

Primljen / Received: 9.9.2020.

Ispravljen / Corrected: 18.2.2021.

Prihvaćen / Accepted: 9.4.2021.

Dostupno online / Available online: 10.5.2021.

Evaluacija daljinski opaženog produkta oborina u hidrološkom modelu sliva Bednje

Autori:

**Karlo Leskovar**, mag.ing.geoling.

Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

karlo.leskovar@gfv.unizg.hr

Autor za korespondenciju

**Petar Mrakužić**, univ.bacc.ing.amb.

Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

petar.mrakuzic@gmail.comIzv.prof.dr.sc. **Hrvoje Meaški**, dipl.ing.geol.

Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

hrvoje.measki@gfv.unizg.hr

Izvorni znanstveni rad

Karlo Leskovar, Petar Mrakužić, Hrvoje Meaški

Evaluacija daljinski opaženog produkta oborina u hidrološkom modelu sliva Bednje

U radu je provedena statistička i prostorna analiza oborina za period 2000. - 2018. godine na slivu rijeke Bednje, u svrhu čega su uspoređeni podaci s meteoroloških/kišomjernih postaja DHMZ-a s podacima u obliku daljinski opaženog oborinskog produkta - CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station). Rezultati analize u obliku hoda godišnjih visina oborina, mjesečnog hoda unutar godine i prostornog rasporeda te omjera ulaznih podataka iznad sliva pokazuju dobru korelaciju mjerene te daljinski opažene oborine. Kako bi se dodatno ocijenila kvaliteta daljinski opaženog produkta, izrađen je SWAT hidrološki model otjecanja.

Ključne riječi:

hidrološki model, daljinska opažanja, SWAT, CHIRPS, prostorna analiza oborina

Original scientific paper

Karlo Leskovar, Petar Mrakužić, Hrvoje Meaški

Evaluation of remotely sensed precipitation product in a hydrological model of the Bednja watershed

In this paper, a statistical and spatial analysis of precipitation for the period 2000-2018 for the Bednja basin was performed, where the measured data from meteorological and/or rainfall stations of Croatian Meteorological and Hydrological Service (DHMZ) were compared with the data in form of remotely sensed precipitation product - CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station). The results of the analysis in the form of the annual sum, monthly distribution within the year and the spatial distribution and input data ratio over the basin show a good correlation between the measured and remotely sensed precipitation. In order to further evaluate the quality of the remotely sensed product, a SWAT hydrological runoff model was created.

Key words:

hydrological model, remote sensing, SWAT, CHIRPS, spatial precipitation analysis

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Karlo Leskovar, Petar Mrakužić, Hrvoje Meaški

Bewertung des entfernt beobachteten Niederschlagsprodukts im hydrologischen Modell des Einzugsgebiets des Flusses Bednja

In der Arbeit wurde eine statistische und räumliche Analyse des Niederschlags für den Zeitraum von 2000 bis 2018 im Einzugsgebiet des Flusses Bednja durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die Daten von Wetter- / Regenwassermessstationen des DHMZ (Staatliches Hydrometeorologisches Institut) mit Daten in Form eines fernbeobachteten Niederschlagsprodukts - CHIRPS (Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station) verglichen. Die Ergebnisse der Analyse in Form des Verlaufs der jährlichen Niederschlagshöhen, des monatlichen Verlaufs innerhalb des Jahres und der räumlichen Verteilung sowie des Verhältnisses der eingehenden Daten oberhalb des Einzugsgebiets zeigen eine gute Korrelation zwischen dem gemessenen und dem entfernt beobachteten Niederschlag. Um die Qualität des entfernt beobachteten Produkts weiter zu bewerten, wurde ein hydrologisches SWAT-Abflussmodell entwickelt.

Schlüsselwörter:

hydrologisches Modell, Fernbeobachtung, SWAT, CHIRPS, räumliche Niederschlagsanalyse

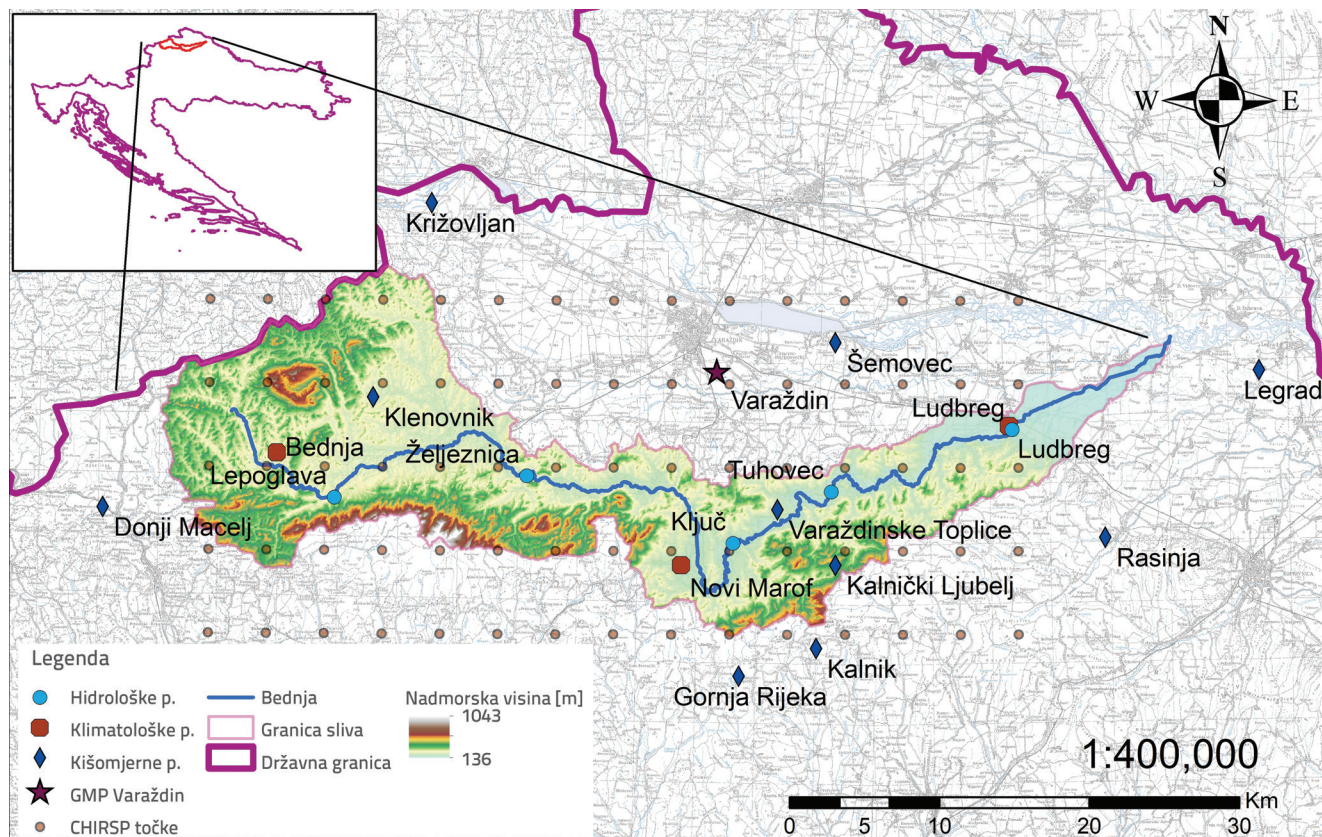
1. Uvod

U posljednje vrijeme sve češće se susrećemo s ekstremnim vremenskim uvjetima, posljedica kojih je nagli rast vodostaja na rijekama. Neki od nedavnih događaja vezanih za Hrvatsku, koji su karakterizirani velikim vodama, jesu oni iz svibnja/lipnja 2010. na Dunavu, iz studenog 2012. na Dravi i Muri te poplave na rijeci Savi u svibnju 2014. Predmet ovoga rada je sliv rijeke Bednje, koji je zbog mnogih naseljenih mjesta uz samo korito rijeke prethodno već bio predmet istraživanja s ciljem izrade karata opasnosti od poplava [1].

No, u ovom radu je volumen vodnog vala bio ključan za provedeno istraživanje i alternativni pristup u hidrološkom modeliranju zbog obilježja manjih slivova, gdje je vodni val često uzrokovan oborinom po čitavoj površini sliva [2,3]. Nadalje, zbog zanemarivih varijacija u koeficijentu otjecanja, posljedica čega je konstantan odnos efektivne i ukupne oborine [4], vodni val u ovom slučaju može biti dobar pokazatelj kod usporedbe oborine pale na sliv. Za stvaranje vodnog vala važno je nekoliko parametara, kao npr. oborine visokog intenziteta, vodni val koji nailazi pritokom, prostorna raspodjela kiše iznad slivnog područja, vrsta pokrova i vrsta tla unutar sliva, reljef itd. Vodni val definira nekoliko ključnih karakteristika: vršni protok, trajanje vodnog vala, vrijeme podizanja i spuštanja vodnog vala i/ili volumen vodnog vala [5, 6]. Kod analize oborina koje su pale na sliv ili izrade hidroloških modela, vrlo je važno postojanje dovoljnog broja mjernih točaka,

ali i njihov raspored unutar sliva ima važnu ulogu [7]. No, u ruralnim i brdovitim područjima često susrećemo nedostatak dovoljnog broja mjernih postaja - dijelom zbog rjeđe naseljenosti, dijelom zbog nepristupačnog reljefa - što kod hidrološkog modeliranja predstavlja ozbiljan problem.

