predstavljanje određenih procesa od drugih. Tako se danas najčešće koriste B, C i E mreža, iako svaka od njih ima određene numeričke nedostatke koji se moraju prevazići, a uglavnom proizilaze iz potrebe za osrednjavanjem promenljivih pri prostornom diferenciranju jednačina (Janjić, 2003).



Slika 3. Raspored tačaka u kojima su definisane visina (h) i komponente brzine (u, v) na Arakavinoj B mreži. Plavom bojom označene su koordinatne ose, a crvenom odgovarajuća rastojanja između susednih h tačaka.

Za horizontalnu mrežu u hidrološkom modelu za prognozu površinskog oticaja odabrana je B mreža, po analogiji sa odabirom atmosferskog modela koji je definisan na istoj mreži. Ovakav izbor mreže zahteva rešavanje određenih numeričkih problema, kao što je pojava visokofrekventnog šuma koji se može javiti u slučaju jakog spoljašnjeg forsiranja u polju mase (Ničković i dr., 2011). Način prevazilaženja ovog problema biće detaljnije prikazan u narednom poglavlju, u okviru jednog od eksperimenata.

Arakavina B mreža je jedna od polurazmaknutih mreža, jer je visina fluida definisana u jednom, a komponente brzine u drugim tačkama. Susedne h -tačke su na međusobnom rastojanju Δx u x pravcu, odnosno na rastojanju Δy , u y pravcu. Osim x i y pravca za prostornu diskretizaciju potrebno je definisati i kose pravce, x' i y' u kojima je rastojanje između susednih tačaka označeno sa d . Raspored h i v tačaka, rastojanja između njih, i ose prikazani su na slici 3.

Pri prostornoj diskretizaciji jednačina, osim flukseva i njihovog diferenciranja po uobičajenim, x i y pravcima, analogno sa diskretizacijom jednačina u NMMB modelu,

uvedeni su i fluksevi i diferenciranje po kosim, x' i y' , pravcima. U atmosferskom modelu članovi u kosim pravcima su uvedeni kako bi se postigla prostorna izotrponost rešenja (Janjić i dr., 2010; Janjić i Gall, 2012), dok su u ovom slučaju oni neophodni, pre svega u članovima nagiba terena i sile gradijenta pritiska u jednačinama kretanja, jer omogućavaju slivanje vode niz topografiju u svim mrežom definisanim pravcima. Kosi članovi u jednačine ulaze sa težinskim faktorom od 1/3, dok regularni članovi po x i y pravcu imaju težinski faktor od 2/3.

Diskretizacija članova nagiba terena i sile gradijenta pritiska u jednačinama kretanja se može raspisati na sledeći način:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{1}{\bar{h}^{xy}} \left[\frac{2}{3} \cdot \left(\overline{\bar{h}^x g \delta_x h}^y + \overline{\bar{h}^x g \delta_x h_0}^y \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \cdot \left(\bar{h}^{x'} g \delta_{x'} h + \bar{h}^{x'} g \delta_{x'} h_0 - \bar{h}^{y'} g \delta_{y'} h - \bar{h}^{y'} g \delta_{y'} h_0 \right) \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{1}{\bar{h}^{xy}} \left[\frac{2}{3} \cdot \left(\overline{\bar{h}^y g \delta_y h}^x + \overline{\bar{h}^y g \delta_y h_0}^x \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \cdot \left(\bar{h}^{x'} g \delta_{x'} h + \bar{h}^{x'} g \delta_{x'} h_0 + \bar{h}^{y'} g \delta_{y'} h + \bar{h}^{y'} g \delta_{y'} h_0 \right) \right],\end{aligned}$$

gde δ označava diferenciranje, a nadvučena linija osrednjavanje po naznačenom pravcu.

Ovi operatori su definisani sledećim izrazima:

$$\begin{aligned}\delta_x A_{(i,j)} &= \frac{A_{(i,j)} - A_{(i-1,j)}}{\Delta x} & \bar{A}^x &= \frac{A_{(i,j)} + A_{(i-1,j)}}{2} \\ \delta_y A_{(i,j)} &= \frac{A_{(i,j)} - A_{(i,j-1)}}{\Delta y} & \bar{A}^y &= \frac{A_{(i,j)} + A_{(i,j-1)}}{2} \\ \delta_{x'} A_{(i,j)} &= \frac{A_{(i,j)} - A_{(i-1,j-1)}}{d} & \bar{A}^{x'} &= \frac{A_{(i,j)} + A_{(i-1,j-1)}}{2} \\ \delta_{y'} A_{(i,j)} &= \frac{A_{(i-1,j)} - A_{(i,j-1)}}{d} & \bar{A}^{y'} &= \frac{A_{(i-1,j)} + A_{(i,j-1)}}{2}\end{aligned}$$

Prateći izvođenje šeme za advekciju brzine na E (Janjić, 1984, Janjić i dr., 2010) i B mreži (Janjić i Gall, 2012), i kombinujući flukseve u sva četiri definisana pravca, članovi advekcije u jednačinama brzine se mogu razložiti na četiri dela:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\bar{h}^{xy}} \left\{ \left(\bar{h}^{x'} \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{x'} + \left(\bar{h}^{y'} \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{y'} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \left[\left(\bar{h}^{x'} \frac{\partial v}{\partial t} \right)_{x'} - \left(\bar{h}^{y'} \frac{\partial v}{\partial t} \right)_{y'} \right] \right\}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\bar{h}^{xy}} \left\{ \left(\bar{h}^{x'} \frac{\partial v}{\partial t} \right)_{x'} + \left(\bar{h}^{y'} \frac{\partial v}{\partial t} \right)_{y'} + \frac{\Delta y}{\Delta x} \left[\left(\bar{h}^{x'} \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{x'} - \left(\bar{h}^{y'} \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{y'} \right] \right\}.$$

Članovi u prethodna dva izraza su definisani na sledeći način:

$$\begin{aligned} \left(\bar{h}^{x'} \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{x'} &= - \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left(\overline{\bar{h}^x \bar{u}^y \Delta y}^{x'} \delta_x u + \overline{\bar{h}^y \bar{v}^x \Delta x}^{y'} \delta_y u \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2 \Delta x \Delta y} \left(\overline{\bar{h}^{x'} (u \Delta y + v \Delta x)}^{x'} \delta_{x'} u + \overline{\bar{h}^{y'} (-u \Delta y + v \Delta x)}^{y'} \delta_{y'} u \right) \right] \\ \left(\bar{h}^{y'} \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{y'} &= - \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left(\overline{\bar{h}^x \bar{u}^y \Delta y}^{y'} \delta_x u + \overline{\bar{h}^y \bar{v}^x \Delta x}^{y'} \delta_y u \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2 \Delta x \Delta y} \left(\overline{\bar{h}^{x'} (u \Delta y + v \Delta x)}^{y'} \delta_{x'} u + \overline{\bar{h}^{y'} (-u \Delta y + v \Delta x)}^{y'} \delta_{y'} u \right) \right] \\ \left(\bar{h}^{x'} \frac{\partial v}{\partial t} \right)_{x'} &= - \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left(\overline{\bar{h}^x \bar{u}^y \Delta y}^{x'} \delta_x v + \overline{\bar{h}^y \bar{v}^x \Delta x}^{y'} \delta_y v \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2 \Delta x \Delta y} \left(\overline{\bar{h}^{x'} (u \Delta y + v \Delta x)}^{x'} \delta_{x'} v + \overline{\bar{h}^{y'} (-u \Delta y + v \Delta x)}^{y'} \delta_{y'} v \right) \right] \\ \left(\bar{h}^{y'} \frac{\partial v}{\partial t} \right)_{y'} &= - \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left(\overline{\bar{h}^x \bar{u}^y \Delta y}^{y'} \delta_x v + \overline{\bar{h}^y \bar{v}^x \Delta x}^{y'} \delta_y v \right) + \right. \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2\Delta x \Delta y} \left(\overline{\overline{h}^{x'} (u\Delta y + v\Delta x)}^{y'} \delta_{x',v} + \overline{\overline{h}^{y'} (-u\Delta y + v\Delta x)}^{x'} \delta_{y',v} \right) \Bigg].$$

Ovde je prikazana samo finalan oblik, dok se detaljno izvođenje diskretizacije članova advekcije kretanja može naći u Janjić i Gall, 2012.

Prostorna diskretizacija članova trenja u jednačini kretanja se svodi na osrednjavanje visine koja ulazi u taj član:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{\overline{h}^{xy^{4/3}}} u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{\overline{h}^{xy^{4/3}}} v.$$

Diskretizacija jednačine kontinuiteta podrazumeva definisanje flukseva u sva četiri definisana pravca i može se napisati na sledeći način:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} = & \frac{2}{3} \left[\left(\overline{\overline{h}^x \overline{u}^y \Delta y} \right) \delta_x h + \left(\overline{\overline{h}^y \overline{v}^x \Delta x} \right) \delta_y h \right] + \\ & + \frac{1}{3} \left[\left(\overline{\overline{h}^{x'} (u\Delta y + v\Delta x)}^{x'} \right) \delta_{x',h} + \left(\overline{\overline{h}^{y'} (-u\Delta y + v\Delta x)}^{y'} \right) \delta_{y',h} \right]. \end{aligned}$$

3.2.4 Model rečnog toka

Tok vode kroz rečnu mrežu predstavljen je jednačinama koje su zapravo jedndimenzionalna verzija jednačina za površinski oticaj. One su jednako formulisane i diferencirane u vremenu i prostoru kao kod dovdimenzionalnog modela. Jednačine kretanja i kontinuiteta u ovom slučaju se mogu napisati na sledeći način:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + g \left[\frac{\partial h}{\partial s} + S_{fs} + \frac{\partial h_0}{\partial s} \right] &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial s} &= \dot{H}, \end{aligned}$$

gde su sve slovne oznake iste kao i u dvodimenzionalnom modelu, a s označava pravac toka reke.

Tačke rečne mreže su definisane na osnovu podatka o akumulaciji iz baze HYDROSHEDS (Lehner i dr., 2006), kao tačke u dvodimenzionalnoj mreži modela u kojima je akumulacija veća od neke zadate vrednosti. Odabirom te vrednosti određuje se željena gustina rečne mreže. Rečne tačke se zatim povezuju na osnovu podatka o nagibu topografije, iz iste baze, u svih osam definisanih pravaca, pri čemu se vodi računa o tačkama ušća i pravilnom redosledu delova rečne mreže.

Osim padavina, izvorom vode u tačkama rečne mreže smatra se i površinski oticaj iz dvodimeznionalnog dela modela u tim tačkama. U isto vreme, rečne tačke predstavljaju ponor vode za dvodimenzionalni deo modela. Dvodimenzionalni i jednodimenzionalni modul u modelu komuniciraju, odnosno voda iz dvodimenzionalnog modula odlazi u tačke rečne mreže, u svakom vremenskom koraku.

3.3 Struktura povezanog modela

Model za prognozu površinskog oticaja je povezan sa NMMB atmosferskim modelom. Njegovo pozivanje se vrši unutar petlje za izračunavanje turbulencije, nakon pozivanja šeme za procese u tlu. Stoga je vremenski korak modela za prognozu površinskog oticaja jednak koraku fizike u NMMB-u, odnosno 4 puta duži od dinamičkog koraka NMMB-a. Horizontalna mreža tačaka je ista kao i mreža NMMB-a, model je u potpunosti paralelizovan i prati raspodelu procesora koja je definisana u glavnom drajveru NMMB-a. Kako bi se to postiglo, u pointersko polje NMMB-a, takozvani `init_state`, uvedene su sledeće promenljive:

HHY – visina vode površinskog oticaja (m)

UHY – x komponenta brzine površinskog oticaja (m/s)

VHY – y komponenta brzine površinskog oticaja (m/s)

HPHY – visina vode površinskog oticaja iz prošlog vremenskog koraka (m)

DIVHY – divergencija u jednačini kontinuiteta (m/s)

TCUHY – tendencija x-komponente brzine površinskog oticaja (m/s^2)

TCVHY – tendencija y- komponente brzine površinskog oticaja (m/s^2)

HTHY – visina topografije (m)

Sve nabrojane promenljive su deklarisanе kao dvodimenzionalni realni nizovi.

Model za prognozu površinskog oticaja je podeljen u 6 potprograma koji su, prateći strukturu NMMB-a, objedinjeni u zajedničkom modulu – module_HYDRO_SURF.F90.

