

Korištenje GIS-a pri izradi hidrološkog modela rijeke

Mrakužić, Petar

Undergraduate thesis / Završni rad

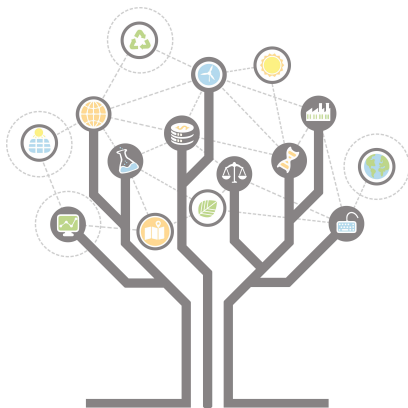
2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:213123>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

PETAR MRAKUŽIĆ

KORIŠTENJE GIS-A PRI IZRADI HIDROLOŠKOG
MODELA RIJEKE

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva za
_____ u _____ sati.

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred ispitnim
povjerenstvom u Varaždinu.

Varaždin, _____.

Predsjednik ispitnog
povjerenstva:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

Članovi povjerenstva

- 1) izv.prof.dr.sc. HRVOJE MEAŠKI

- 2) KARLO LESKOVAR, mag.ing.geoing.

- 3) doc.dr.sc. JELENA LOBOREC

- 4) prof.dr.sc. RANKO BIONDIĆ

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

KORIŠTENJE GIS-A PRI IZRADI HIDROLOŠKOG
MODELA RIJEKE

KANDIDAT:

Petar Mrakužić

Petar Mrakužić

MENTOR:

izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški

NEPOSREDNI VODITELJ:

Karlo Leskovar, mag.ing.geoling.

VARAŽDIN, 2020.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: PETAR MRAKUŽIĆ

Matični broj: 2840 - 2017./2018.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

KORIŠTENJE GIS-a PRI IZRADI HIDROLOŠKOG MODELA RIJEKE

Rad treba sadržati:

1. Uvod
2. Opis promatranog područja i potrebnih podataka
3. Metodologija
4. Rezultati i analiza dobivenih podataka
5. Zaključak

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.


Zadatak zadan: 16.03.2020.

Rok predaje: 03.07.2020.


Mentor:


Izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški

Neposredni voditelj:


Karlo Leskovar, mag.ing.geoling.

Predsjednik Odbora za nastavu:


Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom: **Korištenje GIS-a pri izradi hidrološkog modela rijeke,** rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Hrvoja Meaškog.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 2. srpnja 2020.

Petar Mrakužić




(Vlastoručni potpis)

**IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ
OBJAVLJENIM RADOVIMA**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom **Korištenje GIS-a pri izradi hidrološkog modela rijeke**, pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 2. srpnja 2020.

Izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški, mentor


(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Ime i prezime: Petar Mrakužić

Naslov rada: Korištenje GIS-a pri izradi hidrološkog modela rijeke

Na primjeru rijeke Bednje izrađen je hidrološki model, odnosno dobiveni su podaci o protoku na hidrološkim postajama. U radu je opisan sliv rijeke Bednje, opisani su potrebni ulazni podaci te sama metodologija izrade hidrološkog modela. Ulazni podaci podrazumijevaju podlogu uporabe zemljišta, podlogu tla te meteorološke podatke o oborinama, insolaciji, vjetru, temperaturi i vlažnosti zraka. Model je izrađen u računalnom programu ArcGIS uz pomoć dodatka ArcSWAT čiji su koraci objašnjeni. Rezultati su prikazani preko rasterskih prikaza nagiba terena, upotrebe zemljišta i vrste tla rasprostranjenih na slivu te preko hidrograma koji uspoređuju dobivene i izmjerene protoke. Krajnji rezultat je hidrološki model koji je prema koeficijentu efikasnosti modela i koeficijentu korelacije prihvatljiv.

KLJUČNE RIJEČI:

Hidrološki model, sliv rijeke Bednje, ArcGIS, ArcSWAT, hidrogram

ABSTRACT

Name and surname: Petar Mrakužić

Title: Using GIS in the development of a hydrological model of river

The paper presents a hydrological model which was created for the Bednja River, i.e., the data on the streamflow at hydrological stations. The bachelor thesis describes the Bednja river basin, the necessary model input data and the methods of creating a hydrological model. Input data include land cover/land use data, soil type data and meteorological data (precipitation, solar radiation, wind speed, min and max air temperature and relative humidity). The model was created using the computer program ArcMap with the addition of the ArcSWAT add-on and all the steps are explained. The results are presented using a raster representation of a slope, a land use and a soil type distributed in the basin. By using hydrographs the calculated (modeled) and measured streamflow are compared. The end result is a hydrological model which is acceptable according to an efficiency coefficient of a model and a correlation coefficient.

KEYWORDS:

Hydrological model, Bednja river basin, ArcGIS, ArcSWAT, hydrograph

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	OPIS PROMATRANOG PODRUČJA I POTREBNIH PODATAKA.....	4
2.1.	RIJEKA BEDNJA I NJENO SLIVNO PODRUČJE	4
2.2.	PODACI POTREBNI ZA HIDROLOŠKO MODELIRANJE.....	7
3.	METODOLOGIJA.....	11
3.1.	OPIS KORIŠTENIH RAČUNALNIH PROGRAMA.....	11
3.2.	ODABIR PODATAKA	12
3.3.	PRIPREMA PODATAKA ZA SWAT.....	15
3.4.	OBRADA PODATAKA U SWAT-u.....	15
3.5.	MATEMATIČKA FUNKCIJA USPOREDBE PROMATRANIH I MODELIRANIH PROTOKA	21
4.	REZULTATI I ANALIZA DOBIVENIH PODATAKA	23
4.1.	OPĆENIT PRIKAZ SLIVA	23
4.2.	PRIKAZ I USPOREDBA DOBIVENIH PROTOKA IZ SWAT-A	27
5.	ZAKLJUČAK	31
6.	LITERATURA.....	32
	POPIS SLIKA	34
	POPIS TABLICA	35

1. UVOD

Svrha ovog završnog rada bila je napraviti sintezu do sada stečenih znanja iz hidrologije, hidrogeologije i geografskog informacijskog sustava te proučiti neke inovativne metode hidroloških istraživanja. Danas se takva istraživanja sve češće koriste prilikom proučavanja međusobnih odnosa količine oborina, površinskog otjecanja i infiltracije površinske vode u podzemlje. Nadogradnja do sada stečenih znanja bila je samostalna primjena spomenute metodologije na stvarnom slivnom području te analiza dobivenih rezultata površinskog otjecanja iz sliva, odnosno usporedba sa stvarno zabilježenim podacima na hidrološkim postajama. Kao područje istraživanja odabran je sliv rijeke Bednje.

Hidrologija je znanost koja se bavi proučavanjem voda u Zemljinoj kori, na njoj te iznad nje. Isto tako promatra i razne hidrološke procese poput otjecanja i raspodjele vode u vremenu i prostoru. Proučava fizikalna, kemijska i biološka svojstva voda te njihovo djelovanje na okoliš uključujući i utjecaj na živa bića (Žugaj, 2000). Hidrogeologija je znanost koja se bavi podzemnim vodama, njihovom pojavom i kretanjem u litosferi te kao interdisciplinarna znanost obuhvaća područja hidrologije i geologije.

Hidrološki ciklus je proces kruženja vode u prirodi. Sastavni dijelovi hidrološkog ciklusa su infiltracija, oborine, evapotranspiracija i otjecanje koje se dijeli na potpovršinsko, površinsko te podzemno (Žugaj, 2000). Komponente hidrološkog ciklusa korištene u ovom radu su oborine te površinsko otjecanje koji su promatrani u području sliva u određenom vremenu.

Kao dodatni podaci prilikom izrade modela korišteni su podaci o oborinama, minimalnoj i maksimalnoj dnevnoj temperaturi, insolaciji, vjetru i relativnoj vlažnosti zraka te su korištene podloge upotrebe zemljišta i podloge vrste tla. Navedeni podaci utječu na promjene hidrološke bilance na slivu, a ujedno su dio potrebnih podataka za računalni program ArcSWAT (Neitsch, 2005) pomoću kojeg je sliv rijeke Bednje modeliran. Na

otjecanje u slivu utječu i klimatske promjene te antropogene djelatnosti koje nisu bile predmet ovoga rada.

Jedan od osnovnih grafičkih prikaza u hidrologiji je hidrogram koji prikazuje protok vode u odnosu na vrijeme. Hidrogram je sastavljen od četiri komponente: površinski/izravni dotok, potpovršinski dotok, podzemni dotok i oborina pala na korito vodotoka. Iz hidrograma je moguće očitati vrijeme podizanja i opadanja vodnog vala (Žugaj, 2000).

Hidrološko modeliranje koristeći različita znanja omogućuje analiziranje, prikazivanje i predviđanje pojava i procesa u stvarnom svijetu. Pomoću suvremenih računalnih alata moguće je modelirati niz procesa koji su povezani s poplavama. Hidrološko modeliranje uključuje proces transporta vode unutar sliva, a rezultat je hidrološki model koji u okviru sliva ili dionice vodotoka omogućuje uvid u promjene u količinama ili tečenju vode tijekom vremena. Ovi rezultati mogu se koristiti za pripremu i provedbu različitih vrsta mjera za zaštitu od poplava kao što su prognoziranje poplava, izrada karata opasnosti i karata rizika od poplava, simulacija poplava, priprema i razvoj građevinskih mjera za zaštitu od poplava (Hidrološki i hidraulički modeli, 2020).

GIS ili **geografski informacijski sustav** (engl. *Geographic Information System*) je skup softvera i hardvera te postupaka koji omogućavaju kontroliranje, modeliranje, predstavljanje, analizu, obradu i prikaz georeferenciranih podataka kojima se omogućuje rješavanje zahtjevnih problema planiranja i gospodarenja prostorom (Biondić, 2013).

ArcGIS se koristi za izradu karata, obradu geografskih podataka, analizu i mapiranje te razmjenu i otkrivanje geografskih podataka, korištenje karata i zemljopisnih podataka u različitim aplikacijama i upravljanje zemljopisnim podacima u bazi podataka. Program ArcSWAT funkcionira kao potprogram ArcGIS-a. Omogućuje proračune utjecaja upotrebe tla na protoke, nastalog sedimenta te kemijskih procesa na promatranom slivu. Modelira hidrološke cikluse uzimajući u obzir evapotranspiraciju, infiltraciju, otjecanje u vodonosnike te ostale procese toka vode unutar sliva (Neitsch, 2005.).

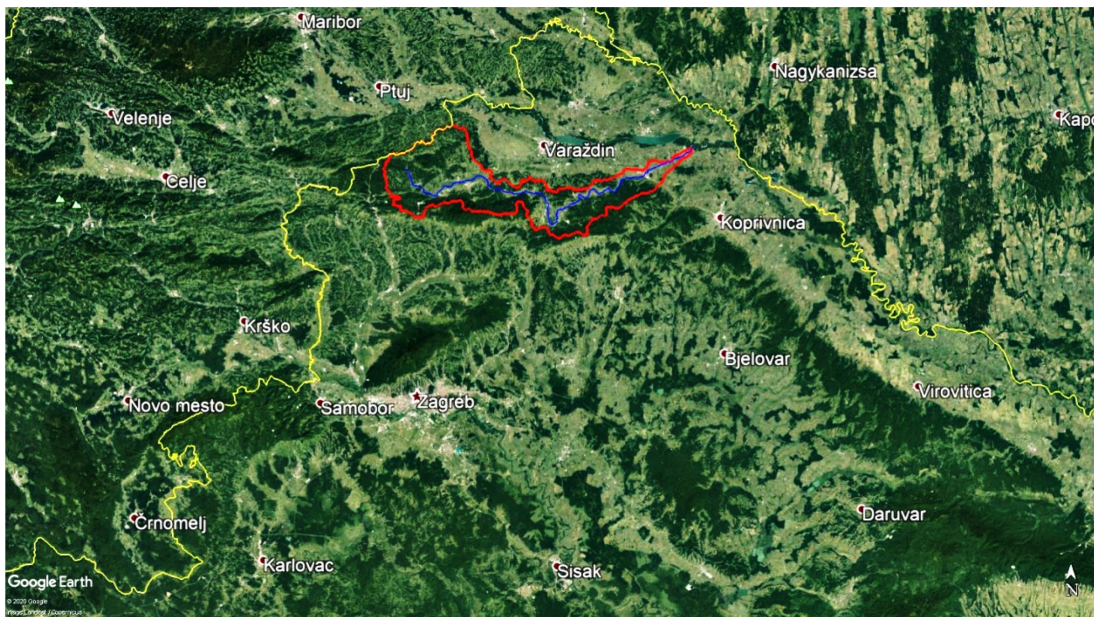
Cilj završnoga rada bila je izrada hidrološkog modela cijeloga sliva rijeke Bednje, koristeći računalni program ArcMap i dodatak SWAT (engl. *The Soil and Water*

Assessment Tool) (Neitsch, 2005.). Za izradu modela prikupljeni su podaci vezani za pokrov, odnosno namjenu zemljišta i tla te dnevni zapisi s hidroloških i meteoroloških postaja u vremenskom periodu od 1. siječnja 2009. do 31. prosinca 2017. godine. Na kraju rada napravljena je usporedba dobivenog hidrološkog modela i proračunatih protoka na hidrološkim postajama s podacima izmjerenima na hidrološkim postajama Lepoglava, Željeznica, Ključ, Tuhovec i Ludbreg. Stvarno izmjereni podaci su preuzeti od Državnog hidrometeorološkog zavoda (u daljnjem tekstu DHMZ).