Sliv rijeke Bednje, naprotiv, nije pogođen nedostatkom mjernih postaja, stoga je bio pogodan za ocjenu mogućnosti primjene daljinski opaženih oborinskih produkata (eng. *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station - CHIRPS*) [8] u hidrološkom modeliranju primjenom SWAT hidrološkog modela (eng. *Soil and Water Assessment Tool - SWAT*) [9]. SWAT hidrološki model široko je primjenjivan u svrhe hidrološkog modeliranja slivova [9-11], utjecaja klimatskih promjena na slivove [12], ali i usporedbe različitih oborinskih ulaznih podataka [13, 14]. Ovim se radom nastoji dati usporedba oborina mjerenih tradicionalno na meteorološkim (kišomjernim) postajama DHMZ-a s daljinski opaženim oborinskim produktom - CHIRPS u vidu statističke analize, vremenskog hoda, rasporeda unutar godine te prostornog rasporeda iznad sliva rijeke Bednje. Primjena SWAT hidrološkog modela u Hrvatskoj za sada nije dovoljno istražena, samo jedan rad [15] obrađuje ovu temu, a primjena daljinski opaženih oborinskih produkata u hidrološkom modeliranju u Hrvatskoj posve je neistražena. Prema tome, u sklopu ovog istraživanja ispitana je mogućnost primjene SWAT hidrološkog modela s mjerenim i daljinski opaženim ulaznim podacima oborina na primjeru sliva rijeke Bednje.



Slika 1. Geografska lokacija sliva Bednje

2. Podaci i metode

2.1. Hidrogeološke značajke

Promatrano područje nalazi se u sjeverozapadnoj Hrvatskoj, a obuhvaća sliv rijeke Bednje (slika 1.) koja je dio slivnog područja rijeke Drave, odnosno u širem kontekstu dio je dunavskoga sliva. Duljina glavnog toka rijeke Bednje je oko 103 km [16]. Rijeka Bednja čitavim tokom teče u smjeru zapad-istok, osim vrlo male devijacije kod Novog Marofa gdje najprije teče na jug, a zatim na sjever.

S obzirom na hidrogeološke značajke, razlikuju se tri osnovna dijela sliva [17,18]. Prvo je područje temeljnoga gorja (Ivanščica, Kalničko gorje i Ravna gora) koje je izgrađeno od karbonatnih stijena - pretežito dolomita, mezozojske starosti i sekundarne poroznosti. Debljina karbonatnog vodonosnika procjenjuju se na više stotina metara [17], a propusnost ovih stijena procijenjena je na 3 do 25 % [19]. Ostali hidrogeološki parametri zasada nisu dovoljno proučavani, ali zna se da bore i rasjedi daju temeljna strukturalna obilježja ovom dijelu slivnog područja. Drugo područje su sedimentni kompleksi tercijarne starosti, koji su posljedica spiranja i erozije starijih stijena. Ti sedimenti su vezani uz brežuljkasta pobrđa i manje potočne doline na padinama temeljnih gora.

Treće područje su naslage kvartarne starosti u nizinskom području uz vodotok rijeke Bednje. Danas je upravo to područje temeljna odlika rijeke Bednje jer se u dolini rijeke i njezinim pritocima talože šljunci, pijesci i gline holocenske starosti koji predstavljaju značajan aluvij Varaždinske županije. Aluvij je pretežno nastao trošenjem starijih stijena mezozojske i tercijarne starosti te nakupljanjem tog materijala u riječnim dolinama. U bazi prevladavaju šljunci i pijesci, a valutice su pretežno kvarcne, ali ima i tragova eruptivnih stijena te fragmenata vapnenca i dolomita [20]. S hidrogeološkog aspekta, aluvijalni sedimenti rijeke Bednje formiraju vodonosnike međuzrnske poroznosti, male debljine te lateralno i vertikalno heterogenog sastava. S obzirom na to da dominiraju sitnozrnate čestice, propusnost ovih naslaga je slaba, a obnavljanje podzemnih voda zbiva se prije svega infiltracijom oborina i procjeđivanjem iz korita vodotoka [21].

Glavni tok podzemne vode unutar sliva rijeke Bednje prati smjer toka rijeke Bednje, a tok podzemne vode u regionalnom mjerilu kontrolira recentni strukturalni sklop, odnosno rasjedi i geološke strukture [22].

2.2. Hidrološke značajke

Sliv rijeke Bednje definiran je topografskom razvodnicom. Površina sliva od 596 km² i srednja širina porječja od približno 5,8 km definirane su prethodnim istraživanjima [17]. Slivno područje je pretežno izduženo te se proteže od Trakošćana na zapadu pa do Ludbrega na istoku. Uglavnom se radi o pretežito nizinskom području koje je na zapadu omeđeno s Maceljskim gorjem, na jugu s Ivanščicom i Kalničkim gorjem, a na sjeveru s manjim brežuljcima koji predstavljaju vododijelnicu prema vodotoku Plitvici. Na istoku se nalazi ušće u rijeku Dravu.

Sam početak toka rijeke Bednje nije precizno određen jer u literaturi postoje različiti navodi - tok koji izvire u Brezovoj gori, izvor u Ravnoj gori kod naselja Bednjica, izvor u Kamenj gorici, istjecanjem vode iz Trakošćanskog jezera. Ušće Bednje u rijeku Dravu nalazi se kod naselja Mali Bukovec.

Rijeka Bednja je u uzdužnom profilu pretežito nizinska rijeka s vrlo malim uzdužnim padom. Međutim, pripadajući sliv je gotovo isključivo brdski [16]. Duž toka Bednje razlikuju se gornji tok (do ušća Željeznice), srednji tok (do ušća Velinečkog potoka) te donji tok do ušća u Dravu. Gornji tok ima lepezasti oblik sliva, što zajedno s postojećim intenzitetom padalina rezultira velikom i brzom koncentracijom dotoka koji uvijek formira poplavne valove [1]. Bednja čitavim gornjim i srednjim tokom protječe koritom koje je oblikovano u glinovitom materijalu s primjesama pijeska i praha. Takav materijal korita vrlo je podložan eroziji pa se brže protjecanje vode rješavalo povećavanjem profila korita kao i presijecanjem meandara. Donji tok rijeke Bednje je izrazito ravničarski kraj, pretežno pod oranicama i livadama. Erozijski procesi su prisutni na čitavom slivu.

Na slivu rijeke Bednje postoji pet aktivnih hidroloških postaja (tablica 1.): Lepoglava, Željeznica, Ključ, Tuhovec i Ludbreg. Vodostajna postaja Lepoglava počela je s radom 1986. godine, a 2005. postavljen je limnigraf. Vodostajna postaja Željeznica počela je s radom 1958. godine, 1960. je postavljen limnigraf, a od 2006. uspostavljena je daljinska dojava vodostaja. Vodostajna postaja Ključ počela je s radom 1986. godine, a od 2002. u funkciji je elektronički limnigraf. Vodostajna postaja Tuhovec počela je s radom 1957. godine, ukinuta je 1975. te ponovno uspostavljena 1979., a 2003. je s radom počeo elektronički limnigraf. Vodostajna postaja Ludbreg počela je s radom 1938. godine, a 2006. je uspostavljena daljinska dojava vodostaja.

Tablica 1. Osnovni statistički pokazatelji dnevnih protoka na vodostajnim postajama na rijeci Bednji (2000. - 2018.)

Pokazatelji	Broj podataka	Ar. sred.	St. devijacija	Min.	25 %	50 %	75 %	Maks.
Vod. postaje								
Lepoglava	6940	1,21	2,70	0,03	0,24	0,50	1,07	44,7
Željeznica	6940	3,30	6,38	0,21	0,80	1,44	2,91	123,0
Ključ	6435	4,91	8,86	0,33	1,33	2,21	4,20	90,2
Tuhovec	6549	5,08	9,19	0,55	1,51	2,31	4,35	103,0
Ludbreg	6940	6,10	10,09	0,43	1,90	2,95	5,68	116,0

Prema do sada provedenim hidrološkim istraživanjima [1], Bednja je izrazito bujični vodotok, a protok izravno ovisi o količini padalina, ali i o otapanju snijega na izvorišnom dijelu Bednje. Najveći protoci se javljaju u proljeće (ožujak i travanj) kad se uz proljetne kiše topi snijeg [23]. Česta su pojava i olujni pljuskovi (obično u kolovozu i rujnu) koji uzrokuju iznimno nagli porast protoka, kao i dugotrajne i obilne kiše u rujnu i listopadu. Analizom protoka na hidrološkim postajama na rijeci Bednji za razdoblje 2000. - 2018., najmanji protok (0,032 m³/s) izmjeren je 8. kolovoza 2000. na najzuvodnijoj postaji Lepoglava, a najveći protok (123 m³/s) izmjeren je 20. rujna 2017. na postaji Željeznica. Zanimljivo, istoga je dana postaja Ludbreg mjerila 76,1 m³/s, a sljedećeg dana 85,4 m³/s, što je vjerojatno posljedica izlivanja iz korita uzvodno od postaje Ludbreg. Najveći protok na postaji Ludbreg izmjeren je 14. rujna 2014., a iznosio je 116 m³/s. Iz provedene analize može se uočiti da su posljednjih godina sve češće ekstremni protoci tijekom jeseni, što dijelom pokazuje nešto značajniji utjecaj kiše, a nešto manji utjecaj snijega na protoke rijeke Bednje.

