

UDK/UDC: 004.4:556.18(497.4)

Prejeto/Received: 27.01.2017

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 04.04.2017

UPORABA MODELA SWAT ZA HIDROLOŠKO MODELIRANJE APPLICATION OF THE SWAT MODEL FOR HYDROLOGICAL MODELING

Miha Kovačec¹, Mojca Šraj^{1,*}

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Izvleček

V prispevku je predstavljena uporaba modela SWAT, ki je v osnovi namenjen upravljavcem z vodami, za napovedovanje in oceno različnih naravnih in človeških vplivov na vodo, donose sedimentov in vnose hranil s kmetijskih površin. Glavna cilja raziskave sta bila analiza možnosti uporabe modulov modela SWAT, ki se nanašajo na fizikalne pojave gibanja vode pri oblikovanju površinskega odtoka in ocena smotrnosti uporabe programa za hidrološko modeliranje. V ta namen smo izdelali hidrološki model porečja Glinščice, ki je bilo že predmet več hidroloških raziskav in za katerega smo imeli na voljo lastne meritve padavin in pretokov. Model smo umerili in preverili ter analizirali njegovo občutljivost na posamezne parametre. Izkazalo se je, da model SWAT sicer daje zadovoljive rezultate padavinskega odtoka, je pa njegova uporaba precej zahtevna in kompleksna, prav tako tudi umerjanje, saj temelji na relativno velikem številu parametrov. Ugotovimo lahko, da je z vidika hidrološkega modeliranja uporaba modela SWAT primerna predvsem v primerih, ko nas poleg samega padavinskega odtoka zanimajo tudi drugi procesi, povezani z odtokom, kot na primer donos sedimentov ali vnos hranil s kmetijskih površin za daljše časovno obdobje.

Ključne besede: SWAT, hidrološko modeliranje, površinski odtok.

Abstract

The paper presents the use of the SWAT model, which is primarily intended for water managers, for forecasting and assessment of various natural and human impacts on water, sediment yields and nutrient inputs from agricultural land. The main aim of the research was to analyse the possibility of applying SWAT modules based on the physical phenomena of water movement in the formation of runoff and to assess the application of the model for hydrological modelling. A hydrological model of Glinščica basin was developed, which has already been the subject of several hydrological studies and for which measurements of precipitation and runoff were available. The model was calibrated and validated and the sensitivity analysis to individual parameters was performed. The application of the model demonstrates satisfactory results of surface runoff; however, its use and calibration are quite challenging and complex, since they are based on a relatively large number of parameters. We can therefore conclude that in terms of hydrological modelling, the application of a SWAT model is particularly suitable in cases where we are interested not only in the runoff, but also in other processes related to it, such as sediments loads or intake of nutrients from agricultural land during a longer period of time.

* Stik / Correspondence: mojca.sraj@fgg.uni-lj.si

© Kovačec M., Šraj M.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Kovačec M., Šraj M.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence.](#)

Keywords: SWAT, hydrological modelling, runoff.

1. Uvod

Hidrološki matematični modeli so za potrebe določanja nevarnosti in ogroženosti zaradi poplav že skoraj v celoti nadomestili dražje fizične modele. Z razvojem hitrejše računalniške opreme in dostopnostjo digitalnih modelov reliefa z večjo ločljivostjo, je mogoče poplavne valove modelirati že precej natančno. Kljub vsemu je natančnost modelov in rezultatov umerjanja še vedno odvisna predvsem od razpoložljivosti meteoroloških in hidroloških podatkov, ki je velikokrat še vedno omejena.

Računalniški model SWAT (angl. *Soil and Water Assessment Tool*) je v osnovi namenjen upravljavcem z vodami za napovedovanje in oceno različnih naravnih in človeških vplivov na vode, donose sedimentov in vnose hranil s kmetijskih površin. Razvil ga je dr. Jeff Arnold za potrebe ocene vpliva upravljanja z vodami na območju indijanskega rezervata v Arizoni in Novi Mehiki. Zasnovan je za večje prispevne površine in daljše, neprekinjene simulacije (Borah et al., 2007). SWAT vključuje značilnosti več ARS (angl. *Agricultural Research Service*) modelov in je naslednik SWRRB modela (angl. *Simulator for water resources in rural basin*).

V članku predstavljamo program SWAT in njegove s hidrologijo povezane komponente. Cilji raziskave so: (1) analizirati možnosti uporabe modulov programa SWAT, ki se nanašajo na fizikalne pojave gibanja vode pri oblikovanju površinskega odtoka, (2) izdelava modela površinskega odtoka za izbrano porečje s programom SWAT oz. prosto dostopno izpeljanko le-tega MWSWAT (angl. *MapWindow Soil and Water Assessment Tool*), (3) umerjanje, preverjanje in ovrednotenje rezultatov ter (4) ovrednotenje smotrnosti uporabe programa za hidrološko modeliranje. Izbrali smo porečje Glinščice, ki je bilo že predmet več hidroloških raziskav (Brilly et al., 2006; Dimberk in Šraj, 2010; Pestotnik et al., 2012; Rusjan, 2003; Škrbec, 2005; Šraj et al., 2010; Štajdohar, 2005) in je zato možna primerjava rezultatov z drugimi hidrološkimi modeli.

2. Metode

Za potrebe modeliranja z modelom SWAT je potrebno porečje razdeliti na več manjših hidroloških enot (HRU) (angl. *Hydrologic Response Unit*), in sicer glede na rabo tal, vrsto zemljine in naklon. HRU lahko ustvarimo za vsako rabo tal, tip tal oz. naklon posebej, vendar so v praksi ta območja lahko zelo majhna, zato je treba izbrati kompromis med natančnostjo določitve HRU in ostalimi vhodnimi podatki. Uporaba HRU je koristna predvsem, ko imajo različna območja na porečju različne tipe oz. rabo tal in ima to neposreden vpliv na hidrologijo.

Meteorološke spremenljivke, ki jih zahteva SWAT, so: padavine, najvišja/najnižja dnevna temperatura, sončno sevanje, hitrost vetra in relativna vlažnost. V model lahko vnesemo izmerjene podatke, če so le-ti na voljo, ali pa manjkajoče podatke model generira sam z vremenskim generatorjem.