HYNEWH: od šeme za procese u tlu dobija informaciju o izračunatom površinskom oticaju u tekućem vremenskom koraku i dodeljuje tu vrednost polju visine vode, HHY.

HYADV: iz polja brzine i visine iz prethodnog koraka, flukseva vode iz prethodnog koraka, kao i novog polja visine izračunava članove advekcije brzine.

HYPGFORCE: iz polja visine vode i topografije izračunava članove sile gradijenta pritiska u jednačinama kretanja, kao i korekciju divergencije za jednačinu kontinuiteta.

HYUPDATEUV: izračunava član sile trenja i konačno polje brzina UHY i VHY u tekućem vremenskom koraku.

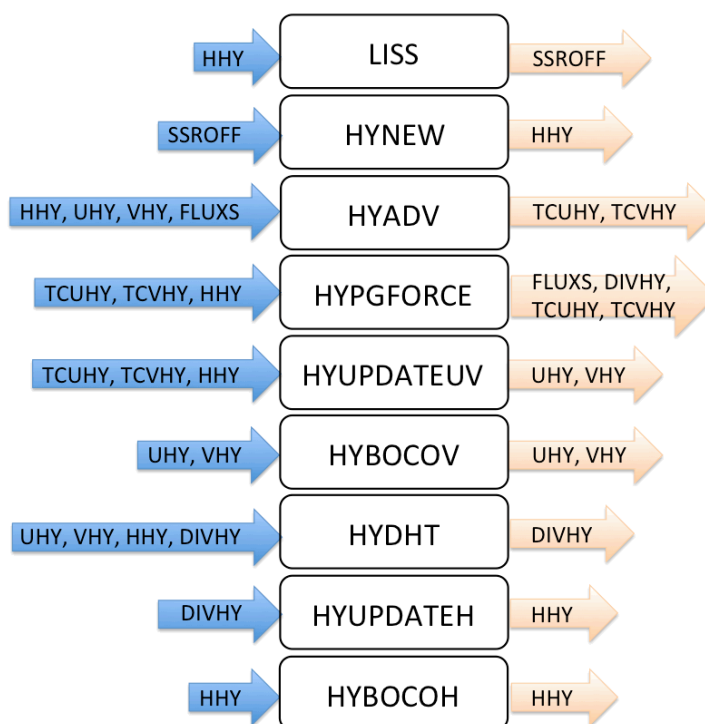
HYBOCOUV: granični uslov za komponente brzine.

HYDHT: računa divergenciju u jednačini kontinuiteta i flukseve vode.

HYUPDATEH: izračunava polje visine vode HHY, koje se u sledećem vremenskom koraku predaje šemi za procese u tlu.

HYBOCOH: granični uslov za visinu vode.

LISS: visina vode izračunata u prethodnom vremenskom koraku modela površinskog oticaja se dodaje količini vode na tlu, u šta spadaju padavine koje su dospele do tla, otopljeni sneg, voda koja se kondenzovala na tlu i voda koja je iskapala sa biljaka na tlo. Nakon toga se računa infiltracija vode u prvi sloj zemljišta i novi površinski oticaj, koji se zatim ponovo predaje HYNEWH.



Slika 4. Algoritam povezanog modela za prognozu površinskog oticaja.

Potprogrami se pozivaju u glavnom modulu za rešavanje jednačina – module_SOLVER_INIT_FINALIZE.F90. Algoritam modela i način povezivanja sa atmosferskim delom prikazan je na slici 4.

4. IDEALIZOVANI NUMERIČKI EKSPERIMENTI

Tri jednostavna, veštačka, eksperimenata sprovedena su sa jednodimenzionalnom i dvodimenzionalnom verzijom modela, kako bi se utvrdile mogućnosti i ograničenja modela, eventualni numerički problemi i, uopšte, testiralo ponašanje jednačina u različitim, potencijalno problematičnim situacijama. Na ovaj način može se zadati problem u kome se testira određeni član (ili više njih) u jednačinama i može se utvrditi njegov doprinos tačnosti i stabilnosti rešenja, kao i eventualno ograničenje.

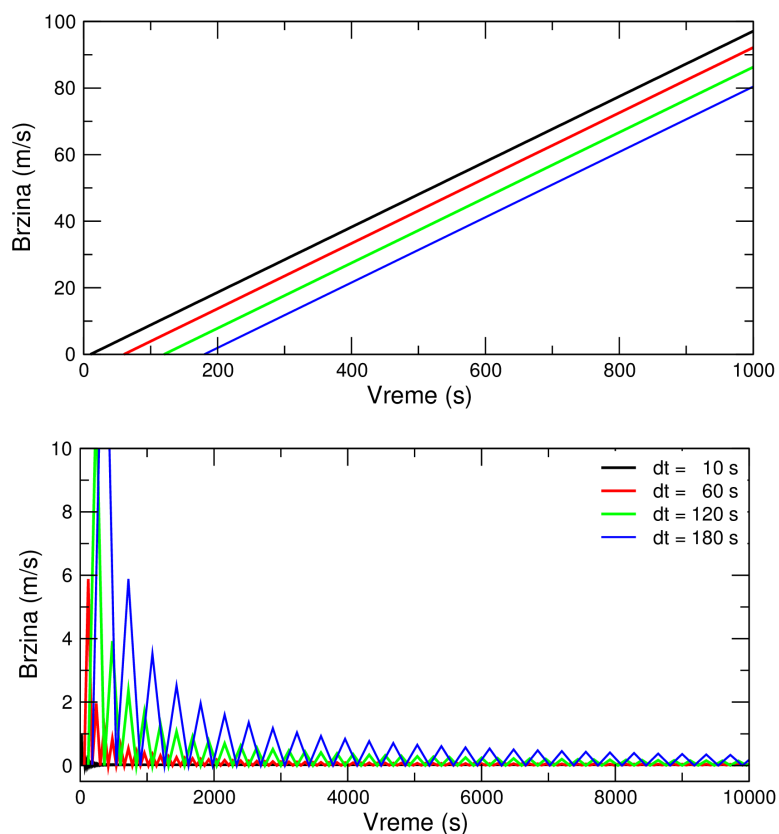
Najjednostavniji eksperiment sa jednodimenzionalnim modelom je postavljen kao ciklični tok vode konstante visine niz strmu ravan. Uz njegovu pomoć posmatra se uticaj člana trenja u jednačini kretanja, jer je poznato da on negativno utiče na stabilnost rešenja (Burguete i dr., 2007). Drugi eksperiment je urađen sa dvodimenzionalnim modelom, u kome na sredini domena postoji kontinualni izvor vode. Ovakav eksperiment je pogodan za pokazivanje problema razdvajanja rešenja gravitaciono-inercijalnih talasa koje se javlja na B i E Arakavinim mrežama (Mesinger, 1973; Janjić i Mesinger, 1989). Takođe, opisani su mogući načini za prevazilaženje ovog problema, a predložena je i jedna nova tehnika. Poslednji, treći, eksperiment postavljen je na realnoj topografiji, sa konstantnim, prostorno i vremenski uniformnim forsiranjem u polju visine fluida. Cilj ovog eksperimenta je da se ispita mogućnost jednačina da na realnoj topografiji sliju vodu u rečna korita, i formiraju maksimume visine vode duž realne rečne mreže.

4.1 Uticaj sile trenja na stabilnost rešenja

U ovom eksperimentu zadata je strma ravan, sa nagibom od 0.01 m/m. Voda je u početnom trenutku u mirovanju ($u = 0 \text{ m/s}$), i svuda konstantne visine ($h = 0.1 \text{ m}$). Bočni granični uslov je cikličan, što znači da se voda koja dođe na kraj strme ravni vraća na njen vrh. Rezolucija mreže tačaka je konstantna, i iznosi 500 m, dok je dužina koraka u vremenu menjana od 10, 60, 120 do 180 s. Posmatrana su dva slučaja, sa i bez uključenog člana trenja u jednačini za brzinu.

U eksperimentu bez uključenog člana trenja, kao što je i očekivano, brzina u toku vremena konstantno raste. Najveća brzina se dobija za najkraći korak vremena, dok se

sa povećanjem dužine koraka brzina po malo smanjuje (slika 5, gornji panel). Nasuprot tome, u slučaju kada je član trenja uključen, brzina ne bi trebalo da se povećava, već da bude konstantna tokom cele integracije. Sa donjeg panela na slici 5 vidi se da vrednosti brzine u početku integracije osciluju, da bi nakon vremena kovergirale ka konstantnoj vrednosti. Oscilacije su veće i konvergencija traje duže što je duži vremenski korak. Problem vremenske diskretizacije člana trenja u jednačinama kretanja je dobro poznat u literaturi (Burguete i dr., 2007), pa neki autori predlažu da se CFL kriterijum uskladi sa ovim članom (Ligget i Cunge, 1997). Međutim, korišćenjem implicitne šeme (Ničković i dr., 2010), koja je detaljno objašnjena u prethodnom poglavlju, izbegnuta je potreba za redefinisanjem CFL kriterijuma i skraćivanje vremenskog koraka.



Slika 5. Vrednosti brzine fluida u toku integracije bez (gornji grafik) i sa uticajem člana trenja (donji grafik).

4.2 Tehnika redistribucije mase

Izbor horizontalne mreže tačaka u modelu sa sobom nosi odgovornost rešavanja numeričkih problema koji su posledica ovog odabira. Jedan poznati problem koji se javlja na polurazmaknutim mrežama B i E je razdvajanje rešenja gravitacionih talasa. Ono nastaje u slučajevima jakog forsiranja u polju mase, odnosno visine fluida, a manifestuje se kratkoralasnim šumom u polju visine (Ničković i dr., 2011). Primer ovakvog forsiranja u atmosferskim modelima mogu biti planine ili konvektivni procesi u oblacima, dok u pogledu numeričkog modela za površinsku hidrologiju, osim orografije, jaka forsiranja mogu biti i lokalizovane padavine.

Do sada je razvijeno više načina za prevazilaženje ovog problema: od TASU šeme za diferenciranje (Arakawa, 1972), preko tehnika koje modifikuju ubrzanje (Mesinger, 1973) do onih koje koriguju izračunatu divergenciju u polju visine fluida (Janjic, 1979; Janjic i Mesinger, 1989).

U ovom eksperimentu simulirani su čisti gravitacioni talasi u četvrtastom domenu sa ravnim dnom u kome se nalazi voda ravne površine, visine 10 m, koja u početnom trenutku miruje. Horizontalna mreža je B, sa 101 x 101 tačkom i korakom od 10 km. Na sredini domena nalazi se tačkasti izvor koji dodaje vodu brzinom 1.5 mm/min. Urađena su četiri eksperimenta, prvi, kontrolni, bez ikakve modifikacije izračunatih vrednosti, drugi u kome je primenjena generalizovana korekcija divergencije koja se tradicionalno koristi u nekoliko generacija atmosferskih modela (Janjic, 2003; Janjić i Gall, 2012), dok je u poslednja dva eksperimenta primenjena nova tehnika redistribucije mase (Ničković i dr., 2011). U svim eksperimentima vremenski korak je 90 % od najdužeg dozvoljenog CFL kriterijumom, a rezultati su prikazani nakon 24 sata integracije.