2. OPIS PROMATRANOG PODRUČJA I POTREBNIH PODATAKA

2.1. RIJEKA BEDNJA I NJENO SLIVNO PODRUČJE

Rijeka Bednja se nalazi na sjeverozapadu Republike Hrvatske. S duljinom od 103 km smatra se najdužom rijekom koja se svojim cijelim tokom nalazi u Republici Hrvatskoj (Slika 1). Bednja teče od zapada prema istoku, broji 144 pritoka te pripada porječju Drave i Dunava te crnomorskom slivu (Marković *et al.*, 2015).



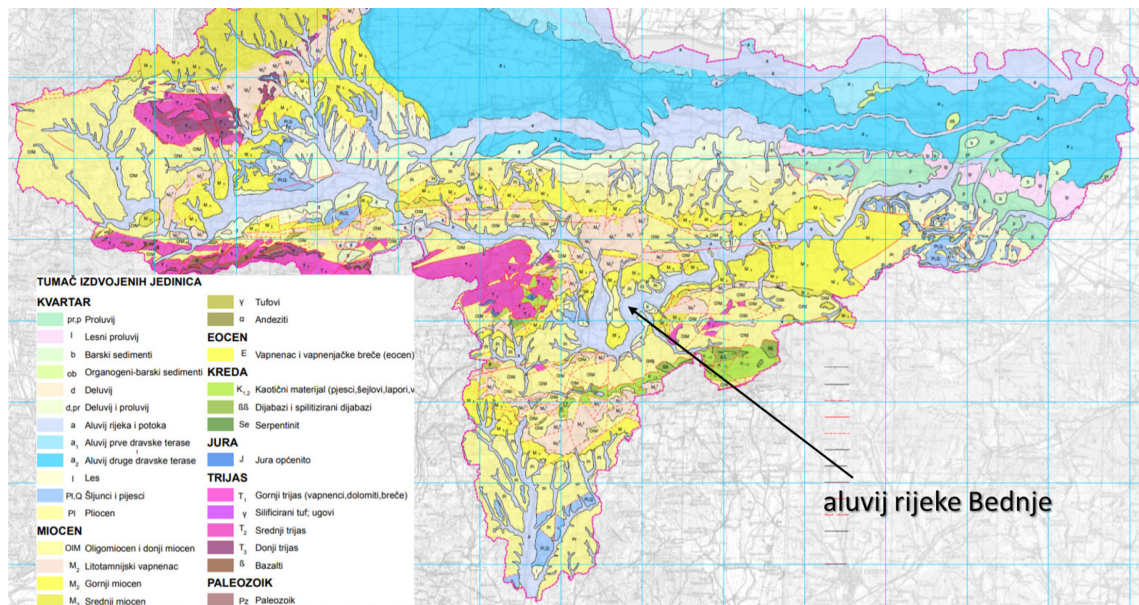
Slika 1. Smještaj sliva unutar sjeverozapadnog dijela Republike Hrvatske

Postoje različite tvrdnje o izvoru rijeke Bednje, primjerice da Bednja izvire u sjeverozapadnom dijelu Ravne gore (naselje Bednjica), zatim da izvire u Kamenj gorici te da Bednja nastaje istjecanjem iz Trakošćanskog jezera, dok se u hidrogeografiji smatra da Bednja izvire kraj Brezove gore. Kod naselja Mali Bukovec nalazi se ušće Bednje u Dravu.

Geološke i hidrogeološke značajke

Rijeka Bednja (Slika 3) je svoje korito usjekla u les i lesoidne sedimente taložeci aluvijalne sedimente, šljunke i pijeske u izmjeni s proslojcima glina i glinovitog silta. U dolini rijeke Bednje i njezinih pritoka taloženi su šljunci, pijesci i gline holocenske starosti koji danas predstavljaju značajan aluvij u ovom dijelu Varaždinske županije.

Aluvij je 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 (Šimunić, 1986).



Slika 2. Aluvij rijeke Bednje Rijeka Bednje prikazan na isječku Geološke karte Varaždinske županije (HGI 2015)

Aluvijalni sedimenti rijeke Bednje formiraju vodonosnike međuzrnske poroznosti, male debljine te lateralno i vertikalno heterogenog sastava. Dominiraju sitnozrnate čestice pa je propusnost ovih naslaga slaba, a obnavljanje podzemnih voda odvija se infiltracijom oborina i procjeđivanjem iz korita vodotoka (Marković *et al.*, 2015).

Slivno područje

Sliv je područje čije površinsko otjecanje ima odljev vode, odnosno sliv predstavlja kopnene površine s kojih se voda slijeva prema recipijentu (vodotok, more, ocean). Vodne mase se promatraju u određenoj točki koja se naziva protjecajni profil promatranog vodotoka. Sliv je određen razvodnicom ili vododijelnicom, odnosno linijom koja razdvaja susjedne slivove. Topografska razvodnica je linija koja u geološkim uvjetima dijeli susjedne slivove po najvišim točkama terena, a određuje se na topografskoj karti na temelju položaja slojnica. Hidrološka razvodnica se koristi u geološki nepovoljnim uvjetima gdje razvodnica ne ovisi samo o topografiji, već i o

geološkim i hidrogeološkim uvjetima. Hidrološka razvodnica nije stalna, nego se njen položaj mijenja ovisno o razinama podzemnih voda. Topografska i hidrološka razvodnica se najčešće ne podudaraju u potpunosti, a najveće razlike su na krškom terenu, gdje se koriste hidrološke razvodnice (Žugaj, 2000).

Sliv rijeke Bednje određen je topografskom razvodnicom, a samo određivanje razvodnice nije u opsegu ovog rada, nego su podaci vezani za granice sliva preuzeti od Hrvatskih voda (Hrvatske vode, 2020). Promatrani sliv rijeke Bednje nalazi u sjeverozapadnoj Hrvatskoj. Slivna površina iznosi 596 km². Prostire se od Trakošćana na zapadu pa do Ludbrega na istoku. Pretežno je nizinskog područja s elementima gorja na zapadnome te južnom dijelu (Slika 3).

Bednja je nizinska rijeka s malim uzdužnim padom, no sliv joj je isključivo brdski. Gornji dio sliva je lepezast što zajedno s intenzivnim oborinama uzrokuje velike i brze koncentracije dotoka. Drugi dio toka je izrazito ravničarski, pretežno pod oranicama i livadama te dosta meandrira. Uz oborine, količina vode u Bednji ovisi i o otapanju snijega na izvorišnom dijelu Bednje (Zaninović *et al.*, 2008)



Slika 3. Rijeka Bednja (preuzeto s Facebook stranice: HRVATSKA, 2020)

Meteorološke značajke

Prema podacima s meteorološke postaje Ludbreg, klima na širem Ludbreškom području je umjereno toplo-kišna klima, s toplim ljetima gdje temperatura najtoplijeg mjeseca ne prelazi 22 °C, a temperatura najhladnijeg mjeseca se kreće između -3 °C i 18 °C. Sušnih razdoblja nema. Oborine variraju iz godine u godinu, primjerice 2012. godine su iznosile 716,9 mm, 2013. 1196,8 mm, a 2014. godine 1376,5 mm. U toplom dijelu godine (travanj – rujan) 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 (Zaninović et al., 2008) Dominiraju vjetrovi južnog i jugozapadnog te sjevernog i sjeveroistočnog kvadranta. Proljeće je najvjetrovitije, dok se tijekom ljeta javljaju vjetrovi slabih učestalosti.

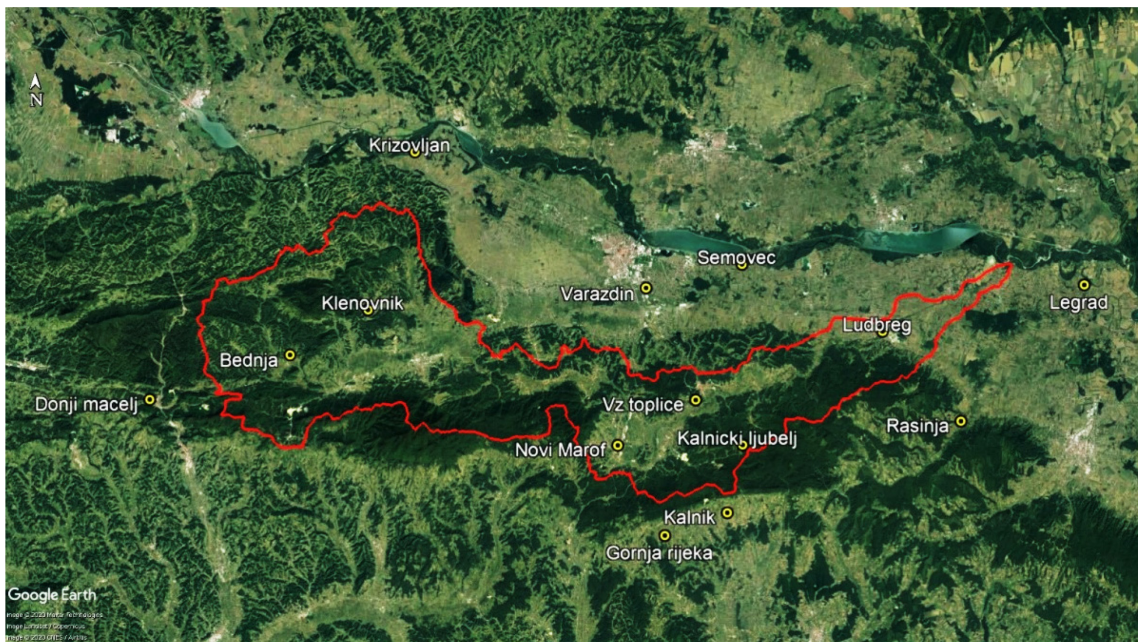
2.2. PODACI POTREBNI ZA HIDROLOŠKO MODELIRANJE

Ulazni podaci potrebni za hidrološko modeliranje dobiveni su s meteoroloških postaja, a uključuju informacije o količini oborina na sliv koja je jedan od glavnih čimbenika veličine izlaznih protoka sa sliva. S meteoroloških postaja Bednja, Klenovnik, Varaždinske Toplice, Kalnički Ljubelj i Ludbreg dodatno su preuzeti podaci o maksimalnoj i minimalnoj temperaturi, relativnoj vlažnosti i vjetru (DHMZ, 2020).

Intenzitet sunčevog zračenja ne mjeri se na meteorološkim postajama u slivu rijeke Bednje pa su podaci o insolaciji preuzeti iz *CFSR* (engl. *Climate Forecast System Reanalysis*) koja je sastavni dio *Global Weather* baze meteoroloških podataka (Global Weather Data for SWAT, 2020). Kako u meteorološkim podacima za neka razdoblja nisu zabilježena mjerenja, napravljena je interpolacija pomoću podataka s meteorološke postaje Varaždin (detaljnije opisano u poglavlju: 3.2. Odabir podataka).