Padavinske izgube lahko določimo z uporabo modificirane metode SCS CN (angl. *Soil Conservation Service Curve Number*) ali infiltracijske metode Green in Ampt-a (USACE, 2000). Pri metodi SCS CN se vrednost parametra CN nelinearno spreminja v odvisnosti od količine vlage v zemljini. CN pade, ko se vlaga v zemljini približa točki venenja in naraste do blizu 100, ko je zemljina blizu zasičenosti. Metoda zahteva dnevne podatke o padavinah (Rallison in Miller, 1981):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (1)$$

V enačbi (1) Q_{surf} predstavlja površinski odtok oz. akumulirane efektivne padavine v času t v mm, R_{day} višino padavin v času t v mm, I_a začetne izgube, ki vključujejo površinsko skladiščenje, prestrezanje in infiltracijo pred pojavom odtoka v mm in S maksimalno potencialno zadrževanje v mm. Iz analiz za manjša eksperimentalna porečja je SCS razvil empirično določeno zvezo med začetnimi izgubami in potencialnim zadrževanjem:

$$I_a = 0,2 S. \quad (2)$$

Infiltracijska metoda Green in Ampt-a zahteva natančnejše podatke o padavinah (urne ali krajšega časovnega intervala) in izračuna infiltracijo kot funkcijo fronte vlaženja ter potencialne in efektivne hidravlične prevodnosti (Kovačec, 2012; Šraj et al., 2010). Voda, ki se ne infiltrira, postane površinski odtok. SWAT kot del površinskega odtoka upošteva tudi del odtoka, ki nastane takrat, ko je zemljina zamrznjena, in sicer tako, da v prvem sloju tal upošteva temperaturo manj kot 0 °C. Model poveča odtok iz zamrznjenih tal, kljub temu pa dovoljuje infiltracijo v suha zamrznjena tla. Mein in Larson sta leta 1973 razvila prilagojeno metodologijo določanja infiltracije z uporabo enačbe Green in Ampt-a, ki je vgrajena v model SWAT (Chow et al., 1988):

$$f_{inf,t} = K_e \left(1 + \frac{\Psi_{wf} \times \Delta\theta_v}{F_{inf,t}} \right). \quad (3)$$

V enačbi (3) $f_{inf,t}$ predstavlja stopnjo infiltracije v času t v mm/h, K_e efektivno hidravlično prevodnost v mm/h, Ψ_{wf} srk tal na meji vlaženja v mm, $\Delta\theta_v$ spremembo v volumski vsebnosti vode na meji vlaženja v mm/mm in $F_{inf,t}$ kumulativno infiltracijo v času t v mm.

Za izračun potencialne evapotranspiracije so v programu na voljo tri metode: Penman-Monteithova metoda, metoda Priestley-Taylor in Hargreavesova enačba. Ker so bili rezultati po vseh treh metodah zelo podobni, smo pri končnih simulacijah izbrali metodo Penman-Monteith, ki je od leta 1990 na predlog FAO (angl. *Food and Agriculture Organization*) tudi standardna metoda izračuna potencialne evapotranspiracije (Allen et al., 1998; Brilly in Šraj, 2005):

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot (e_z^0 - e_z) / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)}, \quad (4)$$

kjer je Δ naklon krivulje parnega tlaka v $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$, H_{net} neto sevanje, G tok toplote s površja v $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$, ρ_{air} gostota zraka v kgm^{-3} , c_p specifična toplota pri konstantnem tlaku v $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$, e_z^0 zasičeni parni tlak, e_z dejanski parni tlak, oba na

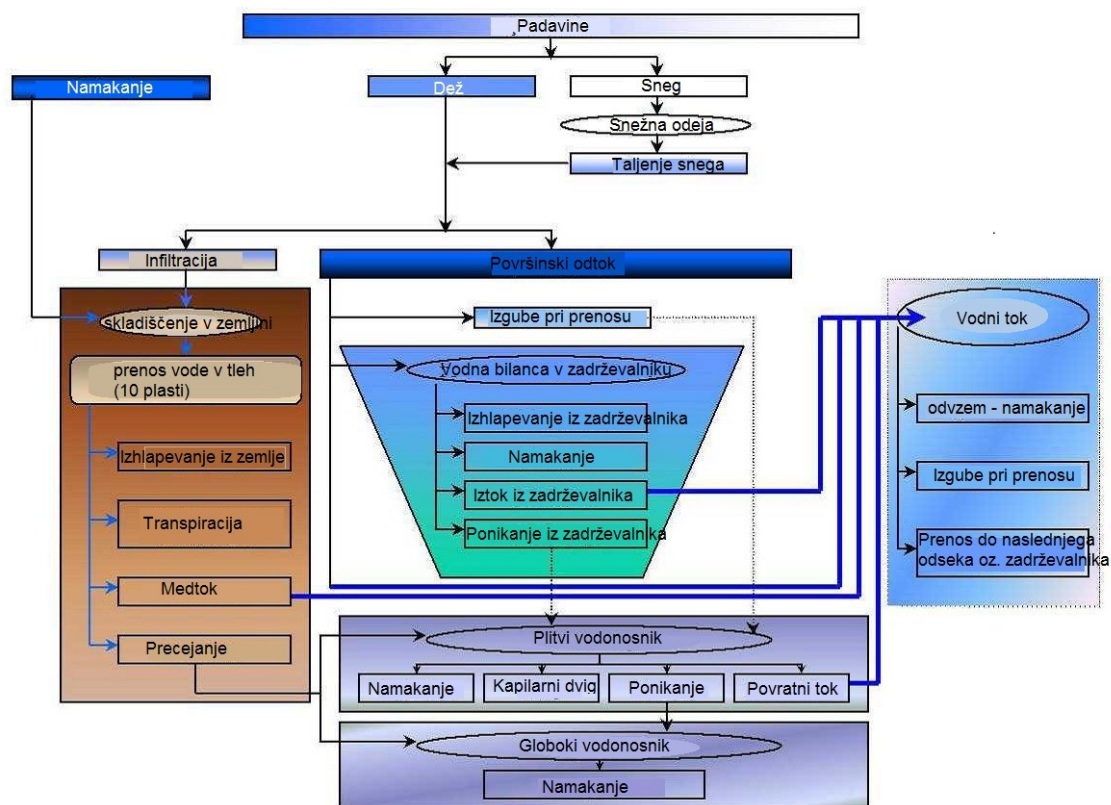
višini z v kPa, r_a zračni upor, r_c upor rastline v sm^{-1} in γ psihrometrična konstanta v $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$.