2.3. Meteorološki podaci i značajke

Meteorološki podaci za razdoblje od 2000. do 2018. godine dobiveni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda [24] (dalje DHMZ). Na području samog sliva Bednje postoje tri klimatološke (Bednja, Novi Marof i Ludbreg) i tri kišomjerne postaje (Klenovnik, Varaždinske Toplice i Kalnički Ljubelj). U neposrednoj blizini sliva nalazi još sedam kišomjernih postaja (Križovljan, Donji Macelj, Kalnik, Gornja Rijeka, Šemovec, Rasinja i Legrad) te glavna meteorološka postaja Varaždin [24] (slika

1.). U statističkoj i prostornoj analizi oborina, radi određivanja prosječnih vrijednosti, korišteni su podaci sa svih 14 postaja. Prema podacima s klimatološke postaje Ludbreg, klima na širem ludbreškom području je umjereno toplo-kišna s toplim ljetima, gdje temperatura najtoplije mjeseca ne prelazi 22 °C, a temperature najhladnijeg mjeseca mogu biti između -3 °C i 18 °C. Sušnih razdoblja nema. Oborine variraju iz godine u godinu, primjerice 2012. iznosile su 716,9 mm, 2013. 1196,8 mm, a 2014. godine 1376,4 mm. U toplom dijelu godine (travanj - rujna) padne 55 - 60 % ukupnih oborina, a 40 - 45 % oborina padne u hladnom dijelu godine (listopad - ožujak). Snježni pokrivač javlja se između 45 i 50 dana tijekom zime te se u prosjeku očekuje 10 ili više dana sa snježnim pokrivačem minimalne visine 1 cm. Dominiraju vjetrovi južnog i jugozapadnog te sjevernog i sjeveroistočnog kvadranta. Proljeće je najvjetrovitije, a tijekom ljeta se javljaju vjetrovi slabih učestalosti.

CHIRPS [8] podatke moguće je preuzeti u nekoliko različitih rasterskih oblika (.tiff, .netcdf, .bil i .png), a u ovom istraživanju korišteni su podaci globalne pokrivenosti u dnevnom koraku prostorne rezolucije 0.05° u .netcdf obliku. Budući da su .netcdf podaci višeslojni rasteri, gdje svaki sloj predstavlja jedno mjerenje (u ovom slučaju jedan dan u godini), preuzeto je 19 datoteka (2000. - 2018.).

2.4. SWAT model i ulazni podaci

SWAT (eng. *Soil & Water Assessment Tool*) [9, 25] fizikalno je baziran hidrološki model razvijen sa svrhom evaluacije promjena u hidrološkim procesima, riječne erozije te kakvoće vode u velikim slivovima [10, 26]. Simulacija modelom moguća

Tablica 2. Osnovni statistički pokazatelji mjerenih (DHMZ) i daljinski opaženih (CHIRPS) dnevnih oborina (2000. - 2018.)

	Broj podataka	Ar. sred.	St. devijacija	Min	25 %	50 %	75 %	Maks.
Bednja	4628	2,88	7,51	0	0	0	1,1	80,0
Ludbreg	6940	2,45	6,51	0	0	0	1,1	83,6
Novi Marof	6850	2,36	6,12	0	0	0	1,0	68,1
Varaždin	6940	2,32	6,29	0	0	0	0,9	95,5
Donji Macelj	6940	2,82	7,46	0	0	0	1,0	90,2
Gornja Rijeka	6940	2,54	6,79	0	0	0	1,2	85,8
Kalnički Ljubelj	6940	2,79	7,34	0	0	0	1,0	89,3
Kalnik	6940	2,67	7,05	0	0	0	1,2	79,3
Klenovnik	6573	2,74	6,90	0	0	0	1,2	94,7
Križovljan	6928	2,57	6,62	0	0	0	1,0	99,2
Legrad	6940	2,08	5,54	0	0	0	0,8	64,6
Rasinja	6940	2,25	6,07	0	0	0	0,9	98,2
Šemovec	6911	2,28	6,22	0	0	0	0,9	92,3
Varaždinske Toplice	6940	2,57	6,95	0	0	0	1,0	88,8
METEO_AVG	6940	2,51	6,06	0	0	0,01	1,5	80,8
CHIRPS_AVG	6940	2,47	6,43	0	0	0	1,4	98,4

Tablica 3. Ulazni podaci potrebni za izradu SWAT hidrološkog modela otjecanja

Ulazni podaci	Izvor	Prostorna rezolucija
Digitalni model terena (DEM)	Copernicus - EU DEM v 1.1, https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1	25 m x 25 m
Vrste tla	EEA - European Soil Data Centre (ESDAC) [27], https://esdac.jrc.ec.europa.eu/	1 km x 1 km
Podaci o površinskom pokrovu i korištenju tla	European Environment Agency, Corine Land Cover (CLC) 2012 ver. 2020, https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012	100 m x 100 m
Oborine	Mjereno - DHMZ, 2020, 1 glavna, 3 klimatološke, 10 kišomjernih postaja Daljinsko opažanje - Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station [28], ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0	- / - 0,05° x 0,05°
Klimatski podaci - temperatura, relativna vlažnost, brzina vjetra	Mjereno - DHMZ, 2020, 1 glavna, 3 klimatološke postaje	- /
Klimatski podaci - Sunčevo zračenje	Daljinski opaženo - National Centers for Environmental Prediction (NCEP) [29] - solar radiation, https://globalweather.tamu.edu/#pubs	0,5° x 0,5°

je na godišnjem, mjesečnom, dnevnom i satnom vremenskom koraku. Strukturno gledano, model dijeli sliv na podslivove te dalje na hidrološke jedinice - HRU (eng. *Hydrologic Response Units*) koje karakteriziraju jedinstvena svojstva vezana za korištenje zemljišta i pokrov (eng. *Land Use/Land Cover*), vrstu tla (eng. *Soil*) te topografske karakteristike - nagib terena (eng. *Slope*). Hidrološki ciklus unutar svakog HRU-a određen je bilancom vode, izraz (1) koja je kontrolirana klimatskim parametrima (oborina, maksimalna i minimalna dnevna temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, brzina vjetra) te Sunčevim zračenjem.

$$SW_t = SW + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

gdje je:

SW_t - volumen vode u jediničnom volumenu tla u trenutku t ,

SW - volumen vode u tlu u trenutku $t-1$

t - vrijeme

R - visina oborina

Q - otjecanje

ET - evapotranspiracija

P - perkolacija u duboki vodonosnik,

QR - procjedaivanje iz plitkog vodonosnika u vodotok, svi parametri su u mm [9].

Kod izrade modela korištena je inačica SWAT2012 zajedno s ArcSWAT 2012.10.23 dodatkom za ArcMap koji omogućuje oblikovanje SWAT modela sliva u grafičkom sučelju. Popis ulaznih podataka te izvora prikazan je u tablici 3.

Kao ulazni parametar pri određivanju smjera toka i podjele na podslivove primjenjen je digitalni model terena prostorne rezolucije 25 x 25 m. Pri određivanju hidroloških jedinica (HRU-ova) korišteni su podaci u površinskom pokrovu (Corine Land Cover) i podaci o vrsti tla prema FAO85 klasifikaciji. Uz podatke o pokrovu i vrsti tla, SWAT tijekom podjele na HRU-ove koristi i

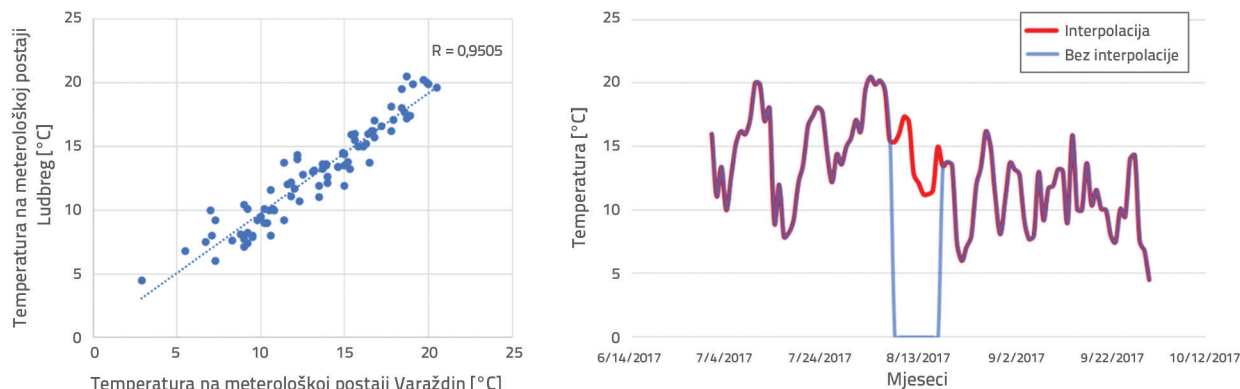
digitalni model terena za potrebe klasifikacije nagiba terena. S obzirom na pretežito nizinski karakter sliva i umjerenu razliku između najviše i najniže točke u slivu (oko 900 m), nagibi terena podijeljeni su u tri klase. Nakon provedene podjele, sliv rijeke Bednje podijeljen je u 12 podslivova i 148 hidroloških jedinica.