CFSR baza podataka napravljena je za računalni alat SWAT uz pomoć satelitskih snimaka i obrade podataka s meteoroloških stanica složenim prostornim interpolacijskim metodama (Global Weather Data for SWAT, 2020; Saha et al., 2010). *CFSR* podaci dostupni su prostornoj rezoluciji od približno 38 km, dok je vremenski korak 1 dan.

Za potrebe modela korišteni su podaci preuzeti s meteoroloških postaja: Ludbreg, Varaždinske Toplice, Klenovnik, Bednja, Novi Marof i Kalnički Ljubelj (Slika 3). Ove postaje su odbrane jer se nalaze unutar sliva te su kao takve korištene kod izrade hidrološkog modela korištenjem alata SWAT. Naime, alat SWAT u proračun uzima isključivo točke (stanice) koje se nalaze unutar odabranog područja (Neitsch *et al.*, 2005).

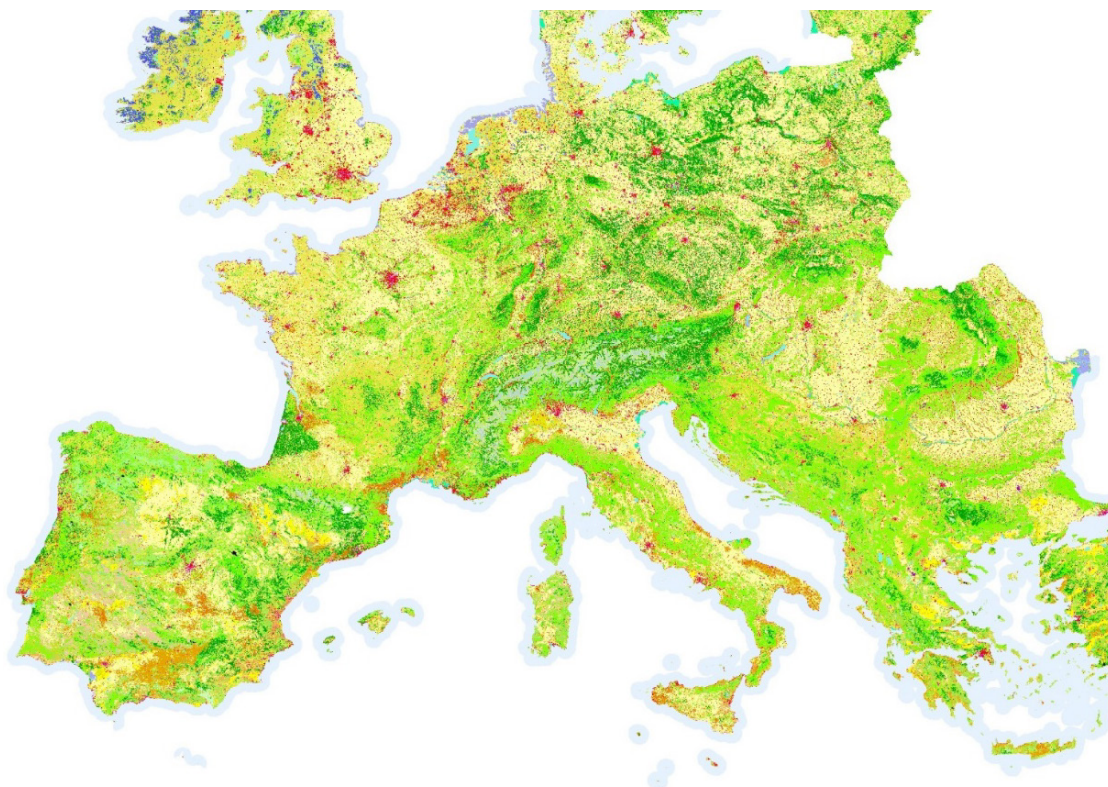


Slika 4. Prikaz meteoroloških postaja na slivu rijeke Bednje

Na kraju rada je napravljena usporedba dobivenog hidrološkog modela s podacima mjenjenim na hidrološkim postajama Lepoglava, Željeznica, Ključ, Tuhovec i Ludbreg. Na postajama je mjenjen protok, a podaci su preuzeti od DHMZ-a.

CLC i FAO značajke tla

Kako bi se kartografski prikazao pokrov i upotreba zemljišta, preuzete su podloge iz *CORINE Land Cover* baze (skraćeno CLC). CLC je temeljni set podataka o pokrovu za prostore i teorijske analize koji pokriva zemljišta Europske unije od 1990. do 2018. godine (Slika 5). Preuzete su podloge CLC 2006 koje su dane u obliku rasterske mreže veličine 100 x 100 [m] (*CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service, 2020*).



Slika 5. Kartografski prikaz CLC Europe (CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service, 2020)



Slika 6. Kartografski prikaz FAO Europe (CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service, 2020)

Kako bi se dobio kartografski prikaz vrsta tla na slivu, preuzeta je i podloga FAO85eu. FAO (engl. *Food and Agriculture Organization*) je Organizacija za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih naroda kojoj je cilj osigurati svijet bez gladi. U tu svrhu FAO je razvila svjetski prihvaćenu klasifikaciju tla koja sadrži gotovo 7000 vrsta tla diljem svijeta.

FAO85eu je preuzet sa službenih stranica *European Soil Data Centre* (skr. ESDAC) koja sadrži sve relevantne podatke o tlu na europskoj razini kao što su baze podataka, dokumenti, karte, projekti i slično (Slika 6) (ESDAC - European Commission, 2020).

Spomenute podloge su nužne pri izradi hidrološkog modela korištenjem alata SWAT jer čine važan parametar kod proračuna elemenata važnih za površinsko otjecanje, infiltraciju te evapotranspiraciju unutar sliva.

3. METODOLOGIJA

Za dobivanje podataka o protocima na hidrološkim postajama, koji se nakon provedene analize uspoređuju s mjerenim podacima na postajama, potrebno je napraviti hidrološki model sliva rijeke Bednje. Model je izrađen u računalnom programu ArcGIS pomoću programskog dodatka ArcSWAT (Neitsch *et al.*, 2005).

3.1. OPIS KORIŠTENIH RAČUNALNIH PROGRAMA

Karakteristike sliva rijeke Bednje određene su i prikazane korištenjem geografskog informacijskog sustava, GIS pomoću kojeg je omogućeno prikazivanje, upravljanje, uređivanje i analiziranje prostornih podataka.

GIS podaci predstavljaju objekte u stvarnom svijetu (vodotok, upotreba zemljišta, visina, tip tla) pomoću digitalnih podataka. Navedeni objekti mogu se prikazati kao zasebni objekti (npr. meteorološke postaje) i kao neprekinuta polja (npr. visina). GIS omogućuje spremanje podataka u obliku rastera i vektora, a u ovom radu korištena je rasterska metoda spremanja podataka (Slika 7). Rasterski podaci koriste pravilni grid ćelija koji pokriva područje za spremanje i prikaz slike te pridruženih atributa. Svaka ćelija u gridu je element slike koji zovemo piksel. Krajnji rezultat GIS-a je izrada kartografskog prikaza (Biondić, 2013).

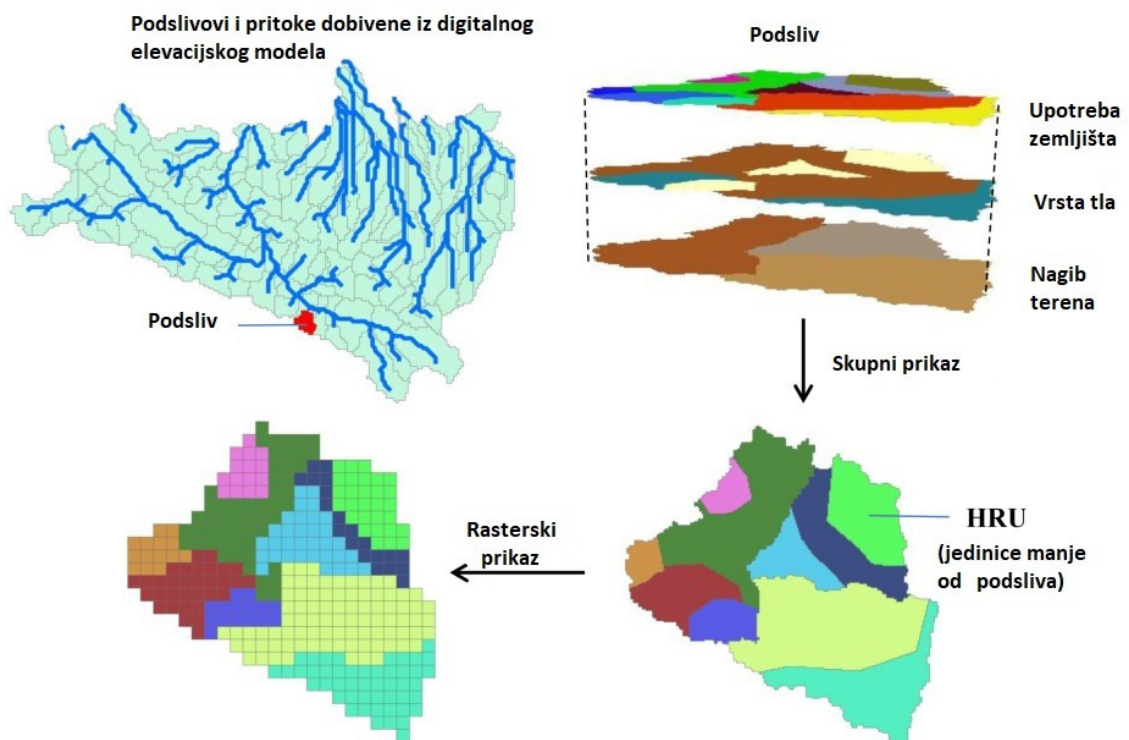


Slika 7. Osnovni model GIS-a

ArcMap sastavni je dio ArcGIS desktop programskom paketa tvrtke ESRI koji se koristi pri obradi geoprostornih podataka. Korisniku omogućuje definiranje zasebnih klasa unutar prostornih podataka, pregled podataka, postavljanje simbola svakoj posebnoj grupi ili klasi prostornih podataka, analizu, izradu karate te mnoge druge funkcije (ESRI,

2012.). U ovome radu korištena je verzija ArcGIS softvera 10.1, edukacijska licenca Geotehničkog fakulteta.

Za izradu hidrološkog modela sliva, korišten je računalni program SWAT. SWAT je program koji se koristi za opisivanje riječnih slivova, simulaciju kvalitete i količine površinskih i podzemnih voda pod utjecajem različitih vrsta tla, zemljišnog pokrova i klimatskih promjena (Slika 8.) te se koristi za procjenu, kontrolu i prevenciju erozije i zagađenja tla (SWAT | Soil & Water Assessment Tool, 2020).



Slika 8. Shematski prikaz modela SWAT-a (Zhang, *et al.*, 2017)

3.2. ODABIR PODATAKA

Prije same izrade modela, bilo je potrebno odrediti reprezentativne podatke, odnosno odrediti mjerne stanice koje su odgovarajuće za sliv u neprekidnom vremenskom razdoblju. Kako bi se osigurala preciznija izrada hidrološkog modela, korišteni podaci imaju dnevnu točnost podataka.

Analizom podataka mjernih postaja koje se nalaze unutar sliva (Klenovnik, Bednja, Kalnički Ljubelj, Varaždinske Toplice, Ludbreg i Novi Marof (Slika 3) uočeno je da u podacima klimatološke postaje Novi Marof dolazi do čestih prekida u mjerenjima koja predstavljaju poteškoće pri izradi hidrološkog modela. Simulacija unutar SWAT programa zahtjeva kontinuiranost ulaznih podataka, odnosno potrebno je pronaći dovoljno dug period bez značajnih prekida u mjerenju, jer je u suprotnom nemoguće dobiti model pa je stoga odlučeno ne koristiti podatke s navedene postaje. Nekorištenje podataka nije utjecalo na dobiven hidrološki model zbog dobre pokrivenosti s drugim meteorološkim postajama na slivu. U blizini meteorološke postaje Novi Marof nalaze se postaje Varaždinske Toplice i Kalnički Ljubelj te su ti podaci bili dostatni za interpolaciju.