Model SWAT razdeli simulacijo hidroloških procesov v porečju v dve večji fazi (slika 1) (Neitsch et al., 2011). Prva faza je simulacija površinskega toka, ki izračuna količino vode, sedimentov, hranil in pesticidov po glavnem odvodniku posamezne HRU. Druga faza predstavlja transport vode (angl. *routing*), sedimentov, hranil in pesticidov skozi sistem vseh strug do iztoka s porečja. Model omogoča simulacijo transporta vode po strugi z uporabo metode spremenljivega koeficienta skladiščenja (Williams, 1969) ali z Muskingum-ovim modelom (Brilly in Šraj, 2006). Metoda spremenljivega koeficienta skladiščenja na določenem odseku struge temelji na kontinuitetni enačbi. Če od volumna dotoka odštejemo volumen odtoka v časovnem koraku, dobimo volumen skladiščenja na koncu časovnega koraka (Nietsch et al., 2009). Muskingumova metoda uporablja oceno končnih razlik kontinuitetne enačbe in modelira volumen skladiščenja v strugi kot kombinacijo prizmatičnega in klinastega dela vala (Brilly in Šraj, 2006).

Razdelitev porečja na HRU omogoča upoštevanje razlike v evapotranspiraciji za različne tipe zemljin in rabe tal. Površinski odtok je za vsako HRU izračunan posebej, vendar tako, da ohrani količino s celotnega porečja. Tak način poveča natančnost simulacij. Izračun površinskega odtoka v modelu SWAT temelji na naslednji enačbi vodne bilance:

$$SW_t = \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}), \quad (5)$$

kjer SW_t predstavlja končno količino vode v zemljini v mm, t čas v dnevih, R_{day} količino padavin na dan i v mm, Q_{surf} površinski odtok na dan i v mm, E_a količino evapotranspiracije na dan i v mm, w_{seep} količino vode v mm, ki se s površja infiltrira v nezasičen (vadozni) del zemeljskega površja in Q_{gw} povratni tok na dan i v mm.



Slika 1: Simulacija gibanja vode v modelu SWAT (prirejeno po: Neitsch et al., 2011).

Figure 1: Simulation of water movement in the SWAT model (adopted after: Neitsch et al., 2011).

Preglednica 1: Parametri, uporabljeni pri umerjanju modela (Arnold et al., 2011; Kovačec, 2012).

Table 1: Parameters used for model calibration (Arnold et al., 2011; Kovačec, 2012).

Parameter	Podmodel SWAT
$r_CN2.mgt$ - koeficient odtoka	Management - upravljanje
$v_ALPHA_BF.gw$ - faktor baznega odtoka	Groundwater - podzemna voda
$v_GWQMN.gw$ - mejna globina v plitvem vodonosniku, pri kateri se pojavi povratni tok	Groundwater - podzemna voda
$v_GW_REVAP.gw$ - hitrost gibanja vode od plitvega vodonosnika do območja korenin	Groundwater - podzemna voda
$v_GW_DELAY.gw$ - zakasnitev gibanja podzemne vode	Groundwater - podzemna voda
$v_REVAPMN.gw$ - mejna globina vode v plitvem vodonosniku, pri kateri se pojavi precejanje v globoki vodonosnik	Groundwater - podzemna voda
$v_ESCO.hru$ - faktor nadomestitve izhlapele vode	Hru - hidrološka odzivna enota
$v_CH_N2.rte$ - Manningov koeficient hrapavosti	Routing - prenos vala
$v_CH_K2.rte$ - efektivna hidravlična prevodnost struge	Routing - prenos vala
$v_SFTMP.bsn$ - temperatura, pri kateri dež postane sneg	Basin - porečje

$v_SMFMX.bsn$ - maksimalni faktor taljenja snega	Basin - porečje
$v_SMFMN.bsn$ - minimalni faktor taljenja snega	Basin - porečje
$v_SURLAG.bsn$ - koeficient zakasnitve površinskega odtoka	Basin - porečje
$r_SOL_ACW.sol$ – razpoložljiva količina vode v tleh	Soils – talni tipi
$v_TLAPS.sub$ – sprememba temperature glede na nadmorsko višino	Subbasin - podporečje

SWAT je zelo kompleksen model in ima veliko število parametrov, ki vplivajo na hidrološke procese, gibanje sedimentov, erozijo, gibanje pesticidov in hranil, donos pridelka in biomase, kakovost vode itd. Pri umerjanju smo izbrali parametre, ki so neposredno povezani s hidrološkimi procesi in gibanjem vode znotraj porečja. Izbrali smo 15 parametrov, ki neposredno vplivajo na gibanje vode v tleh, po strugah, prenos vode med plitvim in globokim vodonosnikom, parametre povezane s taljenjem snega in pronicanjem vode (preglednica 1). Njihove končnice opredelijo, kateremu podmodelu v SWAT-u parameter pripada, umerjanje pa poteka po postopku zmanjševanja intervala vrednosti, dokler ni dosežena optimalna kombinacija parametrov. Ker je umerjanje s spreminjanjem kombinacije velikega števila parametrov zahtevno in zelo zamudno, smo pri umerjanju in analizi občutljivosti modela uporabili program SWAT-CUP4 in optimizacijski algoritem SUFI2 (Abbaspour, 2011; Glavan in Pintar, 2012; Kovačec, 2012;). Mera negotovosti modela je v programu opredeljena kot vrednost P , ki predstavlja odstotek merjenih podatkov, ki so zajeti v 95 % napovedi negotovosti (95PPU). Mera za oceno negotovosti je tudi vrednost R , ki predstavlja povprečno širino pasu 95PPU, razdeljenega s standardnim odklonom merjenih podatkov (Abbaspour, 2011). Teoretično se P vrednosti gibljejo med 0 in 100 %, R vrednosti pa med 0 in neskončno. P vrednost 100 % in R vrednost 0 pomeni, da simulirani podatki sovpadajo z merjenimi podatki. Dodatno smo učinkovitost modelov ugotavljali še s koeficientom determinacije (R^2) in koeficientom Nash-Sutcliffe.

3. Opis obravnavanega območja in podatki

Porečje vodotoka Glinščice leži v osrednjem delu Slovenije in obsega Šentvid, Dravlje, Šiško, Rožnik in Rožno dolino. Glavni pritok Glinščice je Pržanec (slika 2), čigar povirje sega v pobočje Velike trate in Male trate in odvaja vodo s pretežno ravninskega dela vzhodno od Glinščice. Glinščica je levi pritok Gradaščice, ki izvira pod severovzhodnimi obronki Toškega čela in pri Podutiku preide v ravninski del Ljubljanske kotline (Kovačec, 2012).

Relief porečja je raznolik, gričevnat na vzhodu in ravninski na jugu. Porečje Glinščice na severu sega v pobočje Toškega čela in Črnega vrha, razvodnica na vzhodu pa poteka skozi urbano območje Ljubljane (Dravlje, Šiška), preko Šišenskega hriba in Rožnika do izliva v Gradaščico. Padavinsko prispevno območje obsega 17,4 km² (Rusjan, 2003). Skupno prispevno območje Glinščice je zaradi odvodnjavanja v urbanem delu porečja nekoliko večje in zajema 19,3 km² površine (Rusjan et al., 2003). Obravnavano prispevno območje je bilo generirano z digitalnim modelom višin ločljivosti 5 m in avtomatsko določitvijo razvodnice v programu MapWindow.