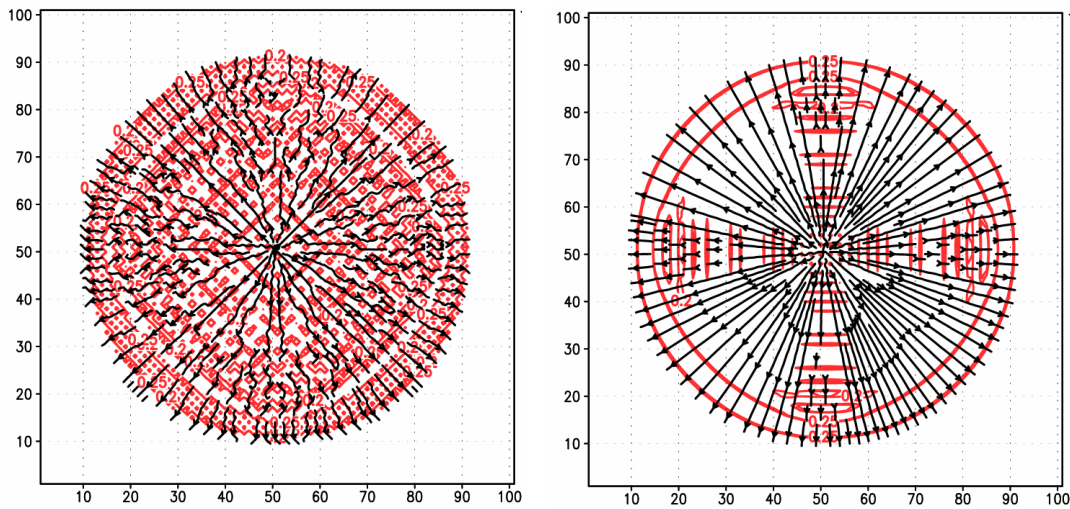
Polazni sistem jednačina sadrži samo članove geostrofskog podešavanja:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= g \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= g \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \dot{H},\end{aligned}\tag{6}$$

gde je sada H visina početnog stanja vode, a h visina poremećenja. Član $\dot{H}$ i ovde predstavlja izvor vode. Nakon vremenske diskretizacije šemom unapred-unatrag prostorne diskretizacije na B mreži, kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, sistem dobija oblik:

$$\begin{aligned} u^{n+1} &= u^n + \Delta t g \left(\overline{\delta_x u}^y \right)^{n+1} \\ v^{n+1} &= v^n + \Delta t g \left(\overline{\delta_y v}^x \right)^{n+1} \\ h^{n+1} &= h^n - \Delta t g \left(\overline{\delta_x u}^y - \overline{\delta_y v}^x \right)^n + \dot{H} \end{aligned}$$

Rezultat integracija poslednjeg sistema jednačina, bez ikakve modifikacije rešenja prikazan je na levom panelu slike 6. Kratkotalasni šum je vidljiv i u polju mase (crvene linije) i u polju brzine i to kroz izuvijane strujnice (crne linije).



Slika 6. Polje strujnica (crno) i visine fluida (crveno) u eksperimentu bez korekcije divergencije (panel levo) i sa generalizovanom korekcijom divergencije (panel desno), (Ničković i dr, 2011).

Generalizovana korekcija divergencije koja se uobičajeno koristi u atmosferskim modelima podrazumeva dodatni član u jednačini kontinuiteta, koja tada poprima oblik:

$$\begin{aligned} h^{n+1} &= h^n - \Delta t g \left(\overline{\delta_x u}^y - \overline{\delta_y v}^x \right)^n + \dot{H} + \\ &+ 0.25 \Delta x^2 \left[(h_{i+1,j+1} + h_{i-1,j+1} + h_{i+1,j-1} + h_{i-1,j-1} - 4h_{i,j}) - \right. \\ &\left. - 0.5(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j-1} + h_{i,j+1} - 4h_{i,j}) \right] \end{aligned}$$

Detaljno izvođenje ovog oblika korekcije divergencije može se pronaći u Janjić (1993a) i Janić i Gall (2012). Rezultat ove integracije dat je na desnom panelu slike 6, gde se primećuje značajno poboljšanje u odnosu na referentnu simulaciju. Sturjne linije imaju očekivanu radijalnu strukturu, dok polje mase izgleda glatkije, iako je šum i dalje prisutan duž x i y pravca, mada u značajno manjoj meri.

Jedan od predloženih načina za ublažavanje forsiranja može biti njegovo redistribuiranje na 4 ili više okolnih tačaka (Egger, 1971). Prateći ovaj argument, u radu Ničković i dr. (2011) razvijena je tehnika redistribuiranja mase koja podrazumeva filtriranje, odnosno osrednjavanje vrednosti poremećenja visine, ne samo u tački izvora, već u svim h -tačkama domena. Tako bi se nakon izračunatih rešenja iz sistema (6), visina poremećenja redistribuirala na sledeći način:

$$h^n = \alpha h^n + (1 - \alpha) \bar{h}^{x'y'}{}^n,$$

gde parametar α određuje intenzitet osrednjavanja, tako da što manja vrednost parametra proizvodi jače osrednjavanje. Sa ovom korekcijom, jednačina kontinuiteta dobija sledeći oblik:

$$h^{n+1} = \left(\alpha h + (1 - \alpha) \bar{h}^{x'y'} \right)^n - \Delta t g \left(\bar{\delta}_x u^y - \bar{\delta}_y v^x \right)^n + \dot{H}.$$

Analizom stabilnosti ove šeme koja je detaljno izvedena u radu Ničković i dr. (2011) za najduži vremenski korak po CFL kriterijumu dobija se nejednakost:

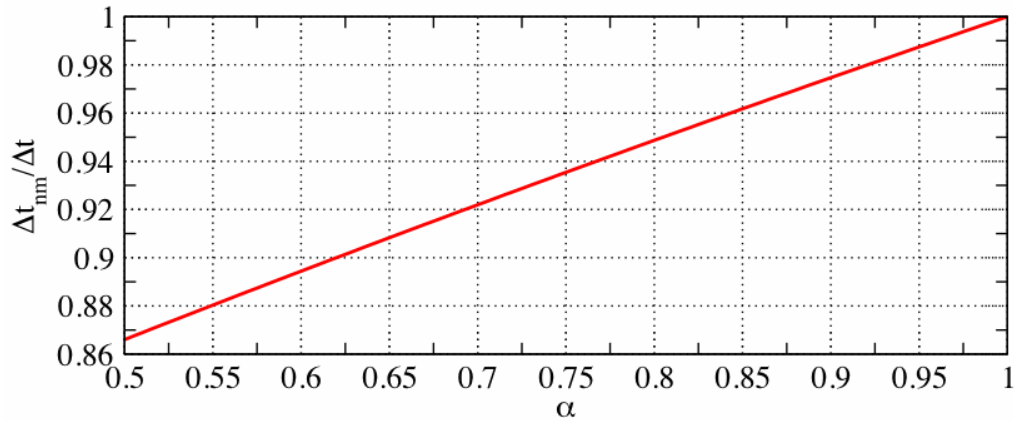
$$\Delta t \leq \sqrt{\frac{1 + \alpha}{2}} \Delta t_{ref}$$

gde je Δt_{ref} najduži CFL kriterijumom dozvoljeni vremenski korak nemodifikovanog sistema jednačina, i iznosi

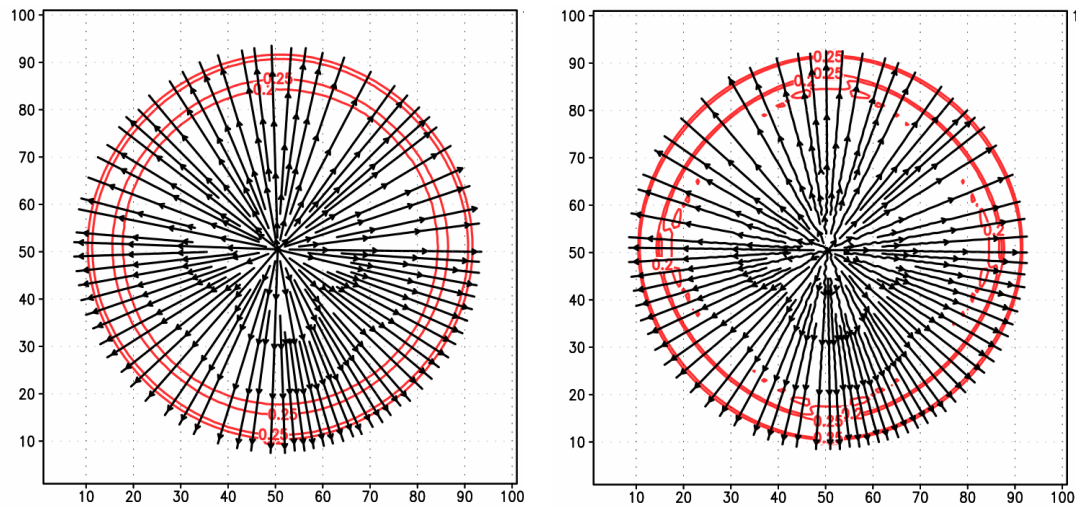
$$\Delta t_{ref} = \frac{\Delta x}{\sqrt{gH}}$$

Odnos između Δt i Δt_{ref} zavisi od izbora vrednosti parametra α na način prikazan na slici 7, tako da veće vrednosti parametra α dozvoljavaju duži vremenski korak. Vrednosti α

manje od 0.5 menjaju fazu najkraćih talasa, pa stoga nisu uzete u razmatranje (Ničković i dr., 2011).



Slika 7. Odnos između najdužeg vremenskog koraka koji je dozvoljen CFL kriterijumom za nemodifikovani i sistem jednačina kada se uvede redistribucija mase (Ničković i dr., 2011).



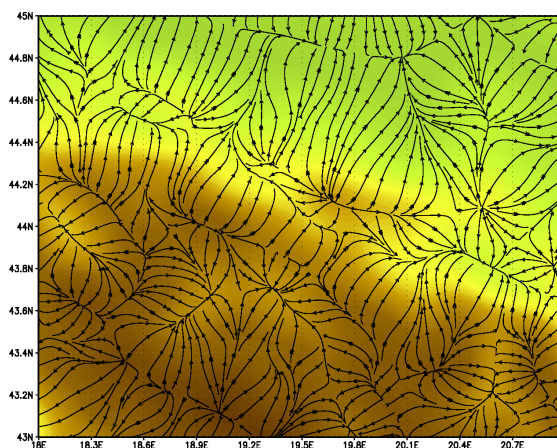
Slika 8. Polje strujnica (crno) i visine fluida (crveno) u eksperimentu sa koeficijentom redistribucije mase 0.5 (panel levo) i 0.85 (panel desno), (Ničković i dr., 2011).

Rezultati dve simulacije sa divergencijom korigovanom tehnikom redistribucije mase prikazani su na slici 8. Na levom panelu je prikazana simulacija u kojoj je vrednost α jednaka 0.5 i gde su polja visine i brzine u potpunosti oslobođena šuma. Međutim, zbog ovakvog izbora vrednosti parametra redistribucije, vremenski korak je morao biti skraćen 15 % u odnosu na referentnu integraciju. Zbog toga je urađena još jedna simulacija sa vrednošću α od 0.85, čiji su rezultati prikazani na desnom panelu slike 8. Strujnice su i u ovom slučaju potpuno radijalne, dok se u polju visine prepoznaje šum,

ali u znatno manjoj količini nego kod generalizovane korekcije divergencije (slika 6, desni panel). Vrednosti parametra redistribucije od 0.85 može se smatrati dobrim izborom jer ne zahteva preterano skraćivanje vremenskog koraka u odnosu na referentnu integraciju, svega 4 % (Ničković i dr., 2011).

4.3 Dinamika modela na realnoj topografiji

U poslednjem idealizovanom testu, pun sistem jednačina (1) postavljen je na realnu topografiju i uvedeno konstantno uniformno forsiranje od 1 mm vode na 1 sat. Horizontalna mreža tačaka je sa rezolucijom od 0.01° u x i y pravcu, što je približno 1 km, a domen integracije je $17.5 - 22.5^\circ\text{E}$ i $41.5 - 46.5^\circ\text{N}$. Početni uslov je suva površina tla, tj. $h, u, v = 0$, a granice su otvorene. Vremenski korak je 180 s. Pošto se u ovoj simulaciji ispituje dinamika modela, sve padavine ostaju na površini tla i ne mogu se infiltrirati u zemljište. Na slici 9 predstavljena je orografija dela domena i izgled strujnica nakon 50 sati integracije. Vidi se da oblik strujnica u potpunosti prati oblik orografije.

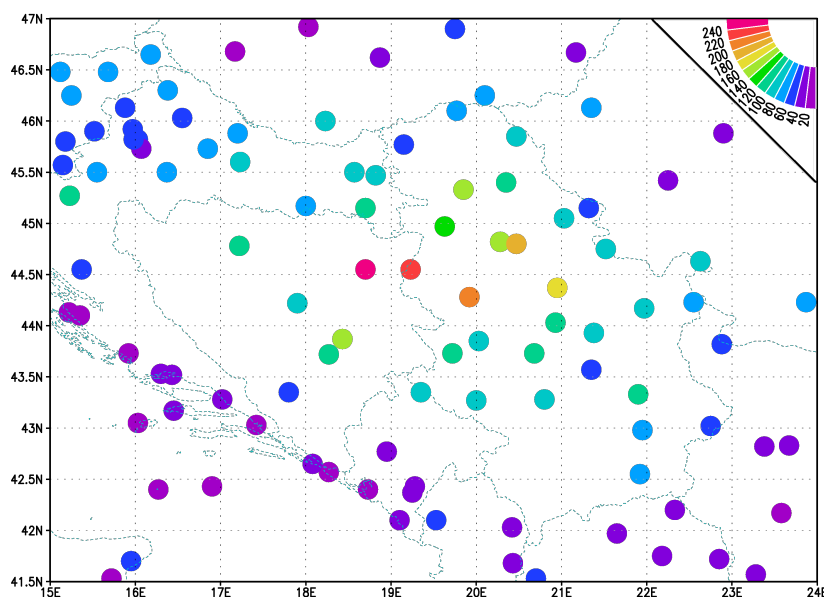


Slika 9. Polje orografije sa iscrtanim strujnicama.