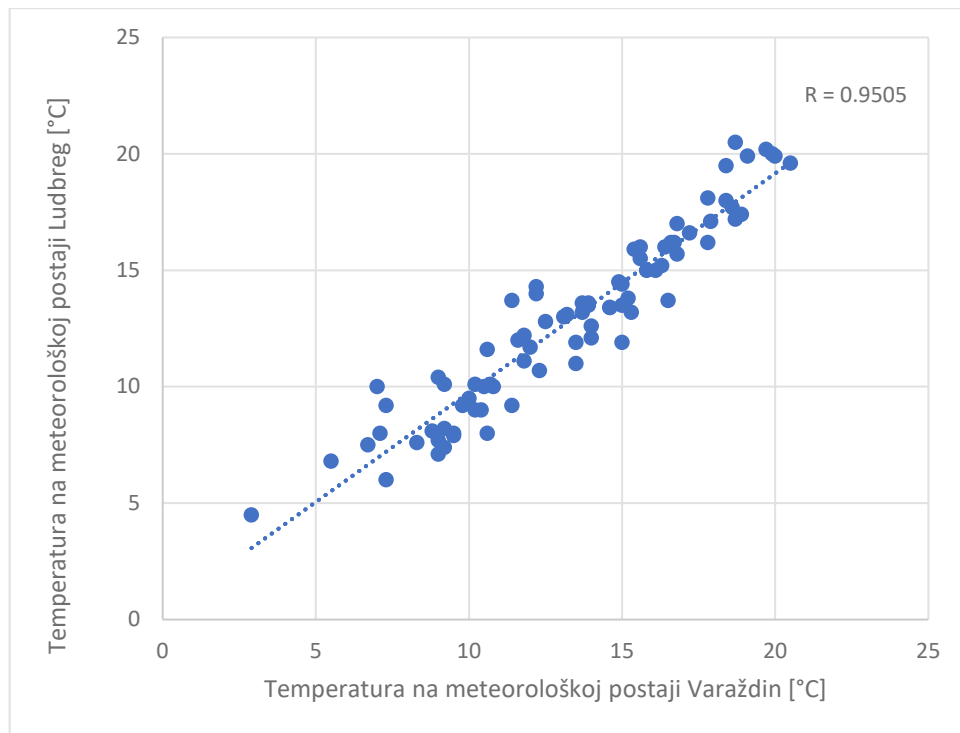
Preklapanjem klimatoloških podataka sa svih ostalih mjernih postaja unutar sliva, izuzevši postaju Novi Marof, utvrđen je idealan vremenski period od 1. siječnja 2009. do 31. prosinca 2017. godine u kojemu su prekidi mjerenja na postajama minimalni.

Jedini preostali problem nedostatka podataka pojavio se na klimatološkoj postaji „Ludbreg“ pri sljedećim parametrima:

- Minimalna dnevna temperatura - 8. mjesec 2017. godine,
- Srednja dnevna relativna vlaga - 11. mjesec 2010. i 2011. godine,
- Srednja dnevna relativna vlaga - 3. i 4. mjesec 2013. godine,
- Maksimalna dnevna temperatura - 12. mjesec 2011. godine.

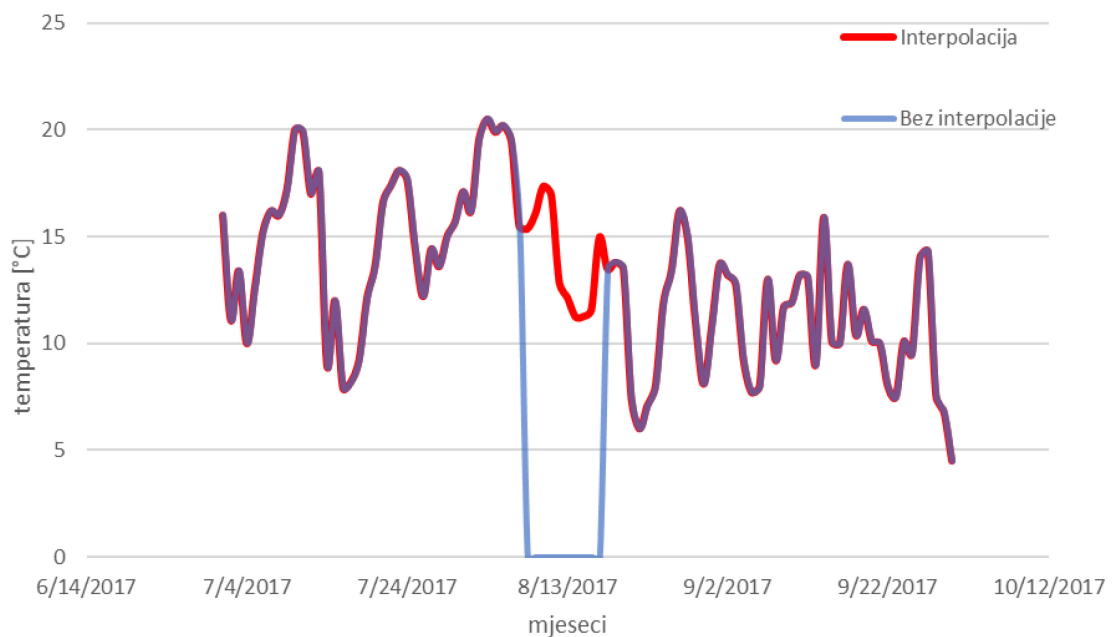
Svi ostali podaci su bili zadovoljavajuće dužine i količine podataka.

Kako bi se nedostajući podaci na postaji „Ludbreg“ nadopunili, odnosno interpolirali s postojećim podacima napravljena je usporedba sa susjednim klimatološkim postajama. Analizom je utvrđeno da je najsličnija najbliža klimatološka postaja Varaždin. Podaci s postaje Varaždin preklapljeni su s podacima postaje Ludbreg kako bi se odredila njihova međusobna povezanost. Analizom je utvrđeno da koeficijent korelacije (detaljno objašnjeno u poglavlju: 3.5 Matematička funkcija usporedbe promatranih i modeliranih protoka) iznosi 0,95 (Slika 9).



Slika 9. Prikaz korelacije meteoroloških postaja Ludbreg i Varaždin za razdoblje od srpnja. do rujna 2017. godine; plave točke prikazuju minimalnu dnevnu temperaturu

U konačnici su podaci koji nedostaju na postaji „Ludbreg“ nadopunjeni uz pomoć interpolacije s podacima s mjerne postaje „Varaždin“ (Slika 3)



Slika 10. Grafički prikaz primjera interpolacije podataka o minimalnoj temperaturi na meteorološkoj postaji Ludbreg

Za interpolaciju se koristio niz podataka od 4 godine za traženi mjesec, a podaci s postaje „Varaždin“ su oduzeti od podataka s postaje „Ludbreg“ nakon čega su podijeljeni s brojem dana u mjesecu. Na taj način dobiven je korelacijski koeficijent pomoću kojeg su određeni podaci koji nedostaju.

3.3. PRIPREMA PODATAKA ZA SWAT

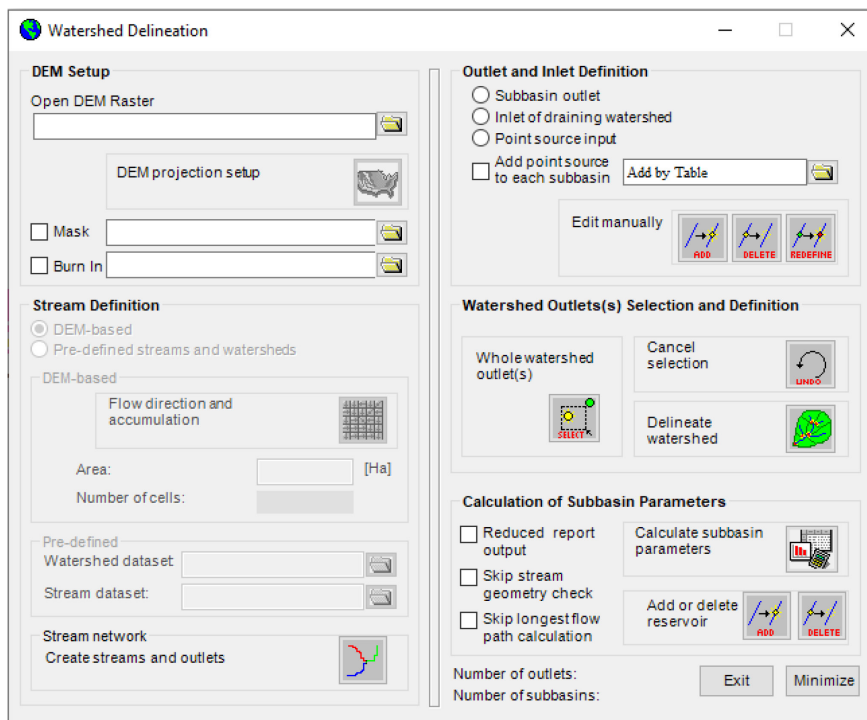
Dobiveni podaci iz DHMZ-a nisu u prikladnom formatu za korištenje u SWAT modelu. Modeliranje u SWAT-u zahtjeva *.txt* format, a podaci moraju biti poredani u nizu od prvog do zadnjeg dana promatranog perioda, počevši s datumom prvog podatka koji daje ulazne informacije za SWAT. Zbog toga je prikupljene podatke prije njihove upotrebe bilo potrebno preurediti u odgovarajući oblik te su dobiveni podaci u *.file* formatu. Automatsko formatiranje podataka u *.txt* oblik također je napravljeno, ali kao zasebna priprema podataka te s toga u ovom radu nije opisan način njihove pripreme.

Dodatna priprema podataka za SWAT podrazumijevala je prikaz slivnoga područja u digitalnom obliku. U slučaju ovog završnog rada, ona je podrazumijevala pripremu DEM-a (engl. *Digital Elevation Model*) i Shapefile-a granica slivnog područja u ArcGIS-u (EU-DEM v1.1 — Copernicus Land Monitoring Service, 2020). DEM je dodatno prilagođen promatranom području na način da se prikazuju samo podaci vezani za sliv rijeke Bednje (naredba „Clip“). U svrhu izbjegavanja mogućih prekida rijeke Bednje, odnosno za dobivanje preciznijeg hidrološkog modela, dodatno je odrađena digitalizacija cjelokupnog korita rijeke Bednje.

3.4. OBRADA PODATAKA U SWAT-u

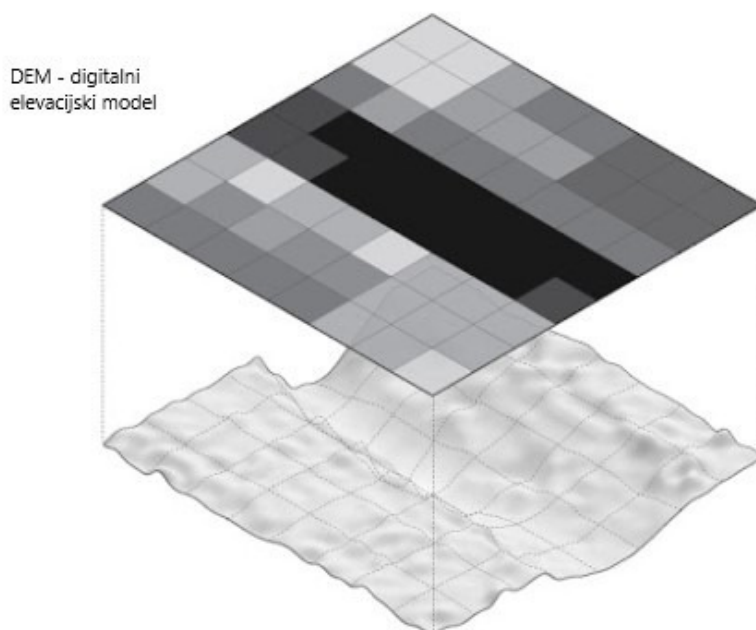
Ocrtavanje vodnog područja (engl. *Delineate Watershed*)

Obrada podataka započeta je učitavanjem DEM-a, digitaliziranog oblika rijeke i mreža vodotoka u ArcSWAT dodatku softvera ArcMap (Slika 11).