Večji del površine zgornjega dela porečja je prekrit z gozdom. Zaradi majhne površine in strmega terena se odtok iz zgornjega dela porečja zbere v dokaj kratkem času in v več manjših pritokih, ki napajajo Glinščico in Pržanec. Po podatkih o kategorizaciji vodotokov, ki so dostopni na spletnem naravovarstvenem atlasu na spletni strani Agencije RS za okolje (ARSO, 2014), je zgornji del Glinščice in Pržanca razvrščen kot naravni do sonaravno urejen vodotok.

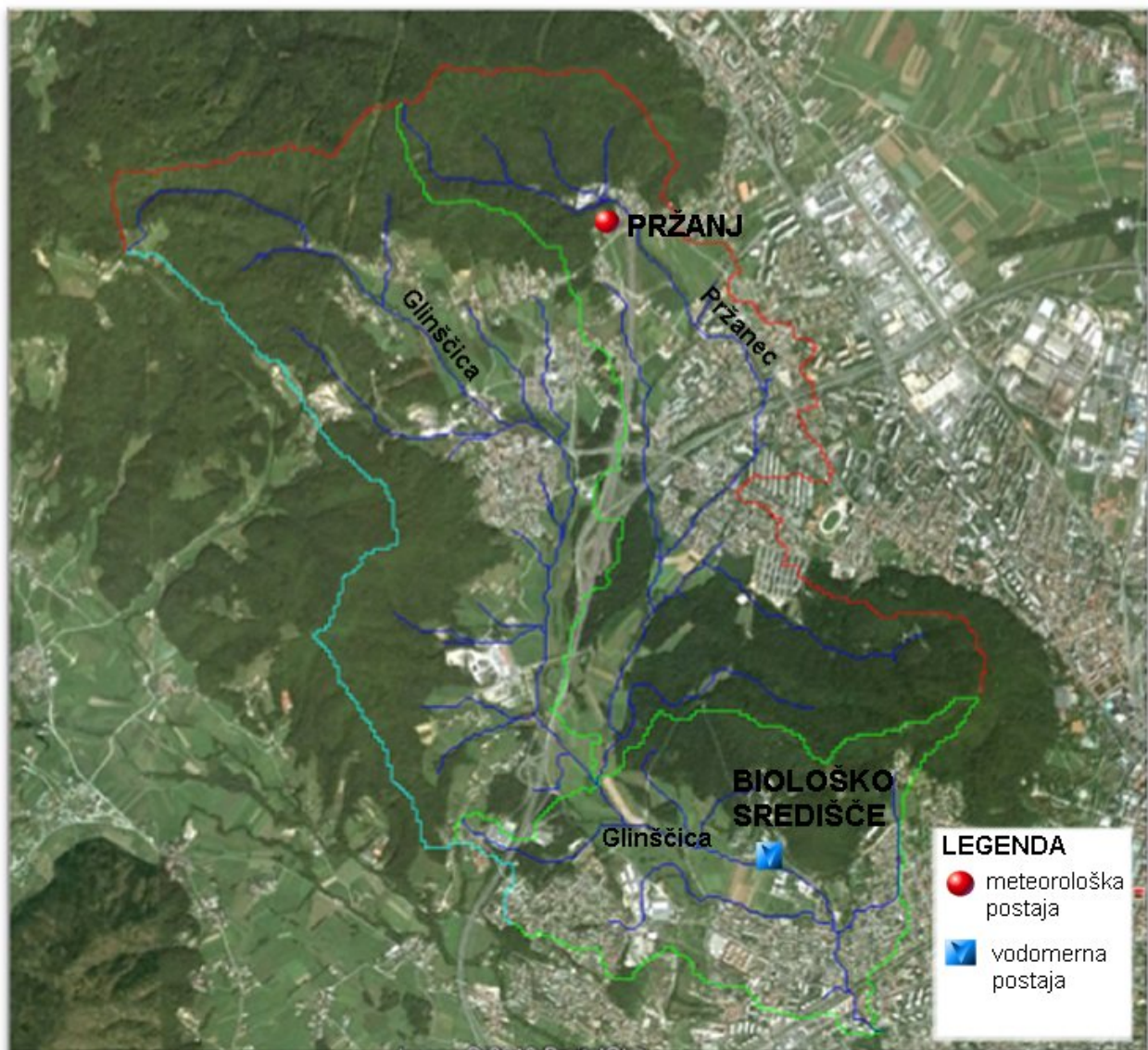
Za razliko od zgornjega dela porečja je osrednji del porečja (Glinca, Dolince, Kamna Gorica, Pržan, Podgora, Dravlje, Koseze in Podutik) v večji meri

urbaniziran (Kovačec, 2012). Ostalo območje, ki ni urbanizirano, je v večini namenjeno kmetijski rabi, in sicer pašnikom, travnikom za košnjo in sadovnjakom. Kmetijske površine so hkrati tudi razlivna površina v primeru visokih vod. Na zahodnem robu se porečje zaključuje z gozdom.

Na območju, kjer se Pržanec priključi Glinščici, je vodotok urejen togo. Korito Pržanca je naravno, podlaga je sestavljena iz preperlega površinskega sloja in glinovcev. Glinščica pot nadaljuje mimo Biološkega središča (slika 2) do izliva v Gradaščico. Dno struge je v tem delu tlakovano.

Porečje Glinščice spada v zmerno celinsko podnebje osrednje Slovenije. Srednja letna temperatura v Ljubljani je 10,3 °C in povprečna letna količina padavin 1374 mm (1961-2008) (ARSO, 2009).

Porečje Glinščice je po šifrantu padavinskih območij RS območje petega reda s šifro 14912 (Šraj, 2001). Sestavljajo ga tri podporečja, in sicer prispevno območje glavnega toka od izvira do sotočja s Pržancem, prispevno območje Pržanca in prispevno območje od sotočja Glinščice in Pržanca do izliva v Mestno Gradaščico (slika 2).



Slika 2: Porečje Glinščice (vir podlage: ARSO, 2007) (Pestotnik et al., 2012).

Figure 2: Glinščica watershed (background source: ARSO, 2007) (Pestotnik et al., 2012).