2.5. Nadopunjavanje vremenskih nizova podataka

S obzirom na to da simulacije unutar SWAT programa zahtijevaju kontinuiranost ulaznih podataka, trebalo je pronaći dovoljno dugo razdoblje bez značajnih prekida u mjerenju te upotpuniti podatke koji nedostaju ili primjenom odgovarajućih interpolacijskih postupaka ili odabirom drugih dostupnih podataka.

Preklapanjem klimatoloških podataka sa svih mjernih postaja unutar sliva, utvrđeno je idealno razdoblje od 1. siječnja 2008. do 31. prosinca 2017., kada su prekidi mjerenja na postajama minimalni. Dodatnom analizom podataka s mjernih postaja unutar sliva (Klenovnik, Bednja, Kalnički Ljubelj, Varaždinske Toplice, Ludbreg i Novi Marof), uočeno je da u podacima klimatološke postaje Novi Marof dolazi do čestih prekida u mjerenjima koja mogu predstavljati poteškoće pri izradi hidrološkog modela, a da na postaji Ludbreg nedostaju određeni vremenski nizovi.

Za meteorološku postaju Novi Marof utvrđeno je kako se u blizini nalaze postaje Varaždinske Toplice i Kalnički Ljubelj s potpunim podacima opažanja, pa je ta činjenica iskorištena kako bi se model nadomjestio potrebnim podacima. Što se tiče klimatološke postaje Ludbreg, niti jedna druga postaja se nije mogla iskoristiti kao njena zamjena, ali je dodatnom analizom utvrđena vrlo dobra korelacijska veza s klimatološkom postajom Varaždin (koeficijent korelacije 0,95). To je iskorišteno kako bi se nedostajući podaci na postaji Ludbreg nadopunili, odnosno interpolirali uz pomoć podataka s postaje Varaždin (slika 2.).



Slika 2. Korelacija meteoroloških postaja Ludbreg i Varaždin za razdoblje srpanj - rujan 2017.

Podaci o jačini Sunčevog zračenja (W/m^2) nisu bili dostupni (dobiveni su podaci o insolaciji, što nije dovoljno za izradu modela), pa je primijenjena opcija simuliranja podataka prema bazi podataka. Naime, unos potrebnih klimatskih podataka u SWAT model moguć je kao direktni vremenski niz mjerenja ili kao simulacija. SWAT simulacije klimatskih podataka izvodi na temelju baza podataka, a u ovom slučaju upotrijebljena je baza Climate Forecast System Reanalysis [29] (dalje CFSR), koja je uspješno korištena u nekoliko istraživanja [14,30-32] kao jedini ulazni parametar u SWAT model.

2.6. SWAT-CUP kalibracijski softver

SWAT-CUP (eng. *Calibration Uncertainty Programs* - SWAT) [33] je program namijenjen kalibraciji i ocjeni osjetljivosti (eng. *Sensitivity Analysis*) parametara SWAT modela. U ovom radu primijenjena je metoda SUFI-2 (eng. *Sequential Uncertainty Fitting 2*). SUFI-2 nudi do 10 različitih statističkih pokazatelja kvalitete kalibracije, u ovom radu poklapanje modeliranih i mjerenih protoka kao glavni pokazatelj odabrani su koeficijent determinacije R^2 , izraz (2) i koeficijent NSE, izraz (3) (eng. *Nash-Sutcliffe efficiency*) [34]. R^2 [35] znatno ovisi o vršnim protocima, pa je odabran kao značajan pokazatelj kvalitete modela bujične rijeke kao što je Bednja.

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (2)$$

gdje je:

- $Q_{m,i}$ - mjereni protok u trenutku
- \bar{Q}_m - srednji mjereni protok
- $Q_{s,i}$ - modelirani protok u trenutku
- \bar{Q}_s - srednji modelirani protok.

NSE određuje važnost rezidualne varijancije između modeliranih i mjerenih protoka [34, 35].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (3)$$

gdje je:

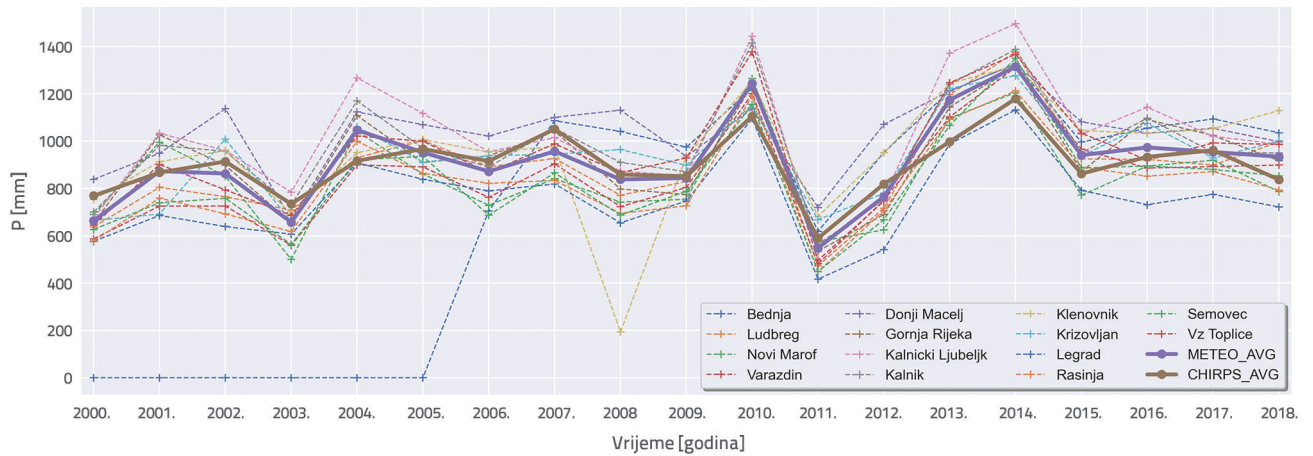
- $Q_{m,i} = Q_m$ - mjereni protok u trenutku
- Q_s - modelirani protok u trenutku
- \bar{Q}_m - srednji mjereni protok.

Vrijednosti R^2 [35] te NSE [36] iznad 0,5 smatraju se zadovoljavajućima, a vrijednosti NSE između 0,75 označuju izuzetno pouzdan model [37]. Dodatno su promatrani p-factor i r-factor - parametri vezani direktno za SWAT-CUP. P-faktor mjera je dijela podataka unutar 95PPU pojasa (vrijednosti modeliranih protoka između 2,5 i 97,5 % pouzdanosti), a r-faktor označuje širinu 95PPU pojasa [10]. Pri modeliranju protoka, u [10] se navode vrijednosti p-faktora između 0,7 i 0,75 kao odgovarajući, a u [38, 39], prema istom autoru, vrijednosti r-faktora oko 1,5 smatraju se poželjnim.

3. Usporedba ulaznog parametra oborina - mjerenja na postajama DHMZ-a i daljinski opaženi produkt CHIRPS

3.1. Statistička analiza oborina

Kako bi se ocijenila mogućnost primjene daljinski opaženih oborina (produkt CHIRPS), uspoređene su srednje vrijednosti daljinski opaženih oborina za područje sliva Bednja (aritmetička sredina 75 rasterskih točaka unutar i uz sliv s mjerenim oborinama na GMP Varaždin, klimatološkim i kišomjernim postajama DHMZ-a (aritmetička sredina 14 postaja (slika 1.) za period 2000. - 2018.). Provedena je statistička analiza (tablica 2.) dnevnih visina oborina, srednje vrijednosti mjerenih oborina na kišomjernim postajama (METEO_AVG) te srednje vrijednosti CHIRPS daljinski opaženih oborina (CHIRPS_AVG). Daljinski opaženi produkt za promatrano područje daje nešto nižu srednju godišnju visinu oborina za period 2000. - 2018., uz niže raspršenje podataka (133.96 naprema 192.22) (tablica 4.). Nadalje, mjerene oborine imaju izraženije ekstreme (minimum i maksimum), a kvantili su za oba načina opažanja vrlo slični. Grafički prikaz ukupnih godišnjih oborina (slika 3.) dodatno potvrđuje dobro poklapanje srednje daljinski opažene oborine (produkta CHIRPS) te aritmetičke sredine oborina mjerenih