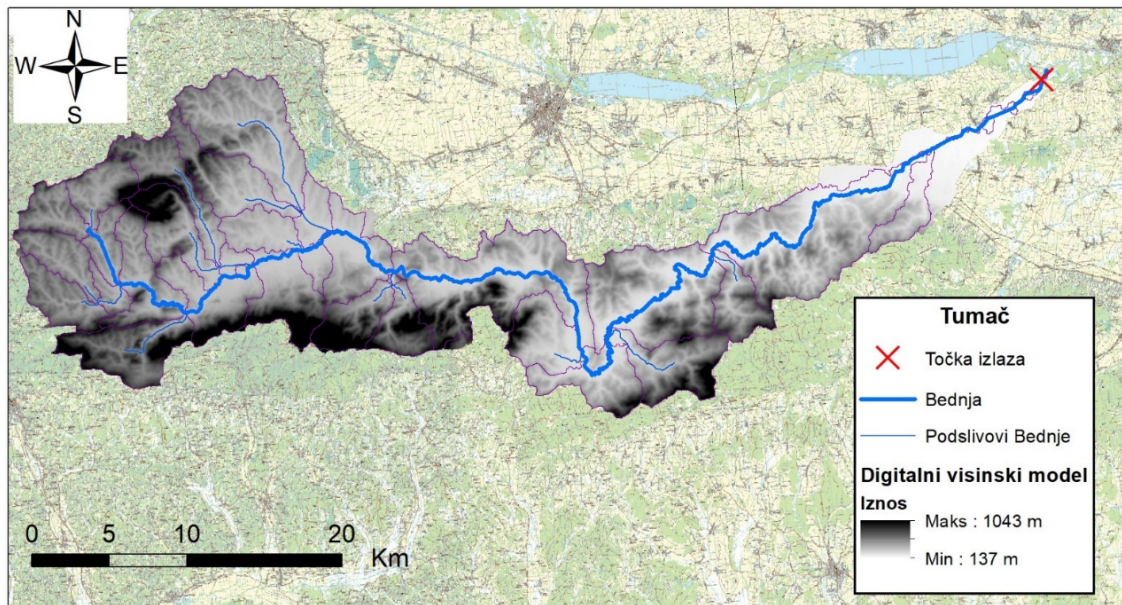
Slika 11. Sučelje ocrtanja vodnog područja

DEM je podloga koja sadrži podatke o nadmorskoj visini cijelog područja, a dana je u obliku rasterske mreže (Slika 12). Rasterska mreža se može objasniti kao skup „kvadratića“ ili ćelija veličine 25 x 25 [m].



Slika 12. Shematski prikaz DEM-a (*Mapmaking Process | Structures of Coastal Resilience, 2020*)

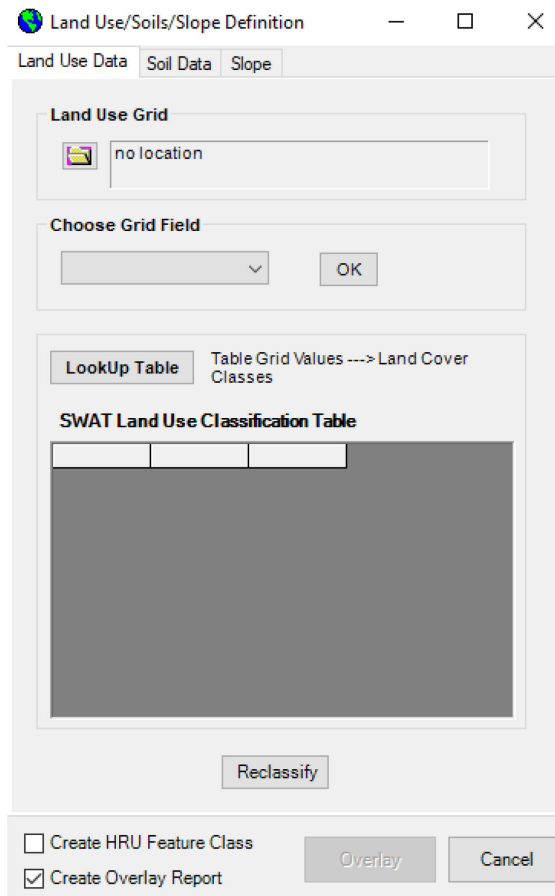
Za mrežu vodotoka definira se granična vrijednost (engl. *Define threshold*) veličine podslivova s ciljem podijele sliva na željeni broj podslivova. Kako bi se ocrtao vodno područje, potrebno je dodavanje izlaza (engl. *Outlets*), odnosno točaka na slivu u kojima nas zanima vrijednost izlaznog protoka. U ovom radu dodana je jedna točka izlaza (Slika 13).



Slika 13. DEM sliva rijeke Bednje

Izrada HRU-ova

HRU (engl. *Hydrological Response Units*) unutar SWAT analize predstavljaju jedinice manje od podslivova koje se razlikuju ovisno o podacima o vrsti tla, upotrebi zemljišta i nagibu. Izrada počinje učitavanjem rastera upotrebe zemljišta i tla nakon čega se učitavaju tablice koje povezuju ArcSWAT oznaku i određenu vrstu tla ili načina korištenja zemljišta (Slika 14). Zatim se dodaju granične vrijednosti nagiba terena unutar zadanih vrijednosti 0 – 9999 % koje su podijeljene u 3 kategorije: 0 – 15 %, 15 – 45 %, 45 – 9999 %. Ova podjela je proizvoljna jer je sliv pretežno nizinskog tipa, odnosno većina nagiba manja je od 45 %. Nakon unosa kategorija dobiven je rasterski prikaz sliva u odnosu na nagib.

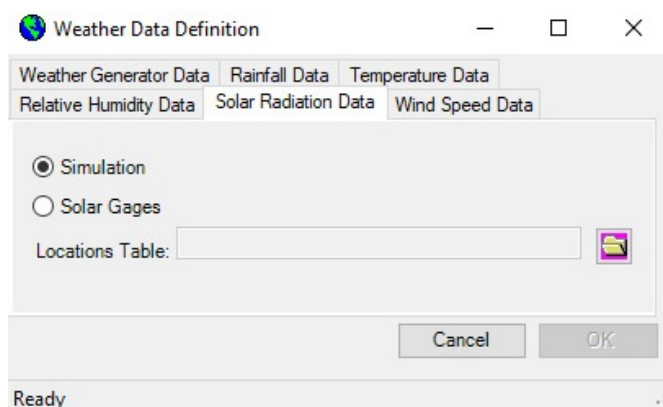


Slika 14. Prikaz sučelja prilikom dodavanja podataka

Definiranje meteoroloških podataka

U ovom koraku učitavaju se meteorološki podaci koji su prethodno prikupljeni i pripremljeni za potrebe SWAT analize (Poglavlje 3.3). Podaci se nalaze u *.txt* formatu. U kartici Weather Generator Data odabire se baza meteoroloških podataka potrebna za SWAT. Odabrana je baza podataka WGEN_CFSR_World (Global Weather Data for SWAT, 2020).

Navedena baza se koristi jer prostorno pokriva područje cijelog svijeta te vremenski pokriva period u kojem nedostaju podaci na korištenim postajama, a provedene studije (Dile and Srinivasan, 2014; Roth and Lemann, 2016) potvrdile su adekvatnost korištenja ove baze kao ulaznih parametara za SWAT model. Meteorološki podaci uključuju podatke o vjetru, temperaturi i oborinama, dok je sunčevo zračenje simulirano (Slika 15).



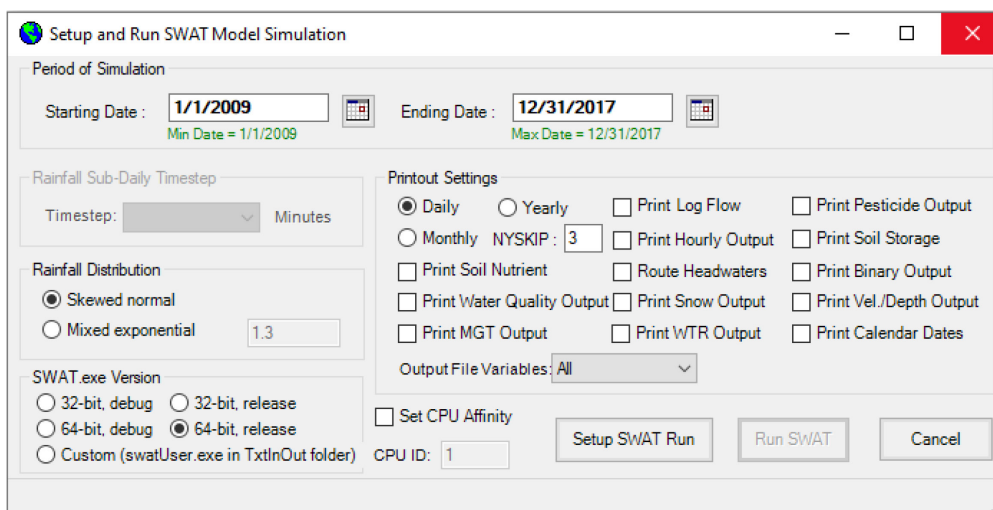
Slika 15. Sučelje definiranja meteoroloških podataka

Priprema i pokretanje SWAT simulacije

Nakon dodavanja svih korištenih podloga potrebnih za uspješno modeliranje sliva te meteoroloških podataka određuju se koraci za simulaciju (engl. *Setup and Run SWAT Model Simulation*). Potrebno je odrediti trajanje simulacije, vrstu izlaznih podataka (dnevni, mjesečni ili godišnji) te broj godina prilagodbe (Slika 16).

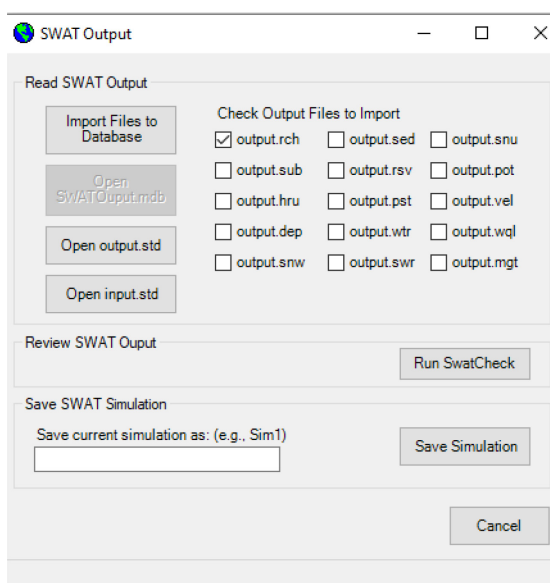
Zbog potreba pravilne simulacije određen je broj dana, odnosno trajanje simulacije je od 1. siječnja 2009. godine do 31. prosinca 2017. godine što je sveukupno 3287 dana. Ovaj period je odabran zbog dostupnosti podataka te vjerno opisuje procese odnosno situaciju na slivu.

Odabrani su dnevni izlazni podaci zbog izrade detaljnijeg prikaza te tri godine prilagodbe („warm up“ modela). Godine prilagodbe su godine koje program ne koristi u analizi, izračunu i prikazu željenih podataka, već mu služe kako bi velika odstupanja od stvarnih protoka napravio u tom vremenskom periodu, odnosno kako bi se normalizirale sve varijable (pr. kiša, temperatura) te kako bi se izbjegle eventualne pogreške u prvoj godini simulacije.



Slika 16. Sučelje pripreme i pokretanja SWAT simulacije

Nakon pokretanja i završetka simulacije, potrebno je izabrati željene izlazne parametre. Izabrana je izlazna datoteka *output.rch* zato što sadrži podatke o protoku (engl. *flow out*) (Slika 17). Podaci o protoku korišteni su za usporedbu s izmjerenim podacima s hidroloških postaja.