Za izdelavo hidrološkega modela s programom MWSWAT smo uporabili digitalni model višin (DMV) ločljivosti 5 m, podatke o rabi in talnih tipih obravnavanega območja (CLC, 2000), podatke o dnevni in 30-minutni količini padavin s padavinskih postaj Ljubljana-Bežigrad (ARSO, 2009) in Pržanec (KSH, 2004), podatke o merjenih pretokih z vodomerne postaje Biološko središče (KSH, 2004) ter podatke o temperaturi, sončnem sevanju in relativni vlažnosti s klimatološke postaje Ljubljana-Bežigrad (ARSO, 2009).

Preglednica 2: *Uvrstitev posameznih PKE v FAO klasifikacijo (Prus, 2012).*

Table 2: *Comparison of pedocartographic units (PKE) and the FAO classification (Prus, 2012).*

PKE – pedokartografska enota	Tekstura	Koda talnega tipa (FAO)
672, 1293, 1297	Silt loam	SIL
526	Silty clay	SIC
991, 993	Sand	S
1103, 1384	Silt	SI
1108, 1113, 1226, 1227	Silty clay loam	SICL
1120	Sandy loam	SL
1230	Sandy loam	CL
1292	Sandy loam	C

Izdelava modela zahteva tudi natančne pedološke podatke. Digitalno pedološko karto (1:25 000) smo pridobili na spletnih straneh Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (2011). Karta je sestavljena iz pedokartografskih enot (PKE), ki so osnovna kartografska enota pedološke karte (ICPVO, 2011). PKE je sestavljena iz ene ali več pedosistematskih enot (PSE), ki v naravi značilno nastopajo skupaj in jih zaradi merila karte ni mogoče prikazati ločeno. PSE je enota tal v določenem sistemu klasifikacije z značilnimi lastnostmi, ki se bistveno razlikujejo od drugih tal (Prus, 2012). PKE tako sestavljajo do tri PSE, njihova zastopanost v skupni površini pa je opredeljena v odstotkih. Na obravnavanem

območju je bilo upoštevanih 15 PKE, ki smo jih glede na lastnosti razvrstili v 8 talnih tipov po FAO klasifikaciji (preglednica 2).

V pedološki študiji (Stepančič et al. 1982), ki je bila narejena za območje med potokom Glinščica in južnim odvodnim kanalom, so ugotovili, da matično podlago območja tvorijo aluvialne naplavine Glinščice, ki prekrivajo starejšo pleistocensko usedlino. V plasteh 50 do 100 cm pod površjem se pojavljajo plasti peska in prod, zgornji površinski del pa sestavlja meljasto glinasto ilovnat material. Tla spadajo v razred hidromorfoloških tal, in sicer v skupino karbonatnih glejev. Prevladujoča PSE so karbonatna, zmerno oglejena tla z izraženim površinskim oglejevanjem. Teksturni sestav vpliva na slabo strukturiranost in slabo prepustnost tal. Po mehانيčni sestavi tla spadajo v meljasto ilovico, v globljih horizontih tudi glinasto ilovico. Delež melja je v teh tleh v večini primerov precej visok, glina pa je zastopana v zmerni količini. Površinska voda, ki se ob večjih padavinah ne odcedi pravočasno, se zato dalj časa zadržuje v površinskem delu tal (Stepančič et al., 1982).

4. Rezultati in razprava

4.1 Umerjanje modela in analiza občutljivosti

Model smo izdelali in umerili za obdobje treh mesecev, od 1. novembra 2003 do 31. januarja 2004. V obravnavanem obdobju je padlo 330,1 mm padavin, v štirih večjih in sedmih manjših padavinskih dogodkih (padavinska postaja Pržanec). Največ padavin je padlo 26. novembra 2003, in sicer 57,7 mm in 17. januarja, 46,6 mm (slika 3). Vse opravljene simulacije smo primerjali s povprečnim dnevnim pretokom, merjenim na odseku Glinščice pri Biološkem središču. Razlog za manjkajoče podatke o pretokih od 1. do 4. novembra 2003 in od 14. do 17. decembra, je nedelovanje instrumenta.

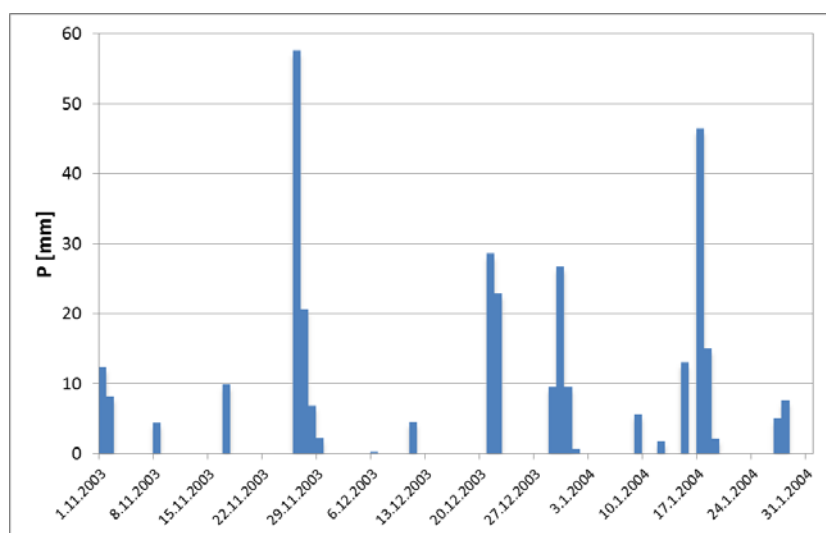
Umerjanje smo izvedli s programom SWAT-CUP4. V vsakem poganjanju je bilo narejenih od štiri do šest iteracij, znotraj katerih program izvede 500 do 1000 simulacij. Rezultat iteracije je povprečni dnevni pretok z najboljšim ujemanjem z

merjenim pretokom. Potrebno je poudariti, da najboljša rešitev ni najboljša simulacija, temveč končni razpon vrednosti parametrov. Ujemanje merjenega in simuliranega pretoka smo ugotavljali s P in R vrednostima ter dodatno še s koeficientom determinacije (R^2) in koeficientom Nash-Sutcliffe (NS).

Naredili smo tri različice modela z uporabo različnih metod propagacije vala po strugi, in sicer prvi dve (model 1 in model 2) z uporabo metode spremenljivega koeficienta skladiščenja in tretjo (model 3) z uporabo Muskingumove metode.