Polje visine fluida nakon 50 sati integracije takođe prati polje orografije, sa maksimumima visine vode u dolinama. Maksimumi visine vode se dobro poklapaju sa mrežom rečnih tokova iz iz HYDROSHEDS (Lechner i dr., 2006) baze podataka.

5. SIMULACIJA POVEZANIM MODELOM

U maju 2014. godine, oblast zapadnog Balkana pogodila je katastrofalna poplava u Srbiji, Bosni i Hercegovini i istočnim delovima Hrvatske. Osmotrene su ekstremno velike količine padavina, na nekim stanicama čak i rekordne vrednosti. U periodu od 12. do 18. maja u najvećem delu Srbije palo je između 50 i 100 mm kiše, dok je u zapadnim delovima zemlje, koji su najviše bili pogođeni, palo više od 200 mm (slika 10), lokalno čak više i od 300 mm (Nišavić i dr., 2014). Ovim veoma intenzivnim padavinama je prethodila takođe vlažna druga polovina aprila i prvi deo maja, kada je u većem delu Srbije palo između 120 i 170 mm kiše. Već zasićeno zemljište i puni rečni i podzemni rezervoari nisu mogli da prime nove intenzivne padavine, usled čega je došlo do poplava, a zatim erozije zemljišta i aktiviranja klizišta (Vlada RS, 2014). Visoki nivoi reka, od kojih su ponovo mnogi bili rekordni, izmereni su na Savi, Drini, Dunavu, Kolubari, Ljigu, Ubu, Toplici, Tamnavi, Jadru, Zapadnoj Moravi, Velikoj Moravi, Mlavi i Peku. Sedamnaest opština i dva grada su bili pogođeni poplavama, 32000 ljudi bilo je evakuisano iz svojih domova, a 51 čovek je izgubio život. Materijalna šteta u infrastrukturi, energetskom sistemu, poljoprivedi i domaćinstvima procenjena je na više od 2 milijarde eura (Evropska komisija, 2014).

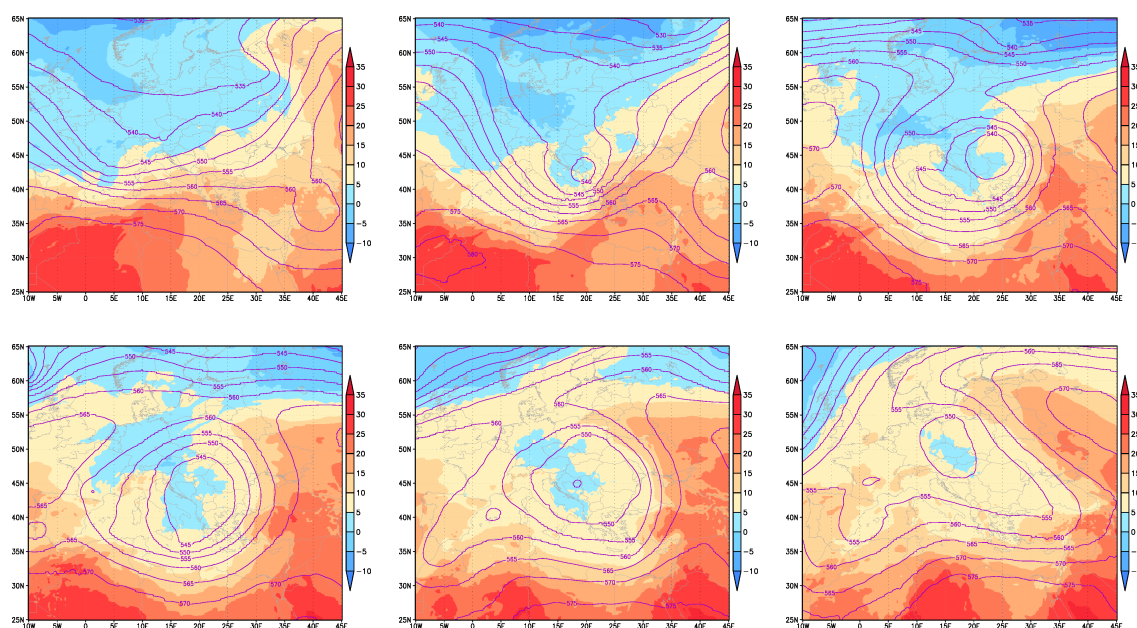


Slika 10. Izmerene akumulirane padavine (mm) za period od 12. do 18. maja 2014. godine na stanicama u regionu.

Povezanim modelom simulirana je epizoda sa ekstremnom količinom padavina kako bi se ispitao uticaj uključivanja modela za prognozu površinskog toka na meteorološke parametre, pre svega na vlažnost tla u prognozi vremena. Demonstrirana je sposobnost modela da u sistemu ranih najava pravovremeno upozori na eventualnu opasnost od poplava.

5.1 Opis sinoptičke situacije

Usled prodora hladne vazdušne mase iz severne Evrope, preko Alpa, 13. maja 2014. godine došlo je do produbljivanja visinske doline u Đenovskom zalivu (slika 11, prvi panel). Advekcija hladnog vazduha se nastavila i sledećeg dana, 14. maja, što je dovelo do daljeg produbljivanja doline i odsecanja ciklona koji se kretao ka istoku, preko Jadranskog mora i Balkanskog poluostrva (slika 11, drugi panel), skupljajući pritom dodatnu vlagu iz suptropske vazdušne mase koja se nalazila u Sredozemlju. Nakon toga, ciklon odstupa od uobičajene putanje ka Crnom Moru (Nišavić i dr., 2014), već skreće ka severu i svezapadu, dostižući vrhunac svog razvoja 15. maja iznad zapadne Rumunije (slika 11, treći panel).



Slika 11. Polje temperature na 850 mb i konture geopotencijala na 500 mb iz analize ECMWF-a u podne od 13. do 18. maja 2014.

Nakon ovoga, ciklon pravi putanju u obliku petlje (Nišavić i dr., 2014), zadržavajući se tokom 15. i 16. maja iznad Balkana, gde se formiralo jezero hladnijeg vazduha (slika 11, treći, četvrti i peti panel). Tokom 14. i 15. maja iznad istočne Bosne i Hercegovine i zapadnog i centralnog dela Srbije neprekidno je padala obilna kiša, praćena niskom temperaturom i jakim vetrom. Na planinama iznad 1500 m nadmorske visine padao je sneg. Sa slabljenjem i pomeranjem ciklona tokom 16. i 17. maja, oblast padavina se pomerila ka severu, a količina padavina u Srbiji se smanjila. Od 18. maja ciklon se kretao dalje ka severu (slika 11, poslednji panel), a padavine u Srbiji su prestale.

5.2 Numerička simulacija

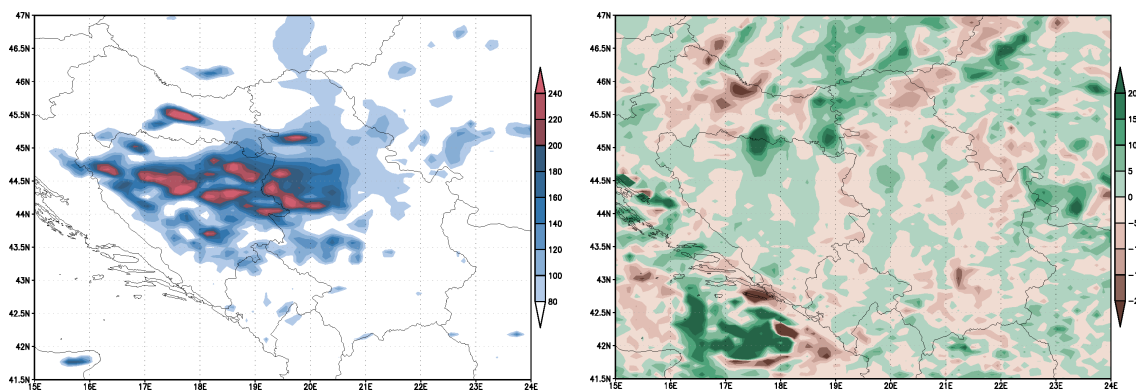
Povezani model za prognozu površinskog oticaja integraljen je u domenu $15 - 25^{\circ}\text{E}$ i $41 - 48^{\circ}\text{N}$, sa 601×601 računskom tačkom, na horizontalnoj rezoluciji od 0.045° u y i 0.06° u x pravcu, što je približno jednako 5 km. Vremenski korak modela za dinamički modul je 10 s, dok je za fizičke pakete, kao i za površinsku hidrologiju četiri puta duži, i iznosi 40 s. Početno polje i bočni granični uslovi na 6 h su preuzeti iz globalnog polja analize Evropskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (ECMWF), na horizontalnoj rezoluciji od 0.25° . U početnom trenutku polje površinskog oticaja nije inicijalizovano, odnosno visina i brzina vode su nula. Početak prognoze je 12. maj 2014. u 00 UTC, a kraj 22. maj u 00 UTC. Rezultati su zapisivani na svakih sat vremena integracije.

Pored ove simulacije povezanim modelom, urađena je još jedna, kontrolna, integracija bez uključenog modula za prognozu površinskog toka. Rezolucija i postavka obe integracije su potpuno identične.

5.3 Analiza rezultata

Kako se NMMB godinama uspešno koristi u operativnoj prognozi vremena, analiza rezultata ovih simulacija se neće baviti ocenom tačnosti reprodukcije dinamičkih polja, već će biti fokusirana na padavine i promenljive vezane za tlo, gde je uticaj povezanog modela najveći.

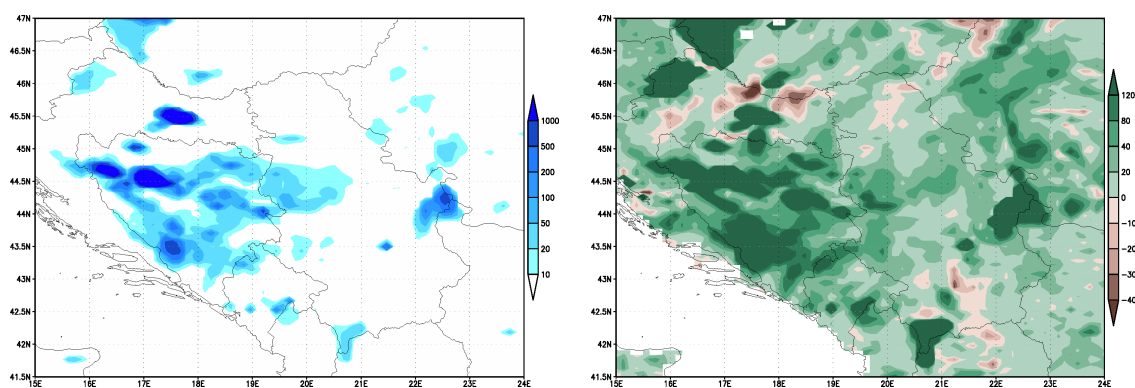
Akumulirane padavine iz povezanog modela u toku celog događaja, od 12-18. maja, dobro se slažu sa osmotrenim vrednostima u celom regionu (slike 10 i 12, levi panel). Ukupne padavine iz modela tokom ovih 7 dana na prostoru zapadne Srbije i centralne i istočne Bosne i Hercegovine su preko 200 mm, a lokalno i preko 240 mm, što se dobro slaže sa dostupnim osmotrenim podacima. Uključivanje modula za prognozu površinskog oticaja dovelo je do razlika u simuliranom polju padavina u odnosu na kontrolnu integraciju. Kao što se može videti na desnom panelu slike 12, oblasti u kojima je povezani model dao više se smenjuju sa oblastima gde je dao manje padavina u odnosu na običan NMMB. To zapravo znači da su padavinski sistemi zapravo malo pomereni u prostoru u odnosu na kontrolnu integraciju. Najveće razlike između dva modela (i preko 20 %) se uočavaju u oblastima koje nisu bile značajno pogođene jakim kišama, dok je u najvećem delu regiona koji su zadesile poplave ta razlika manja od 5 %, a samo lokalno između 5 i 10 %.