Slika 17. Sučelje odabira izlaznih parametara

3.5. MATEMATIČKA FUNKCIJA USPOREDBE PROMATRANIH I MODELIRANIH PROTOKA

Za usporedbu mjerenih i simuliranih protoka koristi se Nash-Sutcliffe koeficijent efikasnosti koji je definiran formulom (1) u kojoj Q_0 je izmjereni protok, a Q_m je protok dobiven simulacijom, odnosno hidrološkim modelom.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (1)$$

Q_0 je izmjereni protok u nekom vremenu t . Raspon koeficijenta efikasnosti je od $-\infty$ do 1. Iznos koeficijenta 1 govori da je modelirani protok u potpunosti točan, tj. jednak izmjerenom protoku. Prema mnogobrojnim istraživanjima sugerirano je da iznos koeficijenta u rasponu od 0,5 do 0,65 predstavlja zadovoljavajuće preklapanje simuliranih i izmjerenih protoka (Nash and Sutcliffe, 1970). Uz dobru interpretaciju i korištenje valjanih podataka, koeficijent Nash-Sutcliffe može biti dobar statistički pokazatelj preciznosti modela.

Kako bi se odredila povezanost dviju varijabli, u statistici se koriste različiti koeficijenti korelacije. Jedan od koeficijenata korelacije je Pearsonov koeficijent koji se koristi prilikom rada s linearnim modelima, odnosno kada između dviju varijabli postoji linearna povezanost i varijable imaju neprekidnu normalnu distribuciju. Vrijednost koeficijenta kreće se od +1 do -1, pri čemu +1 označava „savršenu“ pozitivnu korelaciju (sukladan porast obje varijable), dok -1 označava „savršenu“ negativnu korelaciju (sukladan porast jedne varijable, pad druge varijable), odnosno predznak koeficijenta upućuje na smjer korelacije. Pearsonov koeficijent se označava s r , a izračunava prema formuli (2) (Tabak, 2018):

$$r = \frac{E_{XY}}{\sqrt{E_{XX} * E_{YY}}} \quad (2)$$

gdje su: E_{XX} suma kvadrata odstupanja varijable X od njezine prosječne vrijednosti,

$$E_{XX} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (3)$$

E_{YY} suma kvadrata odstupanja varijable Y od njezine prosječne vrijednosti,

$$E_{YY} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

E_{XY} suma umnožaka odstupanja vrijednosti varijabli X i Y od njihovih prosjeka.

$$E_{XY} = \sum (X_i - \bar{X}) * (Y_i - \bar{Y}) \quad (5)$$

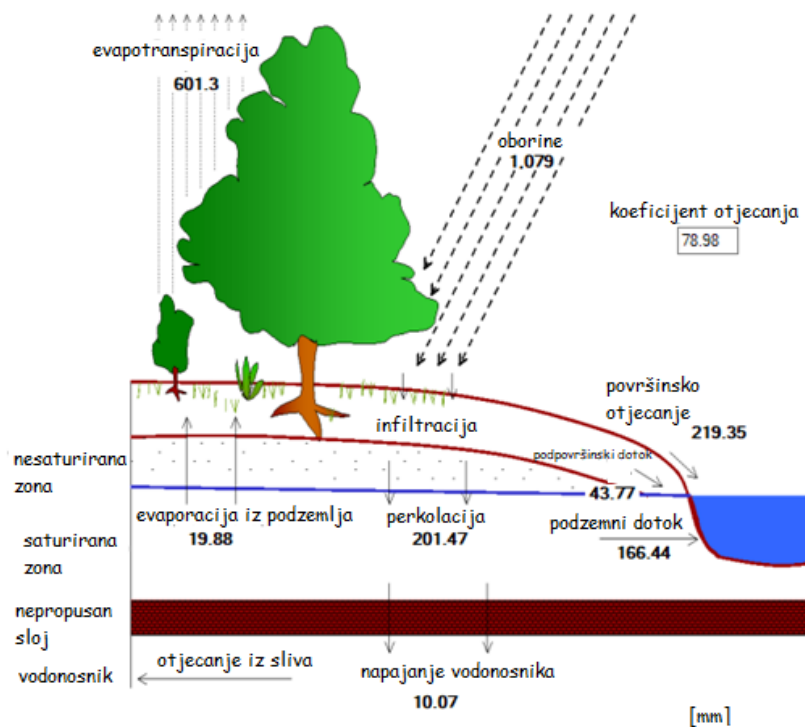
U ovom radu proračuni su napravljeni pomoću web kalkulatora čiji se link nalazi u literaturi (Online Free Calculators, 2020).

4. REZULTATI I ANALIZA DOBIVENIH PODATAKA

Nakon provedene pripreme podataka i pripreme modela, napravljena je analiza dobivenih podataka i prikaza vezanih za hidrološki model i sliv rijeke Bednje.

4.1. OPĆENIT PRIKAZ SLIVA

Pomoću meteoroloških podataka dobiven je prikaz hidrološkog ciklusa na slivu rijeke Bednje koji prikazuje količinu vode u hidrološkom ciklusu u srednjem godišnjem vremenskom periodu, a izražena je u stupcu vode [mm] (Slika 18).



Slika 18. Shematski prikaz hidrološkog ciklusa na slivu rijeke Bednje

Modelirani sliv rijeke Bednje ima sljedeće karakteristike (Slika 19):

- Duljina rijeke Bednje iznosi 101 km,
- Površina sliva iznosi 568,03 km²,
- Broj podslivova je 31,
- Broj HRU-ova je 191,
- Godine prilagodbe iznose 3,
- Vremensko razdoblje modeliranja iznosi 9 godina.

Examine Model Output

Simulation Details

SWAT Sep 7 VER 2018/Rev 670

Simulation Length (yrs)

Warm up (yrs)


HRUs

Subbasins

Output Timestep

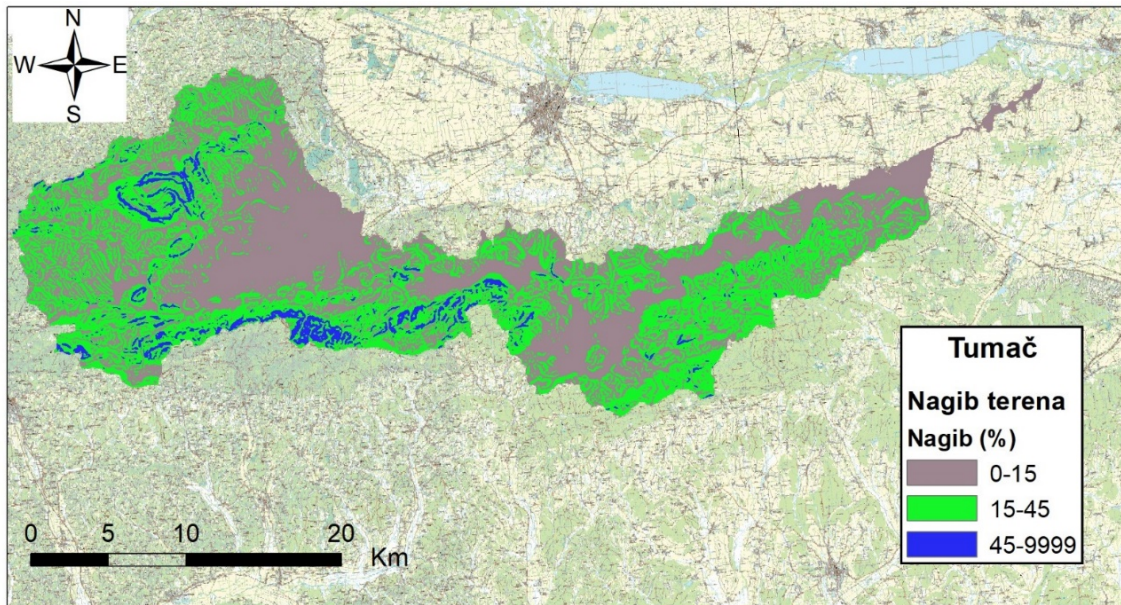
Precip Method

Watershed Area km2



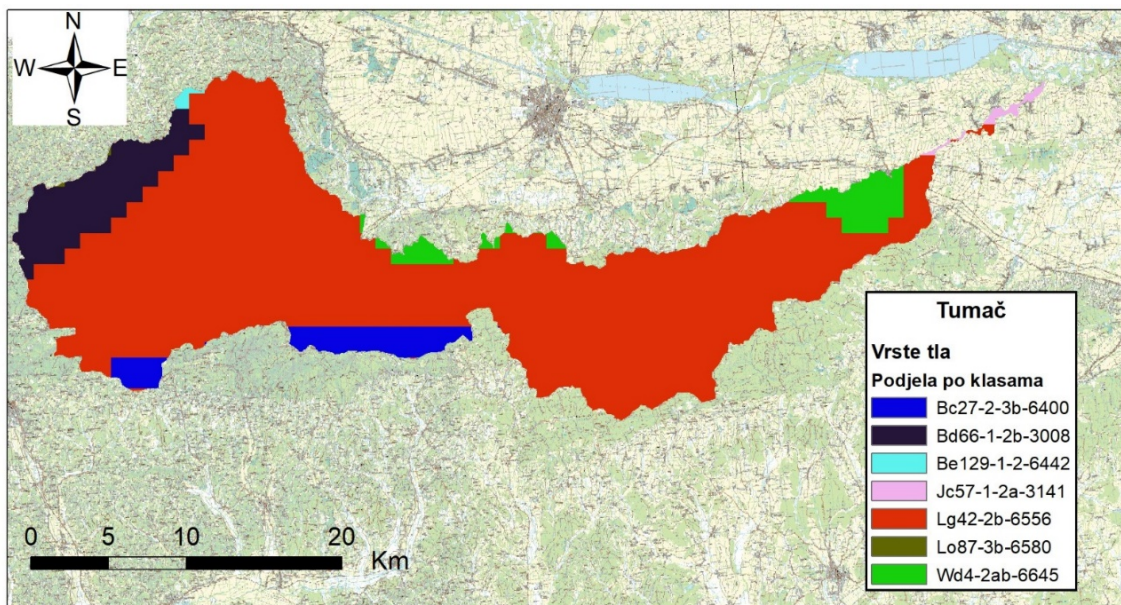
Slika 19. Sučelje izlaznih podataka u SWAT-u

Analizom je dobivena prostorna raspodjela nagiba unutar sliva rijeke Bednje (Slika 20). Vidljivo da je sliv moguće podijeliti u dva dijela: brdski i nizinski. Brdski dio se prostire sa zapada do sredine sliva, a od sredine slive prema istoku se prostire nizinski dio sliva. Iz provedene analize je također vidljivo da sliv većim dijelom pripada nizinskom području (nagib terena iznosi 0 – 15 %), što je u skladu i s postojećom literaturom (Poglavlje 2.1) koja opisuje istraživano područje; nizinski prostor je označen sivom bojom (Slika 20).



Slika 20. Rasterski prikaz sliva rijeke Bednje u odnosu na nagib terena








Izdvojeno je 7 vrsta tala, koja su uz pomoć ArcMAP aplikacije prikazane u 7 zasebnih kategorija (Slika 21).