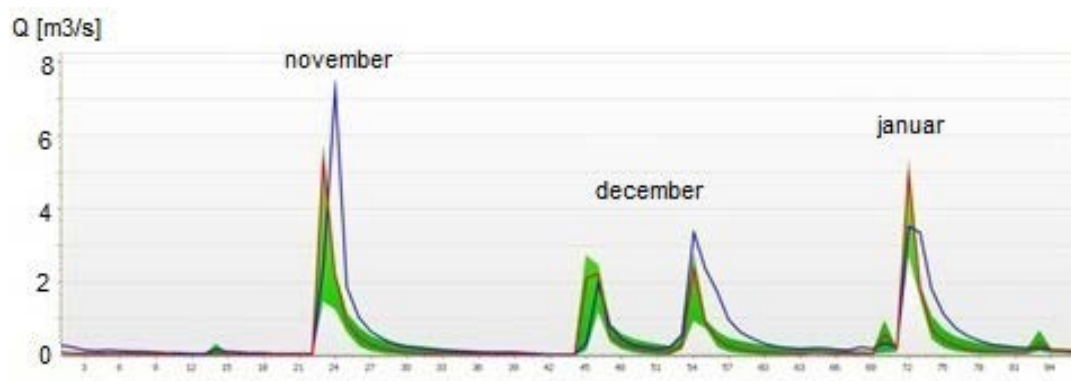
Model 1

Pri modelu 1 smo za propagacijo valov po strugi uporabili metodo spremenljivega koeficienta skladiščenja in pri umerjanju upoštevali vseh 15 parametrov (preglednica 1). Na sliki 4 je prikazan rezultat tretje iteracije. Vidimo, da je konica pretoka prvega vala (november) nekoliko podcenjena in se zgodi prekmalu, tudi konica tretjega vala (december) je podcenjena. Drugi val (december) je dobro simuliran, medtem ko je zadnji val (januar) nekoliko precenjen, a časovno ustrezen. Padajoči deli so pri vseh valovih podcenjeni, kar vpliva tudi na podcenjevanje baznega odtoka (slika 4).



Slika 3: Padavine v obdobju umerjanja modela (1. 11. 2003 – 31. 1. 2004).

Figure 3: Rainfall during the model calibration period (1. 11. 2003 – 31. 1. 2004).



Slika 4: Rezultat simulacije modela 1 (tretja iteracija), kjer je simuliran pretok označen z rdečo krivuljo, merjen z modro, zeleni pas pa predstavlja končno širino 95PPU (Kovačec, 2012).

Figure 4: Results of the Model 1 simulation (3rd iteration); the red line represents simulated discharge, the blue line is the measured discharge and the green strip is the final width of 95PPU (Kovačec, 2012).

Rezultati v preglednici 3 kažejo, da je odstotek merjenih podatkov, ki so zajeti v 95 % napovedi negotovosti (95PPU) največji po prvi iteraciji (57 %), a pri tem je potrebno upoštevati dejstvo, da se pas 95PPU z vsako iteracijo zoži (manjša vrednost R). Kazalnika učinkovitosti modela R^2 in koeficient Nash-Sutcliffe kažeta na največjo učinkovitost modela v drugi iteraciji.

Pri vseh iteracijah se je izkazalo, da so najbolj občutljivi parametri CN2, SOL_AWC in CH_K2. Odtok s porečja je torej najbolj odvisen od začetne vrednosti koeficienta odtoka SCS CN (parameter CN2), od zadrževanja vode v tleh (parameter SOL_ACW) in efektivne hidravlične prevodnosti struge (parameter CH_K2).

Preglednica 3: Kazalniki učinkovitosti modela 1 (Kovačec, 2012).

Table 3: Model 1 efficiency indicators (Kovačec, 2012).

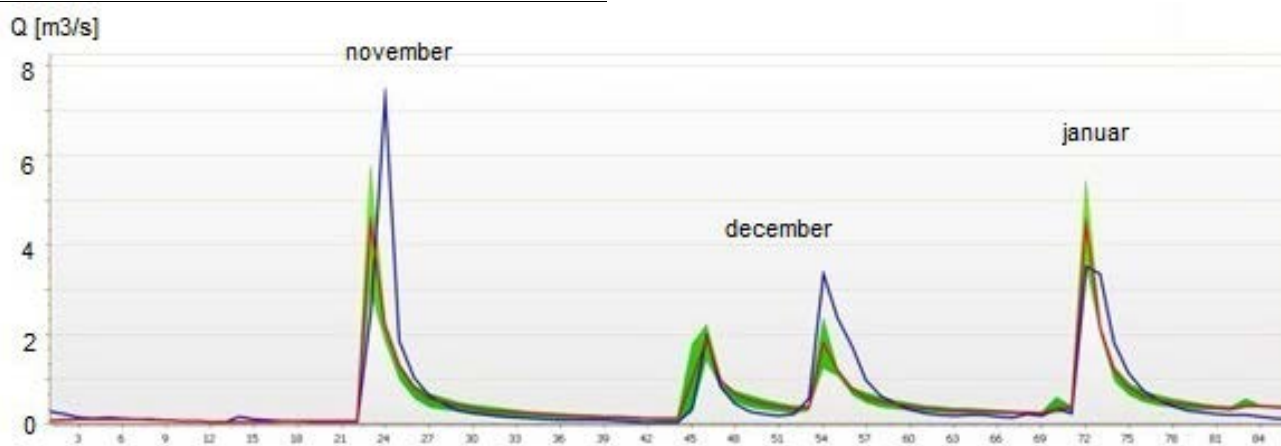
Kazalnik	Iteracija		
	1	2	3
P	0,57	0,52	0,40
R	0,42	0,43	0,32
R^2	0,48	0,53	0,50
NS	0,42	0,49	0,45

Ker je porečje Glinščice majhno, sta parametra zakasnitve površinskega odtoka in podzemne vode (SURLAG in GW_DELAY), ki se izražata v dnevih, relativno občutljiva. Ker je razpon vrednosti obeh parametrov zelo velik (GW_DELAY od 0 do 500 dni), v naslednjih simulacijah (model 2) omenjenih parametrov nismo umerjali z ostalimi, ampak smo pustili privzete vrednosti.

Model 2

Model 2 je enak modelu 1, le da smo pri tej različici umerjali le 12 parametrov v štirih iteracijah. Poleg že omenjenih dveh parametrov (SURLAG in GW_DELAY) nismo umerjali tudi parametra SFTMP, ki določa, pri kateri temperaturi dež preide v sneg, saj v obravnavanem obdobju snega ni bilo.

Podobno kot pri modelu 1 je problematičen prvi val (november), ki je podcenjen, konica pretoka pa nastopi nekoliko prekmalu, ujemanje drugega vala (december) je dobro, konica tretjega vala (december) je zopet nekoliko podcenjena, medtem ko je četrti val (januar) nekoliko precenjen (slika 5). Bistveno izboljšanje se pokaže pri simulaciji padajočega dela valov in baznega odtoka, ki je pri tej različici modela simuliran precej bolje kot pri modelu 1 (sliki 4 in 5).