Slika 12. Polje akumuliranih padavina (mm) od 12. do 18. maja 2014. godine iz povezanog modela (levi panel) i razlika akumuliranih padavina (%) u odnosu na kontrolnu integraciju (desni panel).

Maksimumi u polju akumuliranog površinskog oticaja tokom pomenutih sedam dana na levom panelu slike 13 jasno obeležavaju oblasti koje su bile ugrožene poplavama i klizištima. Razlike u odnosu na kontrolnu integraciju su višestruko veće nego u slučaju padavina (slika 13, desni panel). Najveće razlike između dve integracije uočavaju se u centralnoj i južnoj Bosni i Hercegovini, u dolini Save i zapadnoj i istočnoj Srbiji, gde prelaze i preko 120 %. Osim toga, dok se u polju razlika akumuliranih padavina smenjuju oblasti sa pozitivnom i negativnom vrednošću u odnosu na kontrolnu simulaciju, ta razlika za akumulirani površinski oticaj je u najvećem delu domena pozitivna, a negativne vrednosti se javljaju vrlo sporadično i lokalizovane su. Razlika u

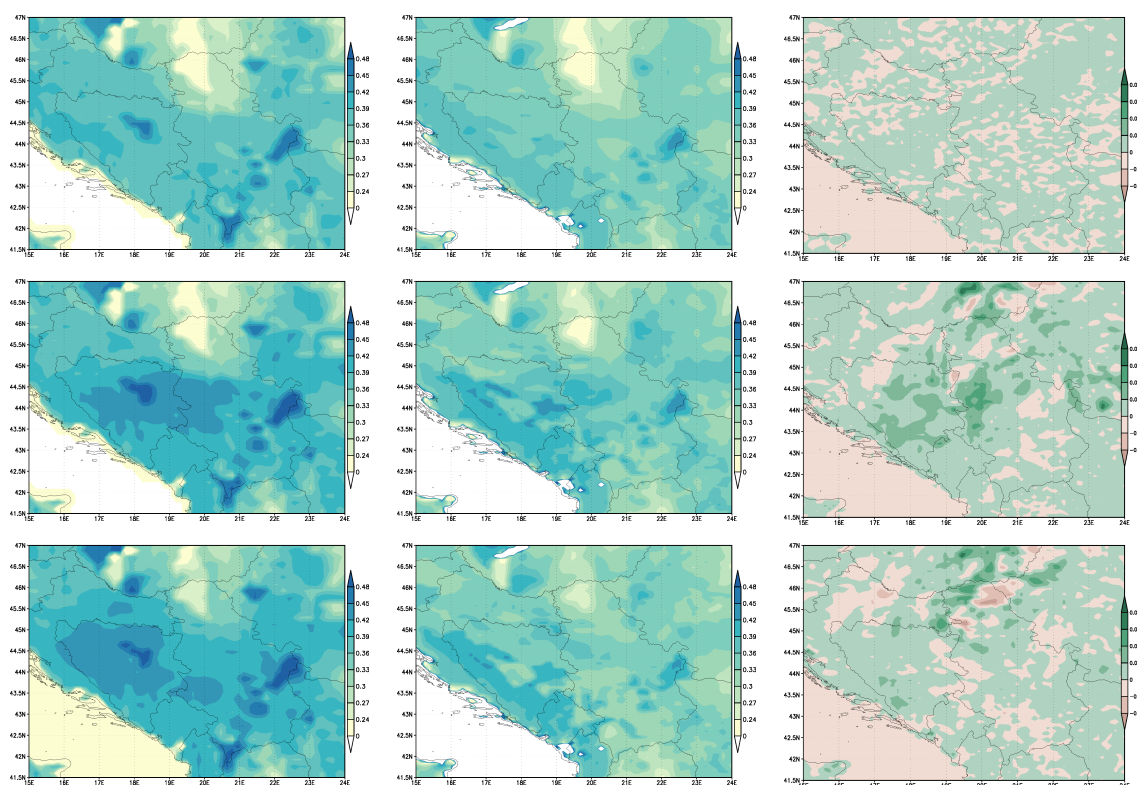
poljima akumuliranog površinskog oticaja, dakle, ne potiče samo od prostorno pomeštenih padavinskih sistema u dve integracije, već i od činjenice da se u povezanom modelu izračunati površinski oticaj preraspoređuje niz topografiju, a zatim se u sledećem vremenskom koraku modela dodaje na količinu vode koja je raspoloživa za infiltraciju u zemljište. Na taj način oticaj iz prethodnog vremenskog koraka se u sledećem može infiltrirati u tlo ili formirati novi oticaj, za razliku od običnog NMMB-a, gde se izračunati oticaj u jednom vremenskom koraku ne prenosi u sledeći, već se njegova vrednost gubi.



Slika 13. Polje akumuliranog površinskog oticaja (mm) od 12. do 18. maja 2014. godine iz povezanog modela (levi panel) i razlika akumuliranog površinskog oticaja (%) u odnosu na kontrolnu integraciju (desni panel).

Promenljiva na koju je posebno treba obratiti pažnju jeste vlažnost zemljišta. Osim očiglednog uticaja na površinski oticaj, njena promena u ima direktni uticaj na flukseve osetne i latentne toplote, odnosno donji granični uslov atmosferskog dela modela. Zbog njene promene vide se razlike u polju padavina, temperature, kao i polju pritiska (nije prikazano). Na slici 14 prikazana su polja srednje volumetrijske vlažnosti zemljišta do 1 m dubine, za tri izabrana trenutka: 13.05. u 00 UTC, pre obilnih padavina, 15.05. u 00 UTC, za vreme padavina, i 18.05. u 00 UTC, nakon padavina, kada je sistem već napustio posmatranu oblast. Polje vlažnosti zemljišta je u početnom trenutku inicijalizovano iz analize ECMWF-a, pa su, u nedostatku osmtaranja, rezultati modela upoređeni sa istom analizom u izabranim trenucima. U prvoj (levo) koloni, dato je pomenuto polje iz analize ECMWF-a, u srednjoj koloni, polje je iz povezanog modela, a u trećoj (desno) koloni razlika vlažnosti zemljišta između simulacije sa povezanim modelom i kontrolne integracije.

U prvom prikazanom trenutku (prvi red na slici 14), epizoda ekstremnih padavina još nije započela, pa vlaga u zemljištu u analizi potiče od prethodnih kiša koje su tokom aprila i početkom maja padale u domenu modela. Volumetrijska vlažnost iz simulacije povezanim modelom je manja od vrednosti iz analize ECMWF-a u većini domena. Jedino su na severu njihove vrednosti približne. Ova razlika najverovatnije potiče od inicijalizacije polja vlage zemljišta u modelu, odnosno dispariteta između modela za procese u tlu koji su korišćeni, što će detaljnije biti obrazloženo u daljoj analizi rezultata. S obzirom da je razlika u vlažnosti tla primetna već nakon 24 sata integracije modela, i to u periodu kada nisu postojale značajnije padavine u domenu, može se očekivati da se ove razlike tokom integracije samo produbljuju.



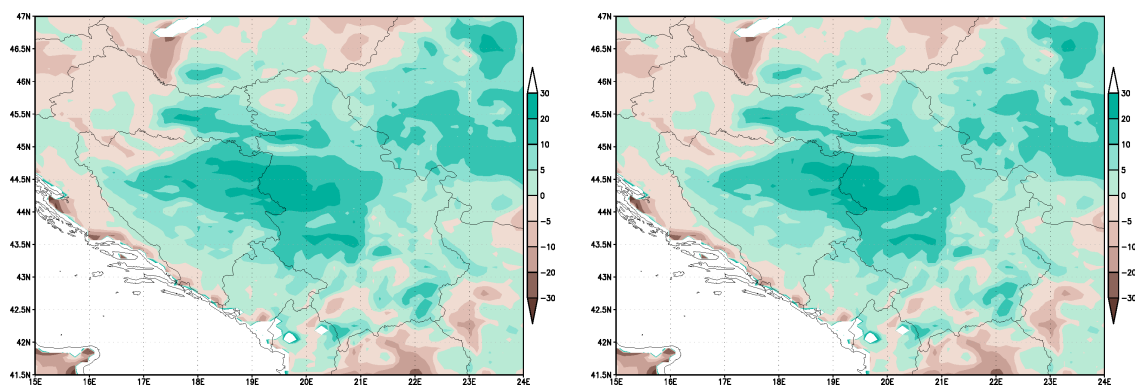
Slika 14. Polje srednje volumetrijske vlažnosti tla (m^3/m^3) sloja do 1 m dubine iz analize ECMWF-a (prva kolona), iz povezanog modela (druga kolona) i razlika (m^3/m^3) povezanog modela u odnosu na kontrolnu simulaciju (treća kolona). Gornji red slika odnosi se na 00 UTC 13.05.2014, srednji na 00 UTC 15.05.2014, a poslednji red na 00 UTC 18.05.2014. godine.

Drugi trenutak, prikazan u srednjem redu na slici 14, je jedan sat posle ponoći po lokalnom vremenu 15. maja, kada su jake padavine u slivu Kolubare već bile prisutne i kada je došlo do izlivanja reka i poplava. Polje vlažnosti zemljišta iz analize je ponovo vlažnije od rezultata povezanog modela, ali osim intenziteta, veća je i površina oblasti u

kojoj je izražen porast vlažnosti. Razlika između povezanog modela i kontrolne simulacije je najveća u oblastima gde su postojale padavine, pa je tako povezani model vlažniji u istočnoj i južnoj Bosni i Hercegovini i centralnoj i zapadnoj Srbiji, odnosno upravo u oblastima u kojima je došlo do poplava.

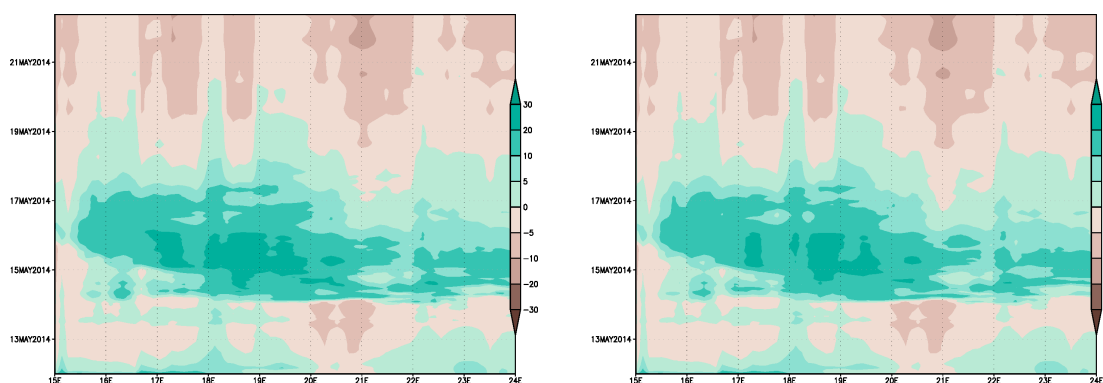
U donjem redu na slici 14 prikazan je 18. maj u 00 UTC, kada su padavine već prestale. Kao i u prethodnom slučaju, analiza ECMWF-a je dosta vlažnija i u intenzitetu i u veličini oblasti u odnosu na integraciju povezanim modelom. Razlike između povezanog modela i kontrolne simulacije su najuočljivije u Posavlju, gornjem toku Dunava, južnoj Bosni i Hercegovini, severu Bačke i Mađarskoj, gde je povezani model dao veću vlažnost zemljišta i na severu Banata i u Sremu gde je bio sušniji. Razlike vlažnosti u Vojvodini verovatno potiču od razlika u pozicioniranju padavina između dve simulacije.

Pošto je za zasićenje različitih tipova zemljišta potrebna različita količina vode, da bi se stekla objektivna slika o tome koliko je prognozirani sadržaj vode u tlu visok za tip zemljišta na određenom mestu, potrebno je posmatrati ne samo volumetrijsku vlažnost zemljišta, već i neku relativnu veličinu. U tu svrhu definisan je indikator – relativno zasićenje zemljišta, kao razlika (u %) volumetrijske vlažnosti prvog sloja zemljišta u modelu (dubine do 10 cm) u odnosu na vrednost poljskog vodnog kapaciteta za odgovarajući tip zemljišta definisan u modelu. Poljski vodni kapacitet predstavlja najveću količinu vode koje zemljište može da zadrži bez gravitacionog slivanja i njegova vrednost je definisana u modelu kao konstanta za svaki tip zemljišta. Zbog toga se relativno zasićenje zemljišta u odnosu na poljski vodni kapacitet može mnogo bolje iskoristiti za donošenje zaključka o tome da li je neka oblast ugrožena od poplava, nego sama vrednost volumetrijske vlažnosti tla. Relativno zasićenje prikazano je za obe integracije za 05. maj u 00 UTC na slici 15 i pokazuje da je u najvećem delu posmatranog domena zemljište prezasićeno u odnosu na poljski vodni kapacitet. Oblasti koje imaju procenat prezasićenja veći od 20 % su upravo one koje su bile pogođene poplavama. U tom smislu, može se definisati granica preko koje vrednosti zasićenja ukazuju na mogućnost poplave, što se može koristiti u sistemima ranih najava kao prvi indikator opasnosti.