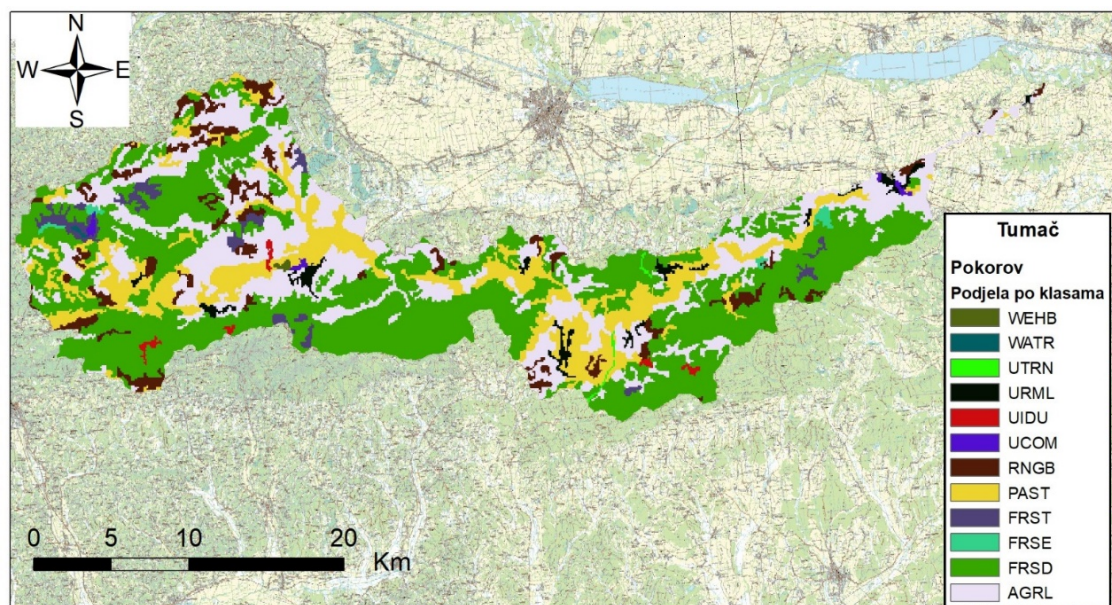
Slika 21. Rasterski prikaz podjele sliva rijeke Bednje prema vrsti tla

Tablica 1 sadrži detaljna objašnjenja FAO oznake koje su ujedno i klasifikacijske oznake unutar SWAT-a. Navedena su tla koja su prisutna na slivu te postotak površine koji zauzimaju. Iz dobivenog prikaza vidljivo je da se na 82,85 % površine slive rasprostire glinoviti luvisol (glinoviti les).

Tablica 1. Vrste tla prema FAO klasifikaciji prisutne na slivu rijeke Bednje

Boja	SWAT oznaka	Vrsta tla	Postotak zastupljenosti [%]
	Bc27-2-3b-6400	kromični kambisol	4,27
	Bd66-12b-3008	distrični kambisol	8,01
	Be129-1-2-6442	eutrični kambisol	0,20
	Jc-57-1-2a-3141	vapnenasti fluvisol	0,45
	Lg42-2b-6556	glinoviti luvisol	82,85
	Lo87-3b-6580	ortski luvisol	0,04
	Wd-2ab-6645	distrični planosol	4,18

Pomoću SWAT-a je dobiven rasterski prikaz podjele sliva rijeke Bednje prema upotrebi zemljišta i pokrovu (Slika 22). CORINE-om je određeno 12 kategorija zemljišta na slivu rijeke Bednje. Tablica 2 sadrži popis kategorija koje su korištene unutar SWAT programa, boju kojom je određena kategorija označena na karti te postotak zastupljenosti određenog pokrova. Na slivu rijeke Bednje najviše je zastupljena bjelogorična šuma s postotkom zastupljenosti od 46,79 %. Zatim se najveći postotak zastupljenosti odnosi na nenavodnjavane oranice 26,34 % i pašnjake 16,10 %.



Slika 22. Rasterski prikaz podjele sliva rijeke Bednje prema upotrebi zemljišta

Tablica 2. Vrste pokrova i upotrebe zemljišta na slivu rijeke Bednje

Boja	CLC oznaka	Vrsta pokrova	Postotak zastupljenosti [%]
	WEHB	močvarna područja	0,09
	WATR	vodna tijela	0,05
	UTRN	cestovna i željeznička mreža te pripadajuće zemljište	0,14
	URML	nepovezana gradska područja	1,54
	UIDU	mjesta eksploatacije mineralnih sirovina	0,41
	UCOM	industrijske ili komercijalne jedinice	0,28
	RNGB	prijelazna šumska područja	5,73
	PAST	pašnjaci	16,10
	FRST	miješana šuma	2,10
	FRSE	crnogorična šuma	0,43
	FRSD	bjelogorična šuma	46,79
	AGRL	nenavodnjavane oranice	26,34

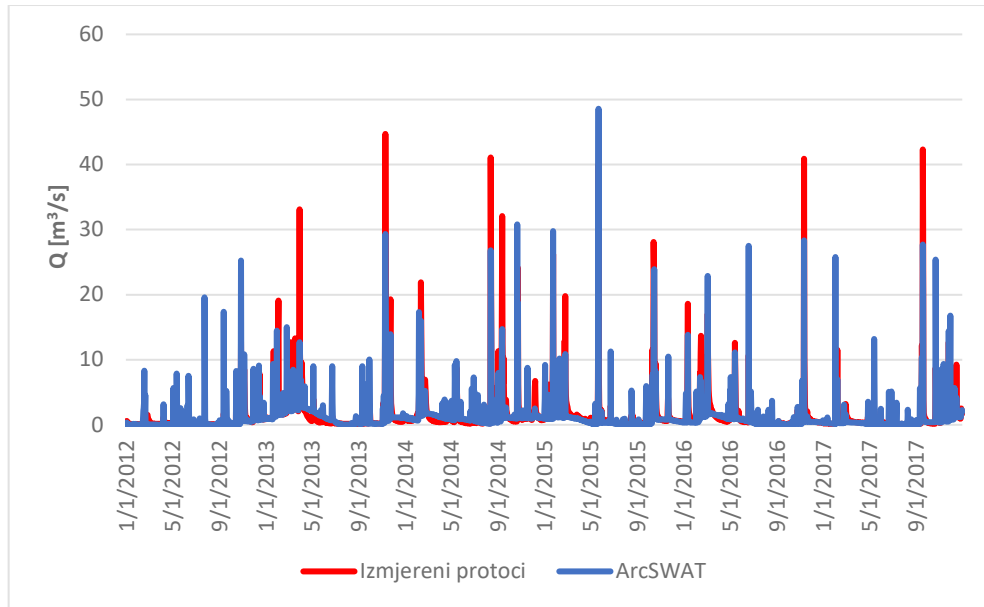
4.2. PRIKAZ I USPOREDBA DOBIVENIH PROTOKA IZ SWAT-a

Modeliranjem sliva u SWAT-u dobivene su vrijednosti srednjih dnevnih protoka na mjestima hidroloških postaja na rijeci Bednji. Vrijednosti tih protoka uspoređene su s izmjerenim vrijednostima protoka na postajama te su uočena određena odstupanja modela od mjerenih podataka. Usporedbe su prikazane pomoću hidrograma na slikama koje slijede (Slika 23, Slika 24, Slika 25, Slika 26, Slika 27), dok se u tablici nalazi statistički prikaz usporedbe podataka (Tablica 3).

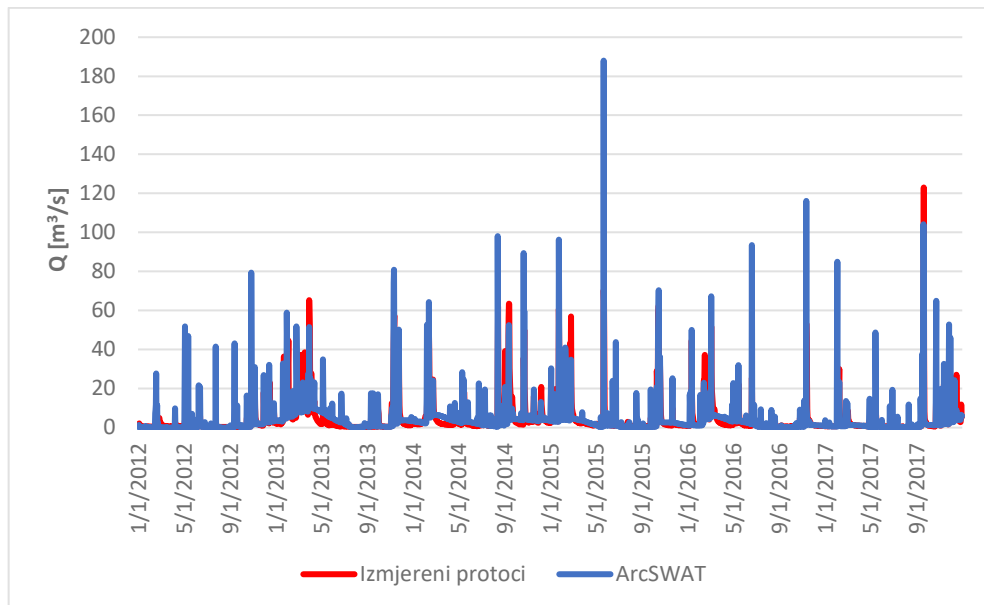
Model najvjernije simulira protok za postaju Lepoglava, dok su pogreške u simulaciji najveće za postaju Ludbreg. Uočeno je da se preciznost smanjuje povećanjem protoka, odnosno precizniji modeli dobiveni su na postajama u kojima su zabilježeni manji protoci. Također, preciznost ovisi i o broju dodanih varijabli, odnosno udaljavanjem od izvora se povećava pogreška jer svaka varijabla (kiša, temperatura, evapotranspiracija) utječe na simulirani protok zbog čega se sustavno greška prema kraju sliva povećava.

Koeficijent efikasnosti modela (Nash-Sutcliffe koeficijent) u formuli sadrži kvadrat protoka što uzrokuje povećanje pogreške pri velikom vodnom valu, dok se koeficijent korelacije usredotočuje na bazni tok te ne ovisi u tako velikoj mjeri o velikim vodnim valovima („pikovi“ na hidrogramu). Prema koeficijentu efikasnosti najveće podudarnosti

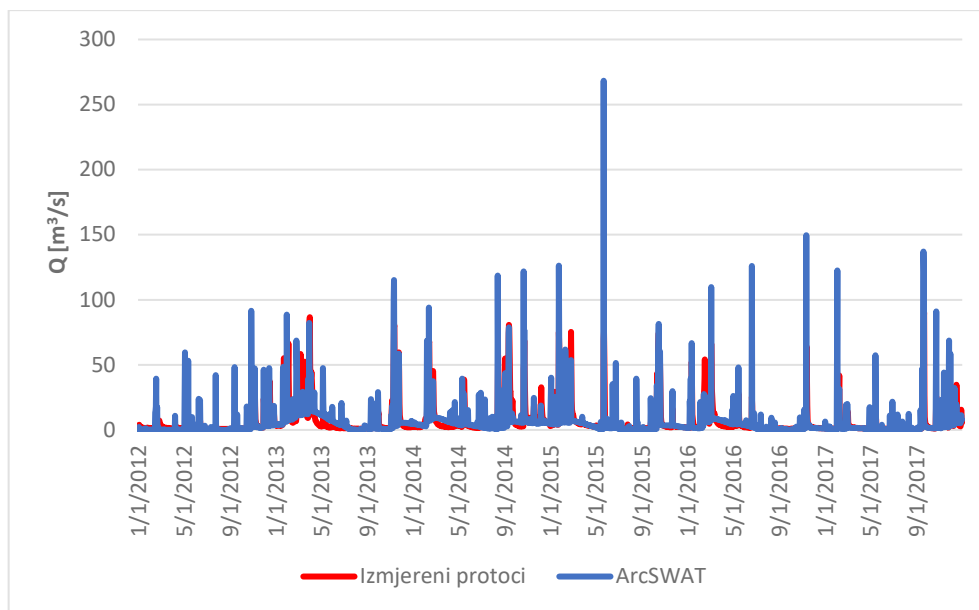
protoka se nalaze na postaji Lepoglava (0,557), dok na ostalim postajama zbog kumulacije grešaka i većih protoka, koeficijent efikasnosti nije u odgovarajućem rasponu. Prema koeficijentu korelacije, povezanost podataka o protoku je na svim postajama zadovoljavajuća (Tablica 3).