Slika 5: Rezultat simulacije modela 2 (četrt. iteracija), kjer je simuliran pretok označen z rdečo krivuljo, merjen z modro, zelen pas pa predstavlja končno širino 95PPU (Kovačec, 2012).

Figure 5: Results of the Model 2 simulation (4th iteration); the red line represents simulated discharge, the blue line is the measured discharge and the green strip is the final width of 95PPU (Kovačec, 2012).

Vrednost P četrte iteracije znaša 0,44, kar pomeni, da 44 % merjenih podatkov pade v območje 95PPU in je glede na nizko vrednost R, ki znaša le 0,22, dober rezultat (preglednica 4).

Tudi v tem primeru so najbolj občutljivi parametri CN2, SOL_AWC in CH_K2, ki predstavljajo začetno vrednosti koeficienta odtoka SCS CN, zadrževanja vode v tleh in efektivno hidravlično prevodnost struge. Za precej občutljivega pa se je izkazal tudi parameter ALPHA_BF, ki vpliva na gibanje baznega odtoka, a je bila njegova vrednost pri modelu 1 pod prevelikim vplivom umerjenih vrednosti parametrov SURLAG in GW_DELAY, ki ju v modelu 2 nismo umerjali.

Preglednica 4: Kazalniki učinkovitosti modelov 2 in 3 (Kovačec, 2012).

Table 4: Model 2 and model3 efficiency indicators (Kovačec, 2012).

Kazalnik	Model (iteracija)	
	Model 2 (4)	Model 3 (6)
P	0,44	0,30
R	0,22	0,26
R ²	0,58	0,81
NS	0,58	0,79

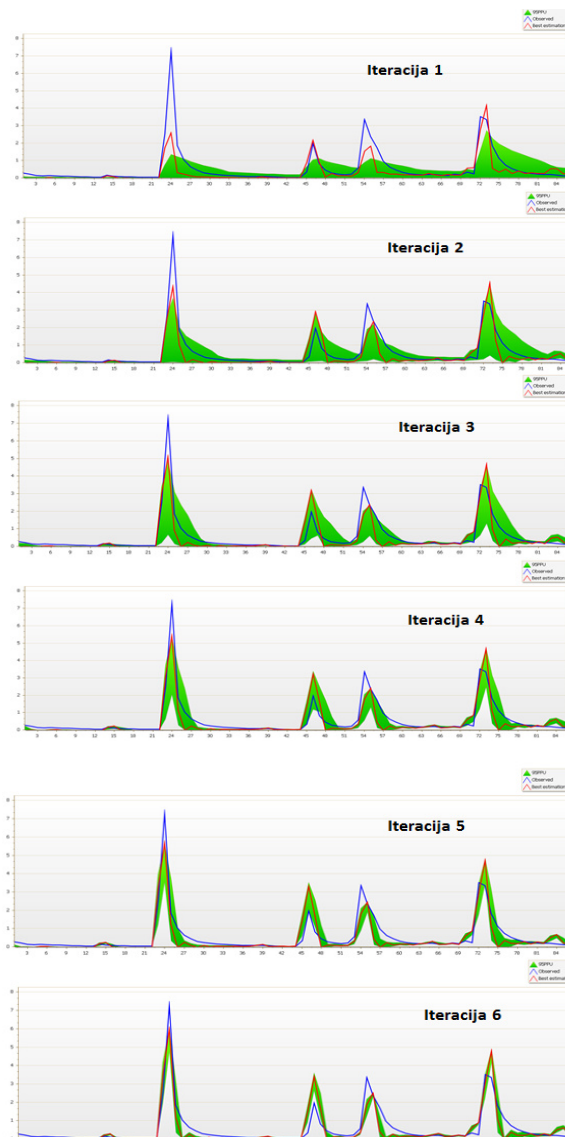
Model 3

Pri modelu 3 smo umerjali istih 12 parametrov kot pri modelu 2, za propagacijo valov po strugi pa smo za razliko od prejšnjih dveh modelov uporabili Muskingumovo metodo. Pri umerjanju smo naredili šest iteracij.

Iz slike 6 je razvidno, da je časovno ujemanje konic ustrezno, najboljše ujemanje konic pa dobimo po šesti iteraciji.

Vrh prvega vala je v primerjavi z modelom 2 časovno ustrežnejši in tudi manj podcenjen. Drugi in četrti val sta nekoliko precenjena, tretji val pa je nekoliko podcenjen. Padajoči deli valov in bazni odtok so v primerjavi z modelom 2 simulirani slabše. Bazni odtok je večino časa podcenjen.

Vrednost P šeste iteracije modela 3 znaša 0,30, a je pri nizki vrednosti R, ki znaša 0,26 (ozko območje 95PPU) to kljub vsemu zadovoljiv rezultat (slika 6). Kazalniki učinkovitosti modela v splošnem kažejo na dobro ujemanje (šesta iteracija), saj znaša koeficient Nash-Sutcliffe 0,79, koeficient determinacije pa 0,81 (preglednica 4).



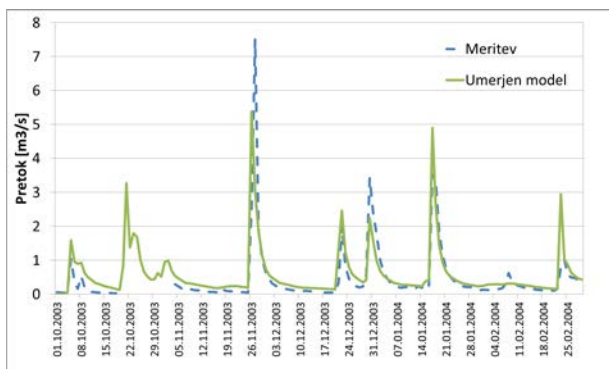
Slika 6: Rezultat simulacije modela 3 (vseh šest iteracij), kjer je simuliran pretok označen z rdečo krivuljo, merjen z modro, zelen pas pa predstavlja končno širino 95PPU (Kovačec, 2012).

Figure 6: Results of the Model 3 simulation (all 6 iterations); the red line represents simulated discharge, the blue line is the measured discharge and the green strip is the final width of 95PPU (Kovačec, 2012).

Za najbolj občutljiv parameter se je izkazal Manningov koeficient hrapavosti glavne struge CH_N2, kar je razumljivo, saj je pretok izračunan z Manningovo enačbo, ki je zelo odvisna prav od Manningovega koeficienta hrapavosti.