Slika 15. Relativno zasićenje prvog sloja zemljišta u odnosu na poljski vodni kapacitet (%) iz simulacije povezanim modelom (levi panel) i kontrolne simulacije (desni panel).

Kako bi se procenila dužina trajanja opasnosti od poplava, može se posmatrati promena vrednosti definisanog indikatora opasnosti od poplava u vremenu na nekom području. Na slici 16 indikator je prikazan duž latitude od 44.7 °N tokom čitavog perioda simulacije. Vidi se da je njegova vrednost iznad definisane opasne granice od noći između 14. i 15. maja do kasnog popodneva 16. maja u oblasti od 18 do 20.5 °E, nakon čega vrednost prezasićenja opada da bi nakon 18. maja zemljište postalo nezasićeno u odnosu na poljski vodni kapacitet u najvećem delu, a nakon 20. maja duž cele latitude.



Slika 16. Relativno zasićenje prvog sloja zemljišta u odnosu na poljski vodni kapacitet (%) duž latitude 44.7 °N u toku integracije. Na levom panelu je rezultat iz povezanog modela, a na desnom kontrolna simulacija.

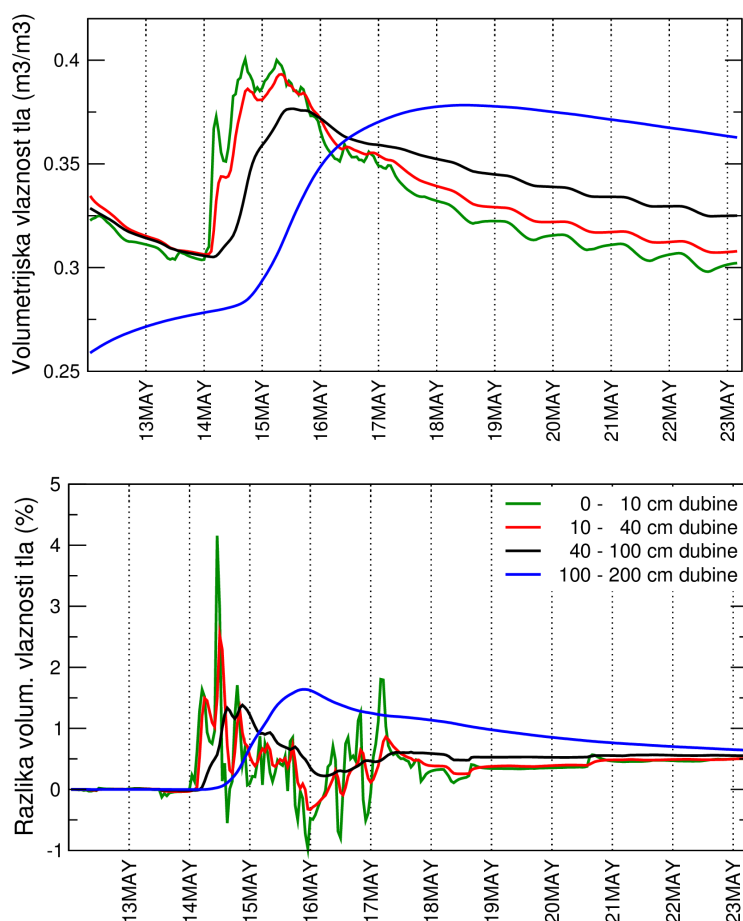
Poređenjem rezultata sa kontrolnom integracijom pokazuje da se i u njoj javljaju vrednosti relativnog zasićenja sličnog intenziteta na područjima koja su zaista i bila ugrožena, ali su te površine nešto manje (slika 15) i traju kraće (slika 16) od onih u simulaciji povezanim modelom. Treba primetiti da je u početnom trenutku zemljište bilo prezasićeno u odnosu na poljski vodni kapacitet skoro duž čitave prikazane latitude. Iako zemljište jeste bilo natopljeno prethodnim aprilskim kišama, ipak se ne može reći

da taj stepen prezasićenja odgovara stvarnoj situaciji. Uzrok ovome je najverovatnije nekonzistentnost pri inicijalizaciji u modelima za procese na površini između NMMB-a i modela ECMWF-a. Naime, ECMWF u prognozi i analizi koristi HTESSEL model za procese na površini. U njemu je definisano 8 tipova tla (Balsamo, 2009), za razliku od LISS i NOAH modela koji se koriste u okviru NMMB-a, a koje prepoznaju 19 tipova (Vuković, 2009). Osim očigledno različitih klasifikacija, vrednosti parametara koji zavise od tipa zemljišta su drugačije definisane, između ostalog i poljski vodni kapacitet, kao i maksimalno dozvoljena vlažnost za svaki tip zemljišta, koje su uglavnom nešto veće u klasifikaciji koju koristi HTESSEL model (Balsamo, 2009). Zbog toga se vrednosti vlažnosti tla, inicijalizovane iz ECMW analize ili prognoze, u prvim izlazima čine većim nego što bi se očekivalo, dok kasniji rezultati simulacije ispadaju sušniji, kao što je prikazano na slici 14.

Promena volumetrijske vlažnosti tla u sva četiri nivoa modela u toku integracije prikazana je na slici 17 za tačku sa koordinatama 44.7 °N, 20.25 °E, što je zapravo lokacija Obrenovca koji je bio najteže pogođen poplavama u simuliranoj epizodi. Vlažnost tla prva dva sloja zemljišta modela (koji su do ukupne dubine od 40 cm), raste za vreme padavina, tokom 14. i 15. maja, dok se nakon prestanka najvećih padavina, od 16. maja nadalje lagano vraća na početni nivo. Vlažnost u trećem sloju zemljišta modela (od 40 do 100 cm dubine) dostiže svoj maksimum nešto kasnije u odnosu na prva dva sloja, tokom 15. maja, a zatim se suši nešto sporije od gornjih slojeva i ostaje vlažniji od njih sve do kraja integracije. Poslednji nivo modela (dubine između 1 i 2 m) je na početku integracije dosta suvlji od ostala tri. Intenzivniji porast vlažnosti u ovom sloju se očekivano javlja sa zakašnjenjem u odnosu na gornje, tek od 15. maja, pri čemu je maksimum dosegnut 18. maja. Povećanje vlažnosti najdubljeg sloja je najsporije, ali i najveće, a takođe se i najsporije suši, ostajući dosta vlažniji od ostalih slojeva sve do kraja integracije.

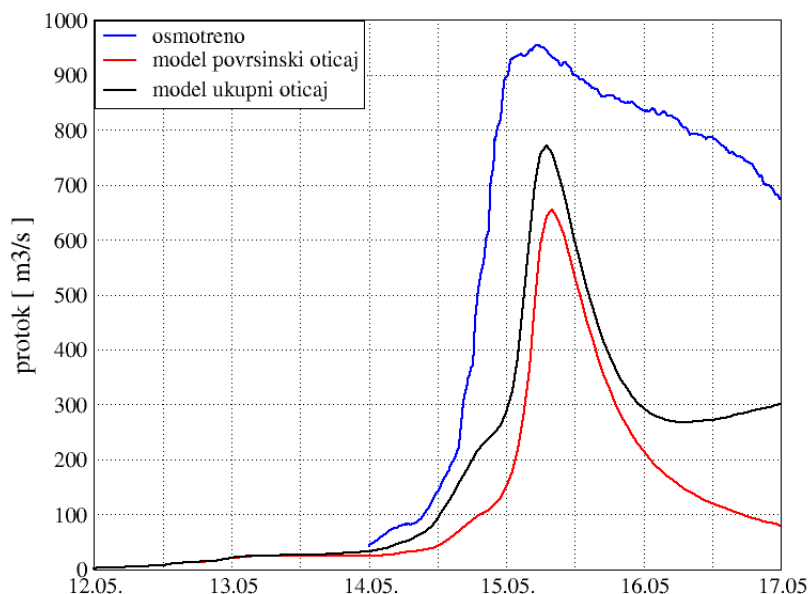
U poređenju sa kontrolnom integracijom, povezani model daje veću vlažnost svih slojeva tla tokom 14. i 15. maja. Između 16. i 17. maja prva dva sloja zemljišta u kontrolnoj simulaciji su nešto vlažniji od povezanog modela, ali se ta razlika može opravdati naglim skokom vlažnosti poslednjeg nivoa koji je u povezanom modelu veći za oko 1.5 % u odnosu na kontrolni. Nakon toga, do kraja integracije svi nivoi zemljišta

povezanog modela su vlažniji od kontrolne integracije i konvergiraju ka razlici od oko 0.5 %.



Slika 17. Volumetrijska vlažnost tla na sva 4 nivoa povezanog modela (panel gore) i razlika (%) u odnosu na kontrolnu simulaciju (panel dole) u tački 44.7 °N, 20.25 °E u toku vremena integracije.

Pošto je dobijene rezultate teško kvantitativno oceniti usled nedovoljno kvalitetnih merenja vlažnosti zemljišta, površinski oticaj iz povezanog modela iskorišćen je za simulaciju protoka u reci Kolubari na mernoj stanici Beli Brod i rezultati su upoređeni sa osmatranjima. Stanica Beli Brod se nalazi uzvodno od Obrenovca i ušća reke Ub u Kolubaru. Podaci sa dve hidrološke stanice koje se nalaze na Kolubari nizvodno od Belog Broda nisu se mogli koristiti jer su pod naletom poplavnog talasa prestale da rade, pa merenja nisu zabeležena. Površina sliva Kolubare na Belom Boru iznosi nešto manje od 1900 km².



Slika 18. Osmotreni i simulirani protok na stanici Beli Brod, na reci Kolubari, od 12. do 17. maja 2014.

Simulirani površinski oticaj iz povezanog modela na svakih sat vremena iskorišćen je kao ulaz u zaseban, takozvani “offline” model sliva i rečnog toka na prostornoj rezoluciji od 800 m. Rezultati prikazani na slici 18 pokazuju da model dobro simulira vreme porasta protoka, ali daje nešto niže vrednosti. U drugoj simulaciji, kao forsiranje pored površinskog korišćen je i podzemni oticaj izračunat povezanim modelom, što je simuliranu vrednost maksimuma protoka približilo merenjima. Međutim, u ovom slučaju, kriva protoka počinje ponovo da raste nakon 16. maja, ovog puta sporije, što odgovara vremenu i tempu porasta vlažnosti poslednjeg sloja tla (slika 17), a samim tim i porasta podzemnog oticaja. Iako veličina maksimuma nije dobro prognozirana, tempo njegovog porasta i vreme jesu, što bi trebalo da je dovoljno da se u operativnoj prognozi prepozna opasnost od moguće poplave.

6. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen model za prognozu površinskog oticaja koji je prvo testiran u idealizovanim eksperimentima, a zatim povezan sa atmosferskim modelom poslednje generacije, NMMB. Ovaj model čini važnu kariku u integrisanom geofizičkim sistemu jer zatvara hidrološki ciklus koji do sada u atmosferskim modelima nije bio kompletan. On dinamički tretira površinski oticaj na tlu, slivajući ga niz topografiju, a zatim izračunate vrednosti vraća u model za procese na površini, čineći ga ponovo raspoloživim za infiltraciju u zemljište. Zahvaljujući tome poboljšava se interpretacija svih parametara vezanih za površinu tla, a samim tim i donji granični uslov u atmosferskim modelima, što dalje direktno utiče na kvalitet prognoze vremena i klimatskih simulacija.

Povezani model je testiran u realnoj situaciji ekstremnih padavina sredinom maja 2014. godine koje su izazvale poplave u Srbiji, Bosni i Hercegovini i Hrvatskoj. Analizirane su simulirane komponente hidrološkog ciklusa, pre svega padavine, površinski oticaj i vlažnost zemljišta, a pored toga, u zasebnoj simulaciji, i porast signala u rečnom toku. Formulisan je parametar koji bi mogao da posluži kao indikator opasnosti od poplava u operativnoj prognozi i sistemu ranih najava ekstremnih događaja.