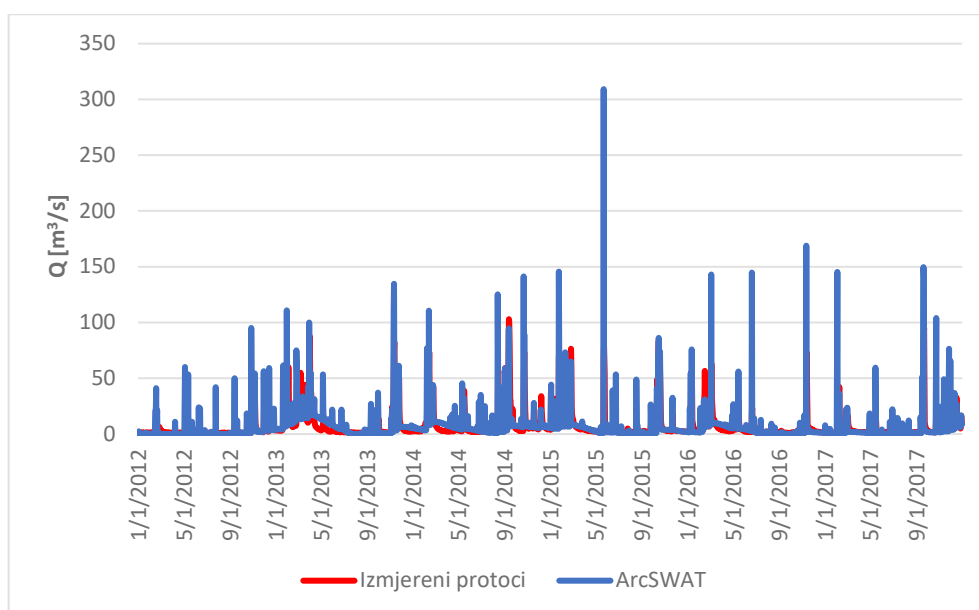
Slika 23. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Lepoglava (1.1.2009. - 31.12.2017.)



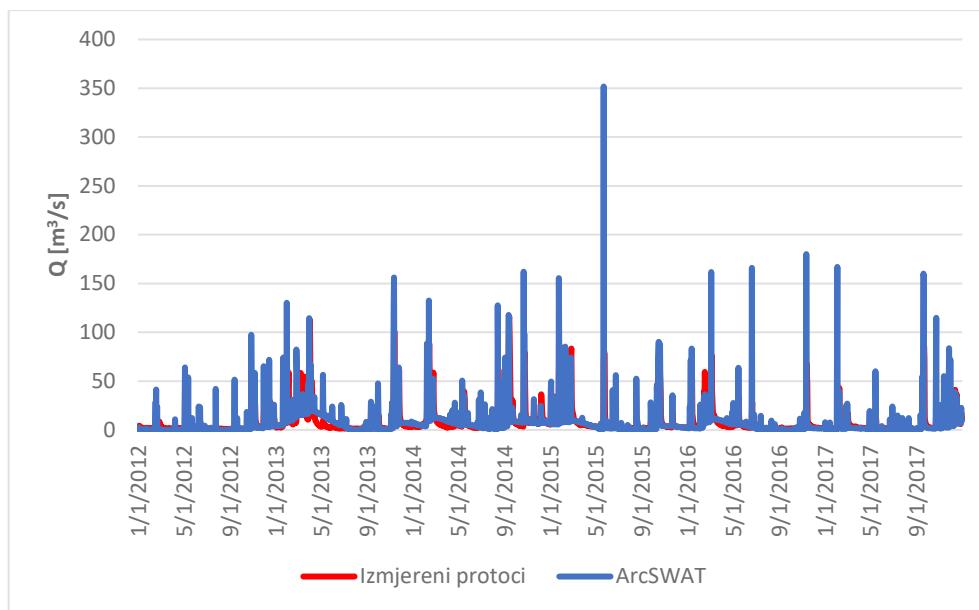
Slika 24. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Željeznica (1.1.2009. - 31.12.2017.)



Slika 25. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Ključ (1.1.2009. - 31.12.2017.)



Slika 26. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Tuhovec (1.1.2009. - 31.12.2017.)



Slika 27. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Ludbreg (1.1.2009. - 31.12.2017.)

Tablica 3. Izračunati koeficijent efikasnosti modela i koeficijent korelacije

Postaja	Koeficijent efikasnosti modela	Koeficijent korelacije
Lepoglava	0,557	0,760
Željeznica	0,159	0,685
Ključ	-0,087	0,602
Tuhovec	-0,448	0,558
Ludbreg	-0,552	0,506

Iz grafova je vidljivo da visoki protoci povećavaju pogrešku pri modeliranju, odnosno uzrokuju veća odstupanja. Kumulacija pogreške je sve veća prema izlaznoj točki.

S obzirom na odabrani vremenski period i količinu podataka za isti, dobiven model je ispunio svoj osnovni cilj – usporedbu stvarno izmjerenih podataka s podacima dobivenim složenijom analizom podataka sa slivnog područja.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izrađen hidrološki model rijeke Bednje koristeći računalni program ArcMAP i njegov dodatak ArcSWAT. Za izradu hidrološkog modela Bednje u SWAT-u iskorištene su podloga pokrova CLC 2006, podloga tla FAO85eu te meteorološki podaci o oborinama, vjetru, insolaciji, temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka. Pomoću simulacije je dobiven model protoka koji je uspoređen sa stvarno izmjerenim protocima na hidrološkim postajama. Vremenski period simulacije je od 1.1.2009. do 31.12.2017. godine.

Iz dobivenih rasterskih podataka vidljivo je sliv podijeljen na dva dijela, a to su brdski i nizinski pri čemu nizinski dio prevladava. Na slivu se najvećim dijelom rasprostire glinoviti les, a najvećim dijelom su zastupljeni bjelogorična šuma, nenavodnjavane oranice i pašnjaci.

Usporedbom simuliranih i izmjerenih protoka na hidrološkim postajama, vidljivo je da model u određenoj mjeri zadovoljava potrebe ovog rada. Na hidrološkoj postaji Lepoglava prema koeficijentima efikasnosti modela i korelacije dobivena su najveća preklapanja. Ovaj model mogao bi se poboljšati daljnjom kalibracijom u programu SWAT-CUP, povećanjem perioda simulacije, količinom i kvalitetom podataka (neprekinutost podataka). Hidrološkim modeliranjem ovog tipa, moguće je prognozirati buduće protoke. Ovakvim hidrološkim modeliranjem doprinosi se boljem upravljanju vodama.

6. LITERATURA

Biondić, R. (2013): Uvod u GIS - interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.

Dedić, Ž. (2015): Geološka potencijalnost mineralnih sirovina u zonama pogodnosti sa zaštitnim pojasom od 100 metara na građevinska područja u Varaždinskoj županiji, HGI-CGS, Zagreb.

Dile, Y. T. and Srinivasan, R. (2014): Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(5), pp. 1226–1241.

Državni hidrometeorološki zavod (2020): Podaci s meteoroloških i hidroloških postaja na području sjeverozapadne Hrvatske.

Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2012): ArcGIS (GIS software), verzija 10.1, edukacijska licenca Geotehničkog fakulteta.

HGI (2015): Geološka karta Varaždinske županije. U: Rudarsko-geološka studija Varaždinske županije, Hrvatski geološki institut, Zagreb.

Hrvatske vode (2020): *Shapefile slivnog područja rijeke Bednje*.

Marković, T., Larva, O., Brkić, Ž., Dolić, M., Kuhta, M. (2015): Stanje podzemnih voda na vodnom području rijeke Dunav s obzirom na prirodan sadržaj metala i njihov antropogeni utjecaj, HGI-CGS, Zagreb.

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles', *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282–290.

Neitsch, S. L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2005): Soil and water assessment tool, Texas.

Roth, V. and Lemann, T. (2016): 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(2), pp. 921–934.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., *et al.* (2010): The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), pp. 1015–1058

Šimunić, A. (1986): Geološka građa okolice Lepoglave i osvrt na pojave mineralnih sirovina, JAZU, Varaždin.

Tabak, A. (2018): Pearsonov korelacijski koeficijent, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Odjel za matematiku, Osijek.

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M. *et al.* (2008): Klimatski atlas Hrvatske 1961-1990, 1971-2000, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb.

Zhang, Y., Hou, J., Gu, J., Huang, C., Li, X. (2017): SWAT-Based Hydrological Data Assimilation System (SWAT-HDAS): Description and Case Application to River Basin-Scale Hydrological Predictions, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(8), pp. 2863–2882.

Žugaj, R. (2000): Hidrologija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Mrežni izvori podataka:

CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service. Dostupno na: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>. Preuzeto dana: 26.05.2020.

ESDAC - European Commission. Dostupno na: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/>. Preuzeto dana: 26.05.2020.

EU-DEM v1.1 — Copernicus Land Monitoring Service. Dostupno na: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1>. Preuzeto dana: 10.06.2020.

Global Weather Data for SWAT. Dostupno na: <https://globalweather.tamu.edu/>. Preuzeto dana: 11.10.2020.

Hidrološki i hidraulički modeli | Frisco project. Dostupno na: <https://frisco-project.eu/hr/o-projektu-hr/o-upravljanju-rizicima-od-poplava/hidroloski-i-hidraulicki-modeli/>. Preuzeto dana: 21.6.2020.

HRVATSKA|Facebook. Dostupno na: <https://hr-hr.facebook.com/Hrvatska365/photos/bednja-je-rijeka-koja-cijelim-tokom-teče-kroz-hrvatsku-i-desna-pritoka-rijeke-dr/10151820261351881/> Preuzeto dana: 26.05.2020.

Mapmaking Process | Structures of Coastal Resilience. Dostupno na: <http://structuresofcoastalresilience.org/mapping/mapmaking-process/>. Preuzeto dana: 12.06.2020.

Online Free Calculators. Dostupno na: <https://agrimetsoft.com/calculators/>. Pristupljeno dana: 26.05.2020.

SWAT | Soil & Water Assessment Tool. Available at: <https://swat.tamu.edu/>. Preuzeto dana: 25.05.2020.

POPIS SLIKA

Slika 1. Smještaj sliva unutar sjeverozapadnog dijela Republike Hrvatske	4
Slika 2. Aluvij rijeke Bednje Rijeka Bednje prikazan na isječku Geološke karte Varaždinske županije (HGI 2015)	5
Slika 3. Rijeka Bednja (preuzeto s Facebook stranice: <i>HRVATSKA, 2020</i>)	6
Slika 4. Prikaz meteoroloških postaja na slivu rijeke Bednje	8
Slika 5. Kartografski prikaz CLC Europe (CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service, 2020)	9
Slika 6. Kartografski prikaz FAO Europe (CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service, 2020)	9
Slika 7. Osnovni model GIS-a	11
Slika 8. Shematski prikaz modela SWAT-a (Zhang, <i>et al.</i> , 2017)	12
Slika 9. Prikaz korelacije meteoroloških postaja Ludbreg i Varaždin za razdoblje od srpnja. do rujna 2017. godine; plave točke prikazuju minimalnu dnevnu temperaturu..	14
Slika 10. Grafički prikaz primjera interpolacije podataka o minimalnoj temperaturi na meteorološkoj postaji Ludbreg	14
Slika 11. Sučelje ocrtavanja vodnog područja	16
Slika 12. Shematski prikaz DEM-a (<i>Mapmaking Process Structures of Coastal Resilience, 2020</i>)	16
Slika 13. DEM sliva rijeke Bednje	17
Slika 14. Prikaz sučelja prilikom dodavanja podataka	18
Slika 15. Sučelje definiranja meteoroloških podataka	19
Slika 16. Sučelje pripreme i pokretanja SWAT simulacije	20
Slika 17. Sučelje odabira izlaznih parametara	20
Slika 18. Shematski prikaz hidrološkog ciklusa na slivu rijeke Bednje	23
Slika 19. Sučelje izlaznih podataka u SWAT-u	24
Slika 20. Rasterski prikaz sliva rijeke Bednje u odnosu na nagib terena	25
Slika 21. Rasterski prikaz podjele sliva rijeke Bednje prema vrsti tla	25
Slika 22. Rasterski prikaz podjele sliva rijeke Bednje prema upotrebi zemljišta	26
Slika 23. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Lepoglava (1.1.2009. - 31.12.2017.)	28

Slika 24. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Željeznica (1.1.2009. - 31.12.2017.)	28
Slika 25. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Ključ (1.1.2009. - 31.12.2017.)	29
Slika 26. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Tuhovec (1.1.2009. - 31.12.2017.)	29
Slika 27. Usporedba srednjih dnevnih protoka Q na hidrološkoj postaji Ludbreg (1.1.2009. - 31.12.2017.)	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste tla prema FAO klasifikaciji prisutne na slivu rijeke Bednje	26
Tablica 2. Vrste pokrova i upotrebe zemljišta na slivu rijeke Bednje	27
Tablica 3. Izračunati koeficijent efikasnosti modela i koeficijent korelacije	30