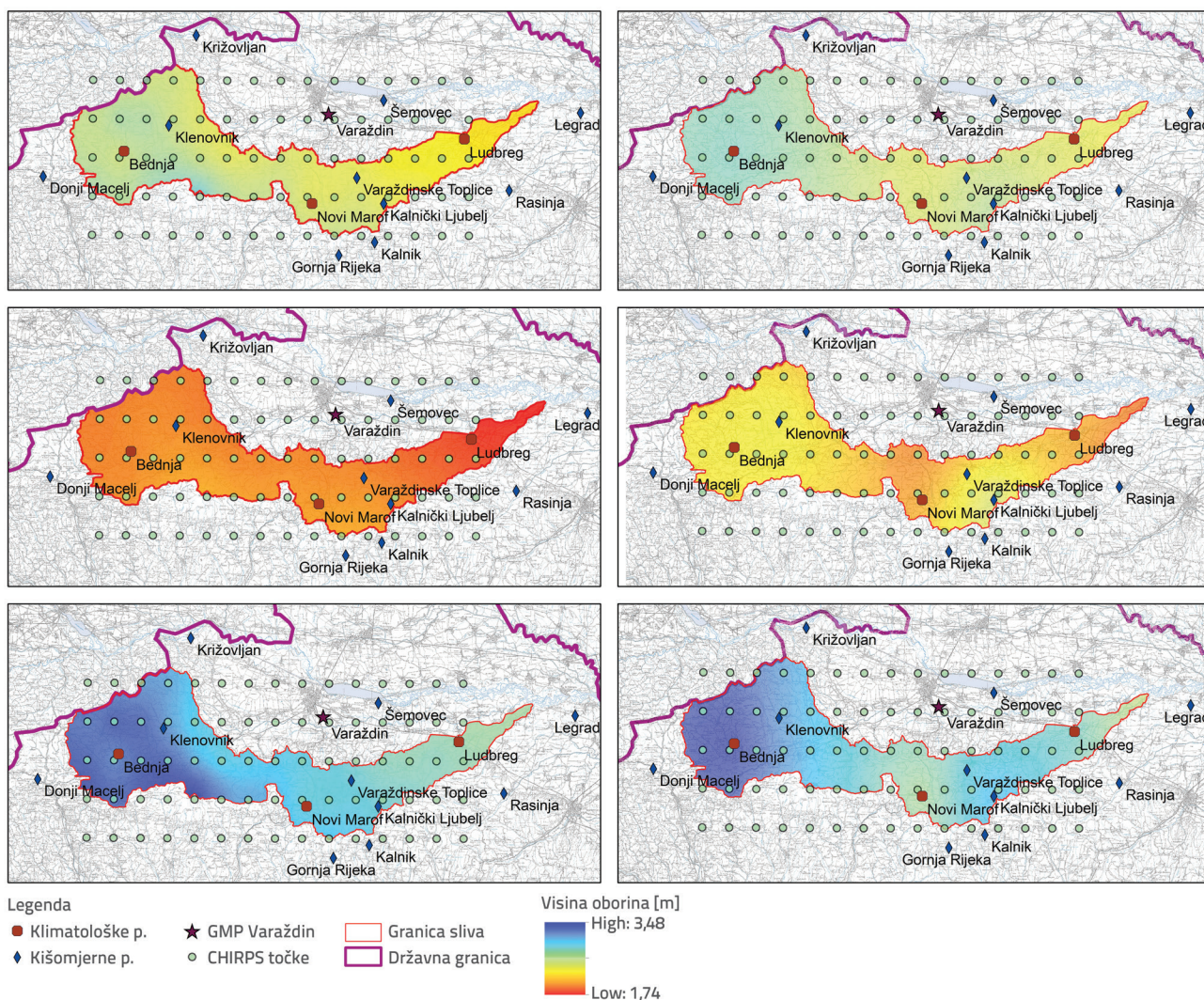
Slika 3. Hod ukupnih godišnjih oborina u periodu 2000. - 2018. godine



Slika 4. Godišnji hod mjesečnih visina oborina na postajama DHMZ-a, srednja vrijednost svih meteoroloških postaja (METEO_AVG) i srednja vrijednost daljinski opaženog produkta CHIRPS (CHIRPS_AVG) za period 2000. - 2018. godine

Tablica 4. Osnovni statistički pokazatelji srednjih mjerenih (DHMZ) i srednjih daljinski opaženih (CHIRPS) oborina (2000. - 2018.); mjesečni, godišnji te mjesečni korak po sezonama

	Broj podataka	Ar. sred.	St. dev.	Min.	25 %	50 %	75 %	Maks.
METEO_mj	228	76,37	45,80	0,42	45,94	70,19	102,11	257,93
CHIRPS_mj	228	75,12	37,78	6,69	51,67	70,41	92,94	214,31
METEO_DRY_mj	114	64,00	40,91	0,42	35,21	58,09	91,32	223,44
METEO_WET_mj	114	88,75	47,24	4,30	57,11	80,35	115,18	257,93
CHIRPS_DRY_mj	114	58,30	29,94	6,69	36,31	56,11	76,27	174,82
CHIRPS_WET_mj	114	91,94	37,41	23,68	64,56	85,88	110,99	214,31
METEO_god	19	916,50	192,22	548,26	840,94	934,07	965,11	1314,42
CHIRPS_god	19	901,48	133,36	589,87	844,21	913,82	963,96	1179,14



Slika 5. Prostorna interpolacija srednje dnevne oborine [mm]; CHIRPS produkt (lijevo) i mjerene oborine (desno); na razini cijele godine (gore), na razini sušne sezone (sredina) i na razini kišne sezone (dolje)

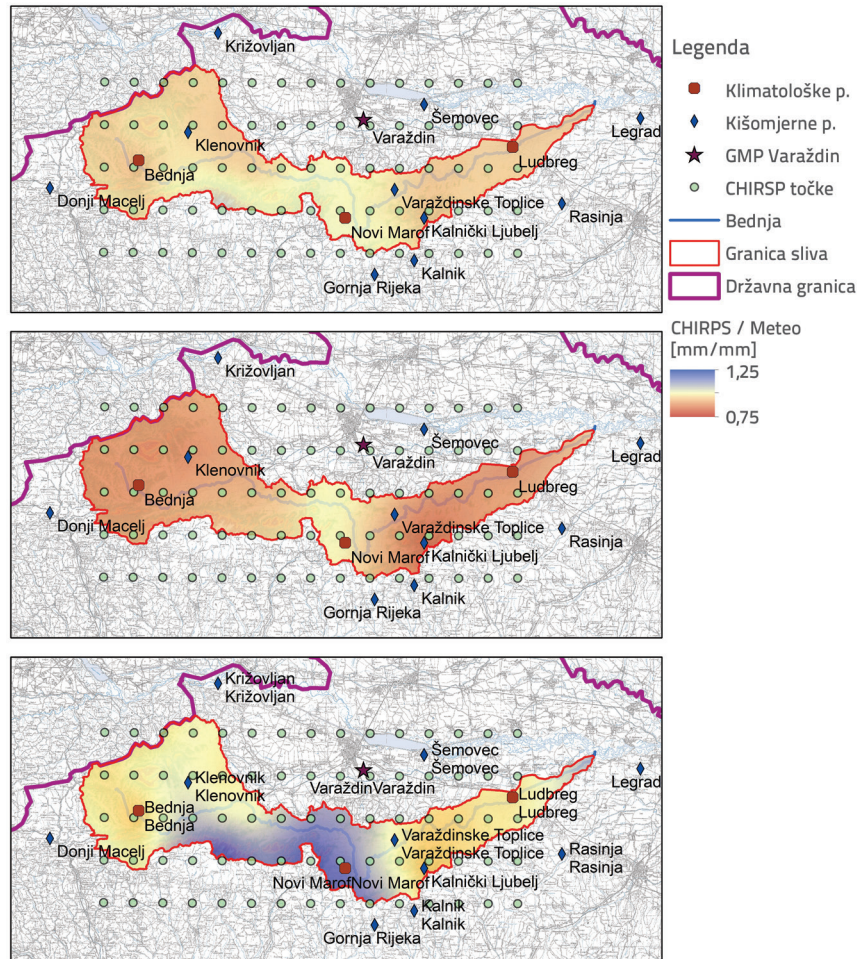
meteorološkim i/ili kišomjernim postajama. Valja napomenuti odstupanje daljinski opaženih oborina u kišovitim godinama (2010., 2013., 2014.). Iznos medijana srednje mjesečne oborine na mjernim postajama gotovo je identičan medijanu srednje mjesečne oborine daljinski opaženog produkta (slika 4.), dok je aritmetička sredina kao i kod ukupnih godišnjih visina nešto niža za daljinski opažene oborine nego kod mjerenih oborina.