4.2 Preverjanje modela

Preverjanje modela (ang. *validation*) je pomemben proces pri izdelavi hidrološkega modela, saj na ta način model preverimo in ovrednotimo njegovo uporabno vrednost. Preverjanje smo izvedli za oktober 2003 in februar 2004, torej za en mesec pred obdobjem umerjanja in en mesec po obdobju umerjanja. Izbran je bil model 2, kot najboljši izmed treh različic umerjanja.



Slika 7: Primerjava merjenega dnevnega pretoka in simuliranega pretoka v obdobju umerjanja in preverjanja.

Figure 7: Comparison of measured and simulated discharges in the calibration and verification period..

Rezultati preverjanja so pričakovano slabši od rezultatov umerjanja (slika 7), razlogov za to pa je več. Obdobje umerjanja je bilo 3 mesece, kar ni dovolj, da bi bili vsi fizikalni procesi v celoti upoštevani v končnih vrednostih parametrov. Poleg tega je bil model umerjen na tri razmeroma mokre zimske mesece in posledično relativno visoke pretoke, kar se odraža v precenjenosti pretoka v obdobju preverjanja. Temperature v obdobju preverjanja so bile v primerjavi z meseci umerjanja relativno visoke, saj temperatura nikoli ni padla pod 0 °C, kar pa se je pogosto dogajalo v mesecih umerjanja. To bi lahko pomenilo, da upoštevanje parametrov taljenja snega SMFMX.bsn,

SMFMN.bsn in SFTMP.bsn v obdobju preverjanja ni pripomoglo k izboljšanju rezultata.

Vsekakor bi bili rezultati boljši, če bi model umerili v daljšem časovnem obdobju. Na ta način bi upoštevali več naravnih dejavnikov, razlike v letnih časih, pojav ekstremnih padavinskih dogodkov ipd. in s tem naravne procese na obravnavanem porečju bolj celostno zajeli v parametrih. Običajno privzeta obdobja umerjanja z modelom SWAT trajajo več let, saj je priporočljivo t.i. »warm-up« obdobje (Neitsch et al., 2011; Faramarzi et al., 2008; Schuol et al., 2008). SWAT je časovno kontinuirni model, narejen za simulacijo daljših obdobj in manj za simulacijo posameznih dogodkov (Neitsch et al., 2011). Tudi velikost porečja Glinščice in raba tal na območju precej odstopata od velikosti praviloma kmetijskih porečij, ki jim je SWAT v osnovi namenjen (Neitsch et al., 2011). Ker pa je bil glavni cilj raziskave predvsem preverjanje uporabnosti programa SWAT in njegovih s hidrologijo povezanih komponent za hidrološko modeliranje, je kljub temu naš namen dosežen.

5. Zaključki

Rezultati raziskave so pokazali, da lahko na podlagi javno dostopnih podatkov o reliefu (digitalni model višin Geodetska uprava Republike Slovenije), podatkov o vremenu (Agencija republike Slovenije za okolje) in programske opreme odprtega vira (www.swatmodel.tamu.edu, www.waterbase.org, www.mapwindow.org, www.neprashtechonology.ca), dobimo zadovoljive rezultate padavinskega odtoka.

Uporaba programa SWAT je precej zahtevna in kompleksna, prav tako tudi njegovo umerjanje, saj model temelji na relativno velikem številu parametrov. Ključnega pomena so izkušnje modelarja, poznavanje prispevnega območja in povezava parametrov modela SWAT s fizikalnimi procesi v naravi. Predvsem je v modelu velik poudarek na poznavanju lastnosti tal in z njimi povezanimi parametri.

Zaključimo lahko, da je model SWAT za potrebe hidrološkega modeliranja oz. izračuna površinskega odtoka primeren predvsem v

primerih, ko nas poleg samega padavinskega odtoka zanimajo tudi drugi procesi, povezani z odtokom, kot na primer transport sedimentov (Ojstršek Zorčič in Glavan, 2015), vnos hranil s kmetijskih površin ali na splošno ocena različnih naravnih in človeških vplivov na vodo. Za samo modeliranje površinskega odtoka je SWAT v primerjavi z drugimi hidrološkimi modeli (npr. HEC-HMS, WMS, PC FLOW-2D) (Dirnberk in Šraj, 2010; Pestotnik, 2011; Škrbec, 2005) preveč kompleksen in zahteva veliko podatkov, po drugi strani pa rezultati simulacij površinskega odtoka niso nič boljši.

Viri

- Abbaspour, K. C. (2011). SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Eawag: 103 str.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome: 246 str.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams J. R., Haney, E. B., Neitsch, S. L. (2011). Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation, Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 365. Texas, A&M University System College Station: 643 str.
- ARSO (2009). Arhiv agencije Republike Slovenije za okolje. Ljubljana, Urad za meteorologijo.
- ARSO (2014). Atlas okolja. http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=AtlasOkolja_AXL@Arso (Pridobljeno 18. 9. 2014.)
- Borah, D. K., Arnold, J. G., Bera, M., Krug, E.C., Liang, X. (2007). Storm event and continuous hydrologic modeling for comprehensive and efficient watershed simulations. *Transactions of the ASAE* 42(4), 919–925.
- Brilly, M., Rusjan, S., Vidmar, A. (2006). Monitoring the impact of urbanisation on the Glinščica stream, *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(17), 1089–1096.
- Brilly, M., Šraj, M. (2005). Osnove hidrologije. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 309 p.
- Brilly, M., Šraj, M. (2006). Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.
- Chow, V. T., Maidment D. R., Mays, W. L. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 572 p.
- Corine Land Cover (CLC) (2000). <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/> (Pridobljeno 18. 11. 2011.)
- Dirnberk, L., Šraj, M. (2010). Hidrološko modeliranje: Vpliv histograma padavin na hidrogram površinskega odtoka, *Gradbeni vestnik*, 59(3), 48–56 (in Slovenian).
- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R., Yang. H. (2008). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological processes* 23, 486–501.
- Glavan, M., Pintar, M. (2012). Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats of Catchment Modelling with Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model. Water Resources Management and Modeling, Chapter 2, InTech, 39–64.
- ICPVO (2011). Atributni podatki pedokartografskih enot. Message to: Kovačec, M. 13. 12. 2011. Osebna komunikacija.
- KSH (2004). Arhiv merjenih hidroloških in meteoroloških podatkov Katedre za splošno hidrotehniko UL FGG. Ljubljana.
- Kovačec, M. (2012). Hidrološki model Glinščice z modelom SWAT (Hydrologic model of Glinščica watershed with SWAT