Uključivanje povezanog modela za prognozu površinskog oticaja u klimatske simulacije poboljšalo bi kvalitet simulacija prizemnih procesa, što bi izuzetno koristilo u analizi uticaja klimatskih promena, oceni ranjivosti i formulisanju mera adaptacije, naročito u granama privrede koje u velikoj meri zavise od stanja tla, kao što su poljoprivreda, hidrologija i vodni resursi.

Budući razvoj numeričkog modeliranja hidrološkog ciklusa kao komponente integrisanog geofizičkog sistema treba usmeriti ka boljoj interpretaciji parametriziranih procesa kopnene hidrologije i numeričkom modeliranju dinamike podzemnih voda. Očekivani cilj navedenih istraživanja je razvoj integralnog pristupa u modeliranju dinamičkih i fizičkih procesa geofizičkog sistema – razvoj hidrometeoroloških numeričkih modela.

Literatura

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and J. Rasmussen, 1986a: An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique European, "SHE", 2: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, 45–59.
- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and J. Rasmussen, 1986b: An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique European, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, 61–77.
- Ames, W. F., 1969: Numerical methods for partial differential equations, Nelson, London, 291 p.
- Anderson, J. A., 1967: Computer application to system analysis, Lower Mellong River, US Army Engineer Division, North Pacific, Portland, Oregon.
- Anderson, M. G. and T. P. Burt, 1985: Hydrological Forecasting, Wiley, Chichester, 616 p.
- Arakawa, A., 1972: Design of the UCLA General Circulation Model, Numerical Simulation of Weather and Climate, Department of Meteorology, University of California, Los Angeles, Technical Report, No. 7.
- Arakawa, A. and V. R. Lamb, 1977: Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model, *Methods of Computational Physics*, 17, 173–265.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah R. S., and J. R. Williams, 1998: Large area hydrologic modeling and assessment part 1: Model development, *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 1, 73-89.
- ASCE, 2000: Artificial neural networks in hydrology, I: Preliminary concepts, *J. Hydrologic Engrg.*, 5, 2, 115–123.
- Balsamo, G., Viterbo, P., Beljaars, A., van den Hurk, B., Hirschi, M., Betts, A. K. and K. Scipal, 2009: A revised Hydrology for the ECMWF model: verification from field site to terrestrial water storage and impact in the integrated forecast system, *Journal of Hydrometeorology*, 10, 623–643.
- Bergström, S., 1995: The HBV model, in: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh, V.P. (Ed.), Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO., 443-476.
- Betts, A. K., 1986: A new convective adjustment scheme. Part 1: Observational and theoretical basis, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 677–691.
- Betts, A. K. and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme, Part 2: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 693–709.
- Beven, K. J., 1977: Hill slope hydrographs by the finite element method, *Earth surface processes and Landforms*, 2, 13-28.
- Beven, K. J. and P. E. O'Connell, 1982: On the Role of Physically-based Distributed Models in Hydrology, Technical Report Institute of Hydrology, Report, No. 81,

Wallingford, United Kingdom.

Beven, K., Calver A., and E. M. Morris, 1987: The Institute of Hydrology distributed model, IH Report No. 98, Institute Of Hydrology, Wallingford, United Kingdom.

Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., and J. Freer, 1995: TOPMODEL, in: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh, V. P. (Ed.), Water Resources Publication, Colorado, 627-668.

Beven, K., 2004: Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes, *Hydrol. Process*, Wiley InterScience, 18, 18, 3447–3460.

Biftu, G. F. and T. Y. Gan, 2001: Semi-Distributed, Physically Based, Hydrologic Modeling of the Paddle River Basin, Alberta, Using Remotely Sensed Data, *Journal of Hydrology*, 244, 3-4, 137–156.

Blackie, J. R. and C. W. O. Eeles, 1985: *Lumped Catchment Models in Hydrological Forecasting*, John Wiley and Sons, Chichester, 311–345.

Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, 1987: A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, Heaps N.S.(ed.), American Geophysical Union, Washington, DC, 1-16.

Borah, D. K. and M. Bera, 2003: Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases, *Trans. ASAE* 46, 6, 1553–1566.

Boussinesq, J., 1871: Théorie de l'intumescence liquide, appelée onde solitaire ou de translation, se propageant dans un canal rectangulaire, *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 72, 755–759.

Bras, R. L., 1990: *Hydrology: Introduction to Hydrological Science*, Addison-Wesley Publication Company, 643 p.

Burguete, J., García-Navarro, P., Murillo, J. and I. García-Palacín 2007: Analysis of the Friction Term in the One-Dimensional Shallow-Water Model, *J. Hydraul. Eng.*, 133, 9, 1048–1063.

Burnash, R. J. C., 1995: The NWS River Forecast System - Catchment Model, in: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh, V. P. (Ed.), Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.

Caleffi, V., Valiani, A. and A. Zanni, 2003: Finite volume method for simulating extreme flood events in natural channels, *J. Hydraul. Res.*, 41, 2, 167–177.

Casulli, V., 2008: A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics, *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, 60, 391–408.

Chanson, H., 2004: *The Hydraulics of Open Channel Flow*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 630 p.

Chen, F., et al., 1996: Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations, *J. Geophys. Res.*, 101, 7251–7268.

Chen, Y. D., 2004: Watershed Modeling: Where Are We Heading?, *Environmental Informatics Archives*, 2, 132-139.

Chow, V. T., Maidment, D., and L. W. Mays, 1988: *Applied Hydrology*, McGraw Hill.

- Ciarapica, L. and E. Todini, 2002: TOPKAPI: A model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales, *Hydrological Processes*, vol. 16, 2, 207– 229.
- Clapp, R. B. and G. M. Hornberger, 1978: Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties, *Water Resources Research*, 14, 601-604.
- Dawdy, D. R. and T. O'Donnell, 1965: Mathematical models of catchment behaviour, *Journal of Hydraulic Division Proc. ASCE*, 91, 123-137.
- DHI, 1993: MIKE-SHE Technical Reference Manual Water movement module release 1.0., Tech. Rep., Danish Hydraulic Institute (DHI).
- DHI, 2000: MIKE 11 User Guide and Reference Model, Tech. Rep., Danish Hydraulic Institute (DHI).
- Djurdjević, V., Janjić, Z., Pejanović, G., Vasić, R., Rajković, B., Vujadinović, M., Vuković, A. and M. Lompar, 2013: NCEP's multiscale NMMB model in the Hydrometeorological Service of Serbia: experiences and recent model developments, EGU General Assembly, April 07-12, *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-8217.
- Djurdjević, V. and A. Kržić, 2014: Analysis of the downscaled CMCC-CM performed with the NMMB model, ORIENTGATE project report, 16 p.
- Egger, J., 1971: Mindestgrösse von Gebirgen und Konvektionsgebieten, die in den Modellen der numerischen Vorhersage berücksichtigt werden können, *Beitr. Phys. Atmos.* 44, 245–271.
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G. and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model, *J. Geophys. Res.*, 108, 8851.
- European Commission, 2014: United Nations and World Bank Group, RNA Report: Serbia floods 2014, 163 p.
- Fels, S. B. and M. D. Schwarzkopf, 1975: The simplified exchange approximation – a new method for radiative transfer calculations, *J. Atmos. Sci.*, 32, 1475–1488.
- Ferrier, B. S., Jin, Y., Lin, Y., Black, T., Rogers, E. and G. DiMego, 2002: Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta Model, in: *Proc. 15th Conf. on Numerical Weather Prediction*, August 12-16, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc., 280–283.
- Freeze, R. A. and R. L. Harlan, 1969: Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model, *Journal of Hydrology*, 9, 237–258.
- Freeze, R. A., 1971: Three dimensional transient, saturated-unsaturated flow in a ground water basin, *Water Resources Research*, 7, 2, 347-366.
- Gadd, A. J., 1974: An economical explicit integration scheme, Tech. Note 44, Meteorological Office, Bracknell, RG12 2SZ, U.K., 7 p.
- Hapuarachchi, P. and Q. J. Wang, 2008: A review of methods and systems available for flash flood forecasting, Tech. Rep., CSIRO Land and Water.
- Horton, R. E., 1933: The role of infiltration in the hydrologic cycle, *Transactions*,

American Geophysical Union, 14, 446–460.

Huber, W. C., 1995: Keeping the engine running – can we engineer a better model?, In: Water Management in Urban Areas, Proceedings of American Water Resources Association 31st Annual Conference and Symposia, M.L. Loethen (ed.), American Water Resources Association, Herndon, Virginia, 187–193.

Ivkovic, M., Vujadinovic, M., Pejanovic, G. and V. Despotovic, 2013: Climate change impacts on hydrological regime and water resources management in the Toplica river basin, WSDAC International Conference: Climate change impacts on water resources, October 17–18, Belgrade, Serbia.

Janjic, Z. I., 1977: Pressure gradient force and advection scheme used for forecasting with steep and small scale topography, *Contrib. Atmos. Phys.*, 50, 186–199.

Janjic, Z. I., 1979: Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-interval noise and its application in sigma coordinate models, *Contrib. Atmos. Phys.*, 52, 69–84.

Janjic, Z. I., 1984: Non-linear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids, *Mon. Weather Rev.*, 112, 1234–1245.

Janjic, Z. I. and F. Mesinger, 1989: Response to small-scale forcing on two staggered grids used in finite-difference models of the atmosphere, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 115, 1167–1176.

Janjic, Z. I., 1990: The step-mountain coordinate: physical package, *Mon. Weather Rev.*, 118, 1429–1443.

Janjic, Z. I., 1993a: Modeliranje atmosfere I, Skripta za studente meteorologije, Institut za meteorologiju, Fizicki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, 202 str.

Janjić, Z. I., 1993b: Fizički procesi – modeliranje atmosfere 2, Skripta za studente meteorologije, Institut za meteorologiju, Fizički fakultet, Beograd, 83 str.

Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes, *Mon. Weather Rev.*, 122, 927–945.

Janjic, Z. I., 2000: Comments on “Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models”, *J. Atmos. Sci.*, 57, 3686–3686.

Janjic, Z., 2001: Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, NOAA/NWS/NCEP Office Note No. 436, 61 p.

Janjic, Z. I., Gerrity, J. P., and S. Nickovic, 2001: An alternative approach to nonhydrostatic modeling, *Mon. Weather Rev.*, 129, 1164–1178.

Janjic, Z. I., 2003: A nonhydrostatic model based on a new approach, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 82, 271–285.

Janjic, Z., 2004: The NCEP WRF Core, in: 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle, Washington, 10–25 January, Amer. Meteor. Soc.

Janjic, Z. I., 2005: A unified model approach from meso to global scales, *Geophys. Res. Abstr.*, 7, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-05582.

Janjic, Z. I. and T. Black, 2007: A unified model approach from meso to global scales,

Geophys. Res. Abstr., 9, SRef-ID: 1607- 7962/gra/EGU2007-A-05025.

Janjic, Z., 2009: Further development of the unified multiscale Eulerian model for a broad range of spatial and temporal scales within the new National Environmental Modeling System, EGU General Assembly, April 19-24, Vienna, Austria, EGU2009-1587.

Janjic, Z., Gall, R. and M. E. Pyle, 2010: Scientific Documentation for NMM Solver, NCAR Technical Note, NCAR/TN-477+STR, 54p.

Janjic, Z., Janjic, T. and R. Vasic, 2011: A Class of conservative fourth order advection schemes and impact of enhanced formal accuracy on extended range forecasts, Mon. Weather Rev., 0 (null), doi:10.1175/2010MWR3448.1.

Janjic, Z. and R. Gall, 2012: Scientific Documentation on the NCEP Nonhydrostatic Multiscale Model on the B grid (NMMB). Part 1 Dynamics, NCAR Technical Note, NCAR/TN-489+STR, 75 p.

Jockel, P., Sander, R., Kerkweg, A., Tost, H. and J. Lelieveld, 2005: Technical Note: The Modular Earth Submodel System (MESSy) – a new approach towards Earth System Modeling, Atmospheric Chemistry and Physics, 5, 433-444.

Jones, J., 1997: Global Hydrology: Processes, Resources and Environmental Management, Longman, England.

Kouwen, N., Soulis, E., Pietroniro, A., Donald, J., and R. Harrington, 1993: Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modeling, J. Water Resour. Plann. Manage., 119, 3, 289–305.

Kuchment, L. S., 2004: The Hydrological Cycle and Human Impact on it, in: Water Resources Management, Hoekstra, A. Y. and H. H. G. Savenije (Eds.), in: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK.

Lacis, A. A. and J. Hansen, 1974: A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere, J. Atmos. Sci., 31, 118–133.

Lehner, B., Verdin, K. and A. Jarvis, 2006: HydroSHEDS Technical Documentation, World Wildlife Fund US, Washington, DC.

Liggett, J. A. and J. A. Cunge, 1977: Numerical methods of solution of the unsteady flow equations, in: Unsteady Flow in Open Channels, Mahmood, K., and Yevjevich, V. (Eds.), Water Resources Publications, Colorado.

Linsley, R. K. and N. H. Crawford, 1960: Computation of synthetic storm flow record on a digital computer, Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub., 51, 526-538.

Loague, K. M. and R. A. Freeze, 1985: A comparison of rainfall-runoff modelling techniques on small upland catchments, Water Resources Research, 21(2), 229-248.

Lynch, D. and W. Gray, 1979: A wave equation model for finite element tidal computations, Computer and Fluids 7, 207-228.

Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of Turbulence closure models for planetary boundary layers, Journal of the Atmospheric Sciences, 31, 1791-1806.

Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for

- geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 4, 851–875.
- Mesinger, F., 1973: A method for construction of second-order accuracy difference schemes permitting no false two-grid-interval wave in the height field, *Tellus* 25, 444–458.
- Mesinger, F., 1977: Forward-backward scheme, and its use in a limited area model. *Beitr. Phys. Atmos.*, 50, 200–210.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmo-spheres: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave, *J. Geophys. Res.*, 102, 16663–16682.
- Monin, A. S. and A. M. Obukhov, 1954: Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremesivaniya v prizemnom sloe atmosfery, *Trudy geofiz. inst. AN SSSR*, 24, 163–187.
- Mulligan, M., 2004: Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity, chapter Modelling Catchment Hydrology, John Wiley and Sons, 108–121.
- Mulvaney, T. J., 1851: On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment, *Trans. of the institution of Civil Engineers, Ireland*, 4, 2, 18.
- Nickovic, S., Gavrilov, M. B. and I. A. Tosic, 2002: Geostrophic adjustment on hexagonal grids, *Mon. Weather Rev.*, 130, 668–683.
- Nickovic, S., Pejanovic, G., Djurdjevic, V., Roskar, J. and M. Vujadinovic, 2010: HYPROM Hydrology Surface-Runoff Prognostic Model, *Water Resources Research*, 46, W11506.
- Nickovic, S., Djurdjevic, V., Vujadinovic, M., Janjic, Z. I., Curcic, M. and B. Rajkovic, 2011: Method for efficient prevention of gravity wave decoupling on rectangular semi-staggered grids, *Journal of Computational Physics*, 230, 5, 1865–1875.
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Dickinson, R. E. and L.E. Gulden, 2005: A simple TOP MODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in GCMs, *J. Geophys. Res.*, 110, D21106.
- Nišavić, A., Zarić, M., Gulan, M. and Lj. Dekić, 2014: Meteorološki uslovi u maju 2014. godine i mogućnost prognoziranja obilnih padavina, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, 28 str.
- Paniconi, C., Kleinfeldt, S., Deckmyn, J. and A. Giacomelli, 1999: Integrating GIS and Data Visualization Tools for Distributed Hydrologic Modeling, *Transactions in GIS*, 3, 2, 97–118.
- Perez, C., Haustein, K., Janjić, Z., Jorba, O., Huneeus, N., Baldasano, J. M., Black, T., Basart, S., Ničković, S., Miller, R.,L, Perlwitz, J.,P., Schulz, M. and M. Thomson, 2011: Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model – Part 1: Model description, annual simulations and evaluation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 13001–13027.
- Peters-Lidard, C. D., Zion, M. S. and E. F. Wood, 1997: A soil–vegetation–atmosphere transfer scheme for modeling spatially variable water and energy balance processes, *J. Geophys. Res.*, 102, D4, 4303–4324.

- Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F., Seo, D.-J. and D. Participants, 2004: Overall Distributed Model Intercomparison Project Results, *Journal of Hydrology*, 298, 1-4, 27–60.
- Richards, L. A., 1931: Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics* 1, 5, 318–333.
- Rockwood, D. M., 1958: Columbia basin streamflow routing by computer, *Journal of Waterways and Harbour Division*, ASCE, 84, 1, 1874.
- Ross, B. B., Contractor, D. N. and V. O. Shanholz, 1979: A finite element model of overland and channel flow for assessing the hydrological impact of land-use change, *J. of Hydrology*, 41, 11-30.
- Ruml, M., Vukovic, A., Vujadinovic, M., Djurdjevic, V., Rankovic-Vasic, Z., Atanackovic, Z., Sivev, B., Markovic, N., Matijasevic, S. and N. Petrovic, 2012: On the use of regional climate models: Implications of climate change for viticulture in Serbia, *Agricultural and Forest Meteorology*, 158, 53-62.
- Saint-Venant, A., 1871: Theorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction de marées dans leurs lits, *Comptes rendus des seances de l'Academie des Sciences*.
- Sangster, W. E., 1960: A method of representing the horizontal pressure force without reduction of station pressures to sea level, *Journal of Meteorology*, 17, 2, 166-176.
- Sherman, L. K., 1932: Streamflow from rainfall by the unit graph method, *Engineering News Record*, No. 108, 501-505.
- Stensrud, D. J., 2007: *Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models*, Cambridge University Press, 459 p.
- Stojicic, Dj., Vukovic, A., Vujadinovic, M., Djurdjevic, V. and D. Obratov, 2013: Flowering of woody taxa in Belgrade: observation and climate change impact, *Challenges in meteorology 3: Extreme weather and impact on society*, Croatian Meteorological Society, November 21-22, Zagreb, Croatia.
- Stricevic, R., Djurovic, N., Vukovic, A., Vujadinovic, M., Cosic, M. and B. Pejic, 2014: Application of AquaCrop model for yield and irrigation requirement estimation of sugar beet under climate change conditions in Serbia, *Journal of Agricultural Sciences*, 59, 3, 301-317.
- Sugawara, M., 1979: Automatic calibration of the tank model, *Hydrolog. Sci. J.*, 24, 375–388.
- Taschner, S., 2003: Flood modelling in the Ammer watershed using coupled meteorological and hydrological models, PhD Thesis, Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians, University of Munich, Germany.
- Torsvik, T., Thiem, Ø. and J. Berntsen, 2005: Stability analysis of geostrophic adjustment on hexagonal grids for regions with variable depth, *Mon. Weather Rev.* 133, 3335–3344.
- Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Cucco, A. and C. Solidoro, 2004: A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation, *J. Mar. Syst.*, 51, 123–145.

- USACE, 1998: HEC-RAS user's manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- Viterbo, P., 2002: A review of parametrization schemes for land surface processes, Meteorological Training Course Lecture Series, ECMWF, Shinfield Park, Reading, England, 1–49.
- Vlada Republike Srbije, 2007: Izveštaj o elementarnoj nepogodi – poplavi koja je zadesila Republiku Srbiju i merama koje su preduzete radi spasavanja stanovništva i odbrane ugroženih mesta do poplava, Službeni glasnik RS, 20/12, 333 str.
- Vujadinovic, M., Vukovic, A., Djurdjevic, V., Rankovic-Vasic, Z., Atanackovic, Z., Sivcev, B., Markovic, N. and N. Petrovic, 2012: Impact of Climate Change on Growing Season and Dormant Period Characteristics for the Balkan Region, *Acta Horticulturae*, 931, 87-94.
- Vuković, A., 2009: Verifikacija višeslojnog modela za prognozu temperature i vlažnosti tla, magistarska teza, Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, 73 str.
- Vukovic, A., Rajkovic, B. and Z. Janjic, 2010: Land Ice Sea Surface Model: Short Description and Verification, 5th International Congress on Environmental Modelling and Software, Ottawa, Ontario, Canada.
- Vuković, A., 2014: Modeliranje transporta atmosferskih čestica u integrisanom geofizičkom sistemu, doktorska teza, Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, 64 str.
- Vukovic, A., Vujadinovic, M., Djurdjevic, V., Stojicic, Dj., Djordjevic, M., Cvetkovic, B., Krzic, A., Rumli, M., Dacic, M. and D. Jaksic, 2014: Regional climate change and agriculture, with applications in Serbia, Milutin Milankovitch 135 Anniversary UNESCO Symposium, September 03-05, Belgrade, Serbia.
- Whitham, G. B., 1974: Linear and Nonlinear Waves, Wiley, New York, 636.
- Willems, P., 2000: Probabilistic modeling of the emission receiving surface waters, PhD. Thesis, Faculty of Engineering, Katholieke Universitet, Leuven, Belgium.
- Williams, J. R., Izaurralde, R. C. and E. M. Stegliche, 2008: Agricultural policy/environmental extender model theoretical documentation, BREC Report No. 2008-17, Blackland Research and Extension Center, 130 p.
- Wood, E. F., Sivapalan, M., Beven, K. J., and L. Band, 1988: Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling, *J. Hydrol.*, 102, 29-47.
- Young, P. C., 2002: Data-based mechanistic and topdown modelling, in: Proceedings International Environmental Modelling and Software Society Conference, vol. I, Lugano, Switzerland, 363–374.
- Zeng, X., 2001: Global vegetation root distribution for land modeling, *J. Hydrometeor.*, 2, 525-530.
- Zilitinkevich, S. S., 1965: Bulk characteristics of turbulence in the atmospheric planetary boundary layer, *Trudy GGO*, 167, 49–52.

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisana Mirjam Vujadinović Mandić
broj upisa 8023/2014

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Modeliranje hidrološkog ciklusa u integrisanom geofizičkom sistemu

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 25.06.2015.



Prilog 2.

**Izjava o istovetnosti štampane i elektronske
verzije doktorskog rada**

Ime i prezime autora	Mirjam Vujadinović Mandić
Broj upisa	8023/2014
Studijski program	Meteorologija
Naslov rada	Modeliranje hidrološkog ciklusa u integrisanom geofizičkom sistemu
Mentor	Borivoj Rajković

Potpisana Mirjam Vujadinović Mandić

izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma 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 stanicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 25.06.2015.



Prilog 3.

Izjava o korišćenju

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

Modeliranje transporta atmosferskih čestica u integrisanom geofizičkom sistemu

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo

2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

Potpis doktoranda

U Beogradu, 25.06.2015.



Biografija autora

Mirjam Vujadinović Mandić rođena je 08.04.1982. godine u Splitu, Republika Hrvatska. Osnovnu školu i gimnaziju završila je u Beogradu. Diplomirala je 30.10.2006. godine na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Meteorologija (srednja ocena 9.34, ocena diplomskog rada 10), na temu: Analiza advektivne šeme bazirane na principu parcijalnih parabola u okeanskom modelu POM. Diplomске akademske studije (master) završila je 2007. godine sa prosečnom ocenom 10,00 i ukupnom prosečnom ocenom tokom svih godina studiranja 9,42. Iste godine je upisala doktorske akademske studije. Tokom postdiplomskih studija bila je stipendista Ministarstva nauke Republike Srbije i od 2007. do 2009. pomagala u izvođenju vežbi na Katedri za meteorologiju, na predmetima Mikrometeorologija i Modeliranje atmosfere 1 i 2. Od 2009. godine zaposlena je na Poljoprivrednom fakultetu Univerziteta u Beogradu kao saradnik u nastavi, a 2010. je izabrana u zvanje asistenta za užu načnu oblast Meteorologija. Izvodi vežbe na predmetima Meteorologija i klimatologija i Klimatske promene i adaptacija biljaka. Od 2009. godine redovno učestvuje i u radu Podregionalnog centra za klimatske promene za jugoistočnu Evropu (Republički hidrometeorološki zavod Republike Srbije), u oblasti razvoja numeričkih modela za prognozu vremena i analizi klimatskih promena.

Mirjam Vujadinović Mandić se bavi naučnim radom iz oblasti numeričkog modeliranja atmosfere i hidrološkog ciklusa, kao i istraživanjima klimatskih promena i njihovog uticaja na različite sektore privrede. U dosadašnjem radu objavila je 9 radova iz M20 kategorije (8 radova M21 i jedan rad M23). Izlagala je više puta na međunarodnim konferencijama (više od 30 radova iz M30 kategorije). Od završetka osnovnih akademskih studija redovno je angažovana na projektima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja i na drugim državnim i međunarodnim projektima.