Analizom hoda mjesečnih visina oborina kroz godinu (slika 4.) vidljivo je da hidrološku godinu na promatranom slivu karakteriziraju dva perioda, kišni (svibanj - listopad) te sušni (studenj - travanj). Kišni dio godine karakteriziraju mjeseci s ukupnom mjesečnom visinom oborina iznad 70 mm, lokalno dosežući čak 120 mm u rujnu na nekim postajama, a prosječne mjesečne visine za vrijeme sušnog dijela godine u rasponu su između 60 - 65 mm mjesečno. Mjesec s najviše oborina obično je rujna ($P_{sr_rujan} = 113 \text{ mm}$), a najniže vrijednosti bilježe siječanj ($P_{sr_siječanj} = 51 \text{ mm}$) i ožujak ($P_{sr_ožujak} = 58 \text{ mm}$).

3.2. Prostorna analiza oborina

Radi jasnijeg prikaza oborina palih na sliv, analizirane su prostorno. Analiza prostorne raspodjele sastoji se od: analize srednje dnevne oborine promatranog perioda, analize srednje dnevne oborine za vrijeme sušnog razdoblja godine te analize srednje dnevne oborine za vrijeme kišom bogatijeg dijela godine (slika 5.), za svaki od načina opažanja/mjerenja, tj. ukupno šest komponenata. U tu svrhu određene su srednje dnevne oborine promatranog perioda na godišnjoj razini, za vrijeme sušnog dijela godine te za vrijeme kišnog dijela godine. Rezultati su izračunani Python 3 skriptom, a vizualizacija je odrađena u ArcGIS-u pomoću prostorne interpolacije primjenom kriging metode [40].

Vizualnom interpretacijom može se uočiti sličan prostorni raspored oborina iznad sliva, s nešto većim rasponom minimalne i maksimalne srednje dnevne oborine kod daljinski opaženog produkta (1.74 mm - 3.48 mm), nego kod meteoroloških mjerenja (1.88 mm - 3.42 mm). Nadalje, kod srednje oborine na godišnjoj razini (slika 5. - gore) i tijekom suhog dijela godine (slika 5. - sredina) kod daljinski opaženog produkta uočava se znatno ujednačeniji prostorni raspored oborine iznad sliva, što može biti posljedica većeg broja točaka u rasteru tijekom interpolacije. Kod meteoroloških mjerenja, prostorne varijacije



Slika 6. Omjer daljinski opažene oborine (CHIRPS) i oborine mjerene na meteorološkim postajama; na godišnjoj razini (gore), tijekom sušnog perioda (sredina), tijekom kišnog perioda (dolje)

nešto su izraženije uz zapadne brežuljaste dijelove te uz istočni nizinski dio oko Ludbrega. Kod kišnog dijela godine, situacija se mijenja, tj. prostorni raspored daljinski opaženog produkta vrlo je sličan onom meteoroloških mjerenja - uz zapadni brežuljkasti dio sliva mjerimo relativno više oborina, a nizvodno se visine oborina linearno smanjuju kod obje vrste ulaznih podataka.

Kao završni korak, analiziran je omjer daljinski opaženog produkta (CHIRPS) s meteorološkim mjerenjima oborina, tako da je izračunao omjer rastera daljinski opaženog produkta CHIRPS i oborine mjerene na postajama DHMZ-a. Poklapanje daljinski opaženog produkta s mjerenim oborinama bolja je, što je omjer bliži jedinici. Dobiveni omjer iznad jedan označava precjenjivanje daljinski opaženog produkta u odnosu na meteorološka mjerenja, a dobiveni omjer ispod jedan označava područja gdje daljinski opažen produkt pokazuje manje visine oborina od meteoroloških mjerenja.

Kod srednje dnevne oborine na godišnjoj razini i promatranjem sušnog perioda može se vidjeti vrlo dobro slaganje u središnjem dijelu sliva, oko područja Novog Marofa, a uz rubne dijelove daljinski opaženi produkt pokazuje niže visine oborina.

Promatrajući kišni dio godine, situacija je obrnuta, u središnjem dijelu vidljivo je precjenjivanje (plavo) daljinski opaženog produkta (CHIRPS), a u rubnim dijelovima sliva omjer je oko 1.00, što označuje vrlo dobro poklapanje daljinskih opažanja i meteoroloških mjerenja (slika 6.).

4. Rezultati hidrološkog modela otjecanja i rasprava

Mogućnost primjene daljinski opaženih oborina (CHIRPS produkt), kad je riječ o opažanju volumena vodnog vala, ispitana je SWAT hidrološkim modelom. Kako model u početnom obliku vrlo često ne daje zadovoljavajući rezultat, važno je provesti njegovu kalibraciju [10, 41, 42], a rezultat se validira na nezavisnom razdoblju koje nije obuhvaćeno prethodnom kalibracijom.

Prije provođenja kalibracije/validacije, važno je odabrati odgovarajuća razdoblja. Stoga je analiziran hidrogram najnižvodnije hidrološke postaje u hidrološkom modelu (Ludbreg). Kako bi proces kalibracije/validacije bio što kvalitetniji i pouzdaniji, vrlo je važno da odabrana razdoblja sadrže podjednak broj kišnih i sušnih godina, tj. trebaju biti statistički što je moguće sličnija [5, 20] (te osobna komunikacija s dr. K. Abbaspourom). Kišne godine karakteriziraju hidrogrami izraženih vršnih tokova (eng. peak) te izrazitog trajanja (veći volumen vodnog vala), a sušne godine karakteriziraju hidrogrami s manje izraženih vršnim protokom i, općenito, vrlo niskog baznog toka

[2]. Hidrogram postaje Ludbreg analiziran je vizualno i statistički te je odabrano razdoblje od 2008. do 2014. kao kalibracijsko ($Q_{sr} = 6,76 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{stdev} = 11,66 \text{ m}^3/\text{s}$), a pouzdanost se modela ocjenjuje na razdoblje od 2015. do 2017. ($Q_{sr} = 6,62 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{stdev} = 11,30 \text{ m}^3/\text{s}$). Kalibracijsko razdoblje karakterizira sedam dinamičnih godina, pa tako 2008. i 2010. predstavljaju godine osrednjih protoka, 2012. sušnu, a 2011. iznimno sušnu godinu, dok 2009, 2013. i 2014. (slika 7.) predstavljaju godine vrlo visokih protoka. Kod validacijskog razdoblja, 2015. predstavlja iznimno kišnu, 2016. osrednju, a 2017. sušnu godinu (slika 7.). Kalibracija modela izvršena je na tri točke (mjerne postaje), Lepoglava, Željeznica i Ludbreg kako bi se osigurao optimalan rezultat, tj. kako bi se tijekom kalibracije uzeti u obzir niži protoci u uzvodnom dijelu sliva (postaja Lepoglava), granica između gornjeg i srednjeg dijela toka (Željeznica) te zadnja mjerna postaja na rijeci Bednji (Ludbreg) koja je ujedno i izlaz hidrološkog modela.

Proces kalibracije modela SWAT-CUP-om započinje analizom osjetljivosti (eng. Sensitivity Analysis) [44]. U ovom koraku model se simulira s većim brojem parametara koji obuhvaćaju promatrane procese na slivu, posebno vodeći računa o fizikalnim karakteristikama sliva, odnosno o rasponima vrijednosti odabranih parametara s ciljem pronalaska najosjetljivijih parametara (tablica 5.), koji će zatim biti korišteni kod kalibracije modela [10, 38, 44, 45].

Kalibracija parametara SUFI-2 algoritmom SWAT-CUP softvera može se izvršiti jednim od tri načina: relativna promjena $r_{_}$,

Tablica 5. Parametri s upotrijebljenim rasponima kod kalibracije hidrološkog SWAT modela [46]

Parametar	Opis parametra	Kalibracijski raspon
v__ALPHA_BF,gw	alfa-faktor baznog toka (1/dan)	0,0 do 1,0
v__CANMX,hru	maksimalna količina vode koja se može zadržati na vegetaciji (mm H ₂ O)	0 do 15
r__CN2,mgt	broj Soil conservation services (SCS) krivulje otjecanja	-0,15 do 0,15
v__ESCO,hru	kompensacijski faktor evaporacije tla	0 do 1
v__GWQMN,gw	granična dubina vode u plitkom vodonosniku dostupne za povratni tok (mm)	0 do 1000
r__SOL_K(),sol	hidraulička vodljivost (mm/h)	-0,15 do 0,15
a__REVAPMN,gw	granična dubina vode u plitkom vodonosniku dostupne za kapilarno dizanje ili perkolaciju u duboki vodonosnik (mm H ₂ O)	-1000 do 1000
v__GW_REVAP,gw	„revap“ koeficijent podzemne vode koji regulira kretanje vode iz saturirane zone u zonu kapilarnog dizanja	0,02 do 0,2
a__GW_DELAY,gw	kašnjenje saturacije vodonosnika (dani)	-150 do 250
v__SMTMP,bsn	temperatura otapanja snijega (°C)	-5 do 5
v__SFTMP,bsn	temperatura prelaska kiše u snijeg (°C)	-5 do 5

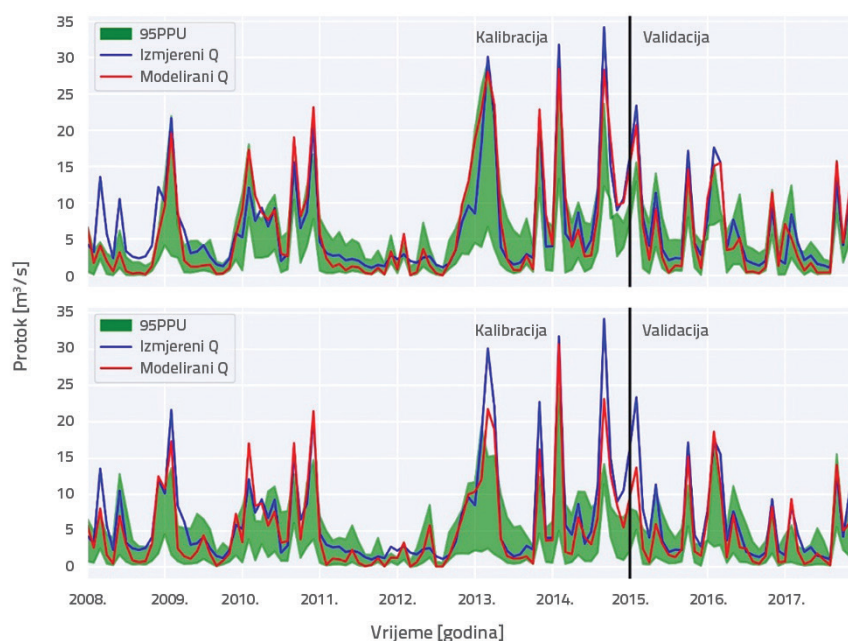
Tablica 6. Statistički pokazatelji rezultata kalibracije i validacije hidrološkog SWAT modela; postaje s nastavkom -m označuju model s meteorološki mjerenim oborinama, a postaje sa -ch označuju model s daljinski opaženim oborinama

Mjerna postaja	Kalibracija				Validacija			
	p-faktor	r-faktor	R ²	NSE	p-faktor	r-faktor	R ²	NSE
Ludbreg_m	0,85	1,11	0,86	0,84	1,00	1,31	0,91	0,89
Željeznica_m	0,88	1,26	0,83	0,74	1,00	1,35	0,92	0,91
Lepoglava_m	0,85	1,11	0,77	0,74	0,97	1,22	0,91	0,90
Ludbreg_ch	0,81	1,00	0,89	0,85	0,81	1,10	0,80	0,73
Željeznica_ch	0,90	1,11	0,84	0,84	0,89	1,09	0,82	0,81
Lepoglava_ch	0,83	0,97	0,78	0,77	0,69	0,94	0,73	0,67

apsolutna promjena a_{-} te zamjena parametra novom vrijednošću v_{-} [33,45]. Relativna promjena (npr. $r_{-}CN -0.2 - 0.2$) označuje relativnu promjenu CN broja SCS krivulje otjecanja unutar pojedine hidrološke jedinice (eng. *Hydrologic Response Unit - HRU*) unutar raspona $-/+ 20\%$ i unutar fizikalno realnih granica CN broja krivulje općenito. Apsolutna promjena (npr. $a_{-}GW_DELAY$ u rasponu od -150 do $+250$) označuje promjenu vremenskog perioda saturacije („punjenja“) vodonosnika za nasumičnu vrijednost iz raspona od -150 do $+250$ dana, odnosno, početni broj dana (koji ovisi o vrsti tla, biljnom pokrovu itd.) uvećava se (ili umanjuje) za nasumičnu vrijednost iz odabranog raspona. Zamjena parametra, v_{-} označuje promjenu postojećeg parametra (npr. $v_{-}GWQMN$ 0 - 1000) gdje će početna dubina do vode u plitkom vodonosniku (ovisno o vrsti tla, biljnom pokrovu, itd.) biti zamijenjena nasumičnom vrijednošću iz odabranog raspona. Valja naglasiti da broj vrijednosti iz odabranog raspona ovisi o broju odabranih simulacija modela. Primjerice ako broj simulacija iznosi 1000 raspon se dijeli na 1000 dijelova te se središnja vrijednost svakog dijela uzima s nasumičnom vrijednošću svih drugih parametara u simulaciju.

Na završetku se izračunava statistički pokazatelj ocjene simulacije (tablica 6.), a parametri one simulacije koja daje najmanju statističku pogrešku bit će odabrani za prikaz „najbolje simulacije“ (crvena linija - slika 7.), dok se cijeli raspon mogućih vrijednosti protoka ovisno o vrijednostima parametara prikazuje područjem 95PPU (zeleno - slika 7.).

Analizom statističkih parametara kalibracije i validacije modela prikazanih u tablicama 5. i 6., prema predloženim vrijednostima koeficijenata R^2 , NSE, p-faktor te r-faktor za SWAT hidrološki model [10, 35-39], zaključuje se da model pruža pouzdan



Slika 7. Prikaz hidrograma modeliranih protoka na mornoj postaji Ludbreg; mjerene oborine kao ulazni parametar u model (gore), CHIRPS daljinski opažene oborine kao ulazni parametar modela (dolje)

rezultat, jer je dobiveni koeficijent NSE veći od 0,5 [35]. Pretpostavka je da bi se produljivanjem kalibracijskog razdoblja rezultati ujednačili, no to je izvan okvira ovog rada. Zanimljivo je uočiti da u postupku kalibracije model s meteorološki mjerenim oborinama daje nešto lošiji rezultat, dok je kod validacijskog razdoblja situacija obrnuta.

Dobiveni rezultati, uspoređeni sa sličnim istraživanjima na drugim područjima [13], pokazuju da CHIRPS daljinski opaženi produkt i u Hrvatskoj može biti korišten kao ulazni parametar u hidrološkom SWAT modelu u manjim slivovima s malim brojem kišomjernih postaja ili ako postoje prekidi u mjernim nizovima oborina.

No, ovakav pristup modeliranju ima i određena ograničenja, koja su uočljiva kod vizualne interpretacije hidrograma otjecanja SWAT hidrološkog modela prikazanog na slici 7. Uočava se da meteorološki mjerene oborine kao ulazni parametar SWAT

hidrološkog modela nešto bolje opisuju vršne protoke u kišnim godinama (npr. 2013. ili siječanj 2015.), gdje CHIRPS zbog pogreške u opaženom volumenu kiše (slika 3.) ne postiže stvarno zabilježene vršne protoke u tom mjesecu. Promotri li se godine u kojima CHIRPS produkt vjerno prati volumene meteorološki mjerenih oborina, zabilježena pogreška u modelu je također niža. Situacija se mijenja kod sušnih godina (perioda), gdje CHIRPS produkt zbog većeg broja opažaćkih točaka (raster) mnogo bolje opisuje minimalne količine oborina, što se očituje u boljem opisu baznog toka. Ova karakteristika također je prednost daljnji opaženih produkata, jer u područjima s izrazito niskim brojem meteoroloških postaja mogu dati mnogo pouzdanije rezultate od meteorološki mjerenih oborina, jer mogu stvarnije u model prenijeti prostorni raspored pale oborine koja je pala na slivu. Dobiveni podaci pokazuju da CHIRPS produkt dobro opisuje vrijeme podizanja te spuštanja vodnog vala i u kišnim i u sušnim godinama, što je i vidljivo iz usporedbe hoda srednje mjesečne oborine iznad sliva (slika 4. – grafovi 15. i 16.)

5. Zaključak

Ovim radom nastojao se prikazati alternativni pristup u hidrološkom modeliranju, u slučajevima kada na slivu

ili neposrednoj blizini ne postoji zadovoljavajući broj kišomjernih postaja ili postojeći nizovi imaju prekide u mjerjenjima. U ovakvim složenim situacijama, daljnji opaženi produkt s globalnom pokrivenošću, CHIRPS, može biti zamjena meteorološki izmjerenim oborinama. Svakako valja napomenuti da je pouzdanost takvog modela nešto niža u odnosu na model gdje se kao ulazni parametar koriste oborine opažene na meteorološkim i/ili kišomjernih postajama, imajući na umu da je sliv Bednje vrlo dobro pokriven mrežom kišomjernih postaja DHMZ-a. Ostaje otvoreno pitanje situacije u slivovima gdje je pokrivenost kišomjernih postajama manja, što predstavlja temu za daljnja istraživanja ovakvog oblika. Prema dobivenim rezultatima, pretpostavka je da bi se točnost dodatno mogla poboljšati kalibracijom prvotnog modela na dužem vremenskom nizu opažanih oborina na meteorološkim i/ili kišomjernih postajama.

Zahvala

Autori zahvaljuju Državnom hidrometeorološkom zavodu na ustupljenim meteorološkim i hidrološkim podacima koji su korišteni u izradi ovog članka.

LITERATURA

- [1] Paladin, M., Vidaković Šutić, R., Vrcelj, B., Ričković, V.: Izrada karata opasnosti i izračun šteta na slivu rijeke Bednje, (urednici: Biondić, D., Holjević, D., Vizner, M.), Hrvatske vode na investicijskom valu, Hrvatske vode: Opatija; 2015.
- [2] Žugaj, R.: Hidrologija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet: Zagreb; 2000.
- [3] Žugaj, R.: Velike vode malih slivova, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet: Zagreb; 2010.
- [4] Wanielista, MP., Kersten, R., Ealgin, R.: Hydrology : water quantity and quality control, 2nd ed. John Wiley & Sons: New York; (1997) pp. 567
- [5] Gilja, G., Ocvirk, E., Kuspilić, N.: Joint probability analysis of flood hazard at river confluences using bivariate copulas, GRADEVINAR, 70 (2018) 4, pp. 267-75, <https://doi.org/10.14256/JCE.2173.2017>
- [6] Ožanić, N., Karleuša, B., Orbanić, J., Žufić, E., Žic, E.: Hidrogrami velikih vodenih valova - primjer hidrološke obrade za akumulaciju Križ, In: Gereš D, urednik. 3 Hrvatska konferencija o vodama hrvatske vode u 21 stoljeću, Hrvatske vode: Osijek; 2003. p. 91-9
- [7] Duan, Z., Liu, J., Tuo, Y., Chiogna, G., Disse, M.: Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, Elsevier B.V.; 573 (2016) September, pp. 1536-53, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.213>
- [8] Funk, C.C., Peterson, P.J., Landsfeld, M.F., Pedreros, D.H., Verdin, J.P., Rowland, J.D.: A quasi-global precipitation time series for drought monitoring: U.S. Geological Survey Data Series 832, <https://pubs.usgs.gov/ds/832/pdf/ds832.pdf> %0Ahttps://pubs.usgs.gov/publication/ds832Usgs. Reston, VA; 2014, <https://doi.org/10.3133/ds832>
- [9] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R.: Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development, Journal of the American Water Resources Association, 34 (1998) 1, pp. 73-89, <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- [10] Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B.: A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model, Journal of Hydrology, Elsevier B.V.; 524 (2015) pp. 733-52, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- [11] Bosch, N.S., Allan, J.D., Dolan, D.M., Han, H., Richards, R.P.: Application of the Soil and Water Assessment Tool for six watersheds of Lake Erie: Model parameterization and calibration, Journal of Great Lakes Research, 37 (2011) 2, pp. 263-71, <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2011.03.004>
- [12] Shrestha, S., Sharma, S., Gupta, R., Bhattarai, R.: Impact of global climate change on stream low flows: A case study of the great Miami river Watershed, Ohio, International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 12 (2019) 1, pp. 84-95
- [13] Tuo, Y., Duan, Z., Disse, M., Chiogna, G.: Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy), Science of the Total Environment, 573 (2016) pp. 66-82
- [14] Grusson, Y., Anctil, F., Sauvage, S., Sánchez Pérez, J.: Testing the SWAT Model with Gridded Weather Data of Different Spatial Resolutions, Water, 9 (2017) 1, pp. 54, <https://doi.org/10.3390/w9010054>
- [15] Glavan, M., Flajsig, G.Ć., Karleuša, B., Vučković, I.: Modelling diffuse and point source pollution risks in the case of transboundary Sotla river basin, SWAT model conference, (2017) pp. 79

- [16] Počakal, M.: Hidrografske veličine porječja Bednje, Geografski glasnik, 44 (1982), pp. 85-102
- [17] Šimunić, A., Pikija, M., Hećimović, I.: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000 s tumačem - list Varaždin, Geološki zavod Zagreb: Zagreb; 1978.
- [18] Aničić, B., Juriša, M.: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000 - list Rogatec, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Geološki zavod Ljubljana, Savezni geološki zavod Beograd; 1983. pp. 33-68
- [19] Dragičević, I., Blašković, I., Mayer, D., Žugaj, R., Tomljenović, B.: Gorski i prigorski vodonosnici sjeverne Hrvatske (izvješće o radovima u 1996. godini), Fond stručne dokumentacije RGNF: Zagreb; 1997.
- [20] Šimunić, A.: Geološka Građa Okolice Lepoglave I Osvrt Na Pojave Mineralnih Sirovina, Radovi Zavoda za znanstveni rad JAZU, 1 (1986) 1, pp. 19-32
- [21] Marković, T., Larva, O., Brkić, Ž., Dolić, M., Kuhta, M.: Stanje podzemnih voda na vodnom području rijeke Dunav s obzirom na prirodan sadržaj metala i njihov antropogeni utjecaj, Hrvatski geološki institut: Zagreb; 2015.
- [22] Brkić, Ž., Larva, O., Marković, T.: Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda u panonskom dijelu Republike Hrvatske, Hrvatski geološki institut: Zagreb; 2009.
- [23] Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., et al.: Klimatski atlas Hrvatske, Climate atlas of Croatia: 1961. - 1990.: 1971. - 2000., Državni hidrometeorološki zavod: Zagreb; 2008.
- [24] DHMZ.: Meteorološki podaci - 2000. - 2018., Zagreb; 2020
- [25] Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., et al.: SWAT: Model Use, Calibration, and Validation, Transactions of the ASABE, 55 (2012) 4, pp. 1491-508, <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- [26] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Allen, P.M.: Continental scale simulation of the hydrologic balance, Journal of the American Water Resources Association, 35 (1999) 5, pp. 1037-1051, <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb04192.x>
- [27] Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A., Montanarella, L.: European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements, Land use Policy, 29 (2012) 2, pp. 329-338, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003>
- [28] Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., et al.: The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes, Scientific Data, 2 (2015) 1, pp. 1-21, <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- [29] Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., et al.: The NCEP climate forecast system reanalysis, Bulletin of the American Meteorological Society, 91 (2010) 8, pp. 1015-1057
- [30] Dile, Y.T., Srinivasan, R.: Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: An application in the Blue Nile river basin, Journal of the American Water Resources Association, 50 (2014) 5, pp. 1226-41, <https://doi.org/10.1111/jawr.12182>
- [31] Fuka, D.R., Walter, M.T., Macalister, C., Degaetano, A.T., Steenhuis, T.S., Easton, Z.M.: Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models, Hydrological Processes, 28 (2014) 22, pp. 5613-5623, <https://doi.org/10.1002/hyp.10073>
- [32] Roth, V., Lemann, T.: Comparing CFSR and conventional weather data for discharge and soil loss modelling with SWAT in small catchments in the Ethiopian Highlands, Hydrology and Earth System Sciences, 20 (2016) 2, pp. 921-934, <https://doi.org/10.5194/hess-20-921-2016>
- [33] Abbaspour, K.C., Vejdani, M., Haghghat, S.: SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT, MODSIM07 - Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability, Proceedings, (2007), pp. 1596-1602
- [34] Nash, J.E., Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, Journal of Hydrology, 10 (1970) 3, pp. 282-290, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- [35] Moriasi, D.N., Arnold, J. G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L.: Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, Transactions of the ASABE, 50 (2007) 3, pp. 885-900, <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- [36] Rahman, K., Maringanti, C., Beniston, M., Widmer, F., Abbaspour, K., Lehmann, A.: Streamflow Modeling in a Highly Managed Mountainous Glacier Watershed Using SWAT: The Upper Rhone River Watershed Case in Switzerland, Water Resources Management, 27 (2013) 2, pp. 323-339, <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0188-9>
- [37] Duru, U., Arabi, M., Wohl, E.E.: Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey, Physical Geography, 39 (2018) 3, pp. 264-89, <https://doi.org/10.1080/02723646.2017.1342199>
- [38] Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., et al.: Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT, Journal of Hydrology, 333 (2007) 2-4, pp. 413-430
- [39] Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., van Genuchten, M.T.: Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure, Vadose Zone Journal, 3 (2004) 4, pp. 1340-1352, <https://doi.org/10.2136/vzj2004.1340>
- [40] Krige, D.G.: A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand, Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, Southern African Institute of Mining and Metallurgy; 52 (1952) 6, pp. 201-215
- [41] Piniewski, M., Okruszko, T.: Multi-Site Calibration and Validation of the Hydrological Component of SWAT in a Large Lowland Catchment, In: Świątek D, Okruszko T, editors. Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment, Springer-Verlag: Berlin; 2011. p. 15-41, https://doi.org/10.1007/978-3-642-19059-9_2
- [42] Čerkasova, N., Umgiesser, G., Ertürk, A.: Development of a hydrology and water quality model for a large transboundary river watershed to investigate the impacts of climate change - A SWAT application, Ecological Engineering, Elsevier; 124 (2018) October, pp. 99-115, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.025>
- [43] Abbaspour, K.C., Vaghefi, S.A., Srinivasan, R.: A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 international SWAT conference, Water (Switzerland), 10 (2017) 1, pp. 1-18
- [44] Meng, X., Wang, H., Lei, X., Cai, S., Wu, H., Ji, X., et al.: Hidrološko modeliranje u porječju rijeke Manas primjenom alata za procjenu tla i vode pomoću CMADS-a, Tehnicki Vjesnik, 24 (2017) 2, pp. 525-534

- [45] Abbaspour, K.C.: SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs-a user manual, Swiss Fed. Inst. Aquat. Sci. Technol. Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology: Dübendorf; 2011. p. 106
- [46] Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R.: Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2005., [Http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/128050](http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/128050) Texas Water Resour. Inst. Tech. Rep. No. 406. Texas Water Resources Institute: Temple, Texas; 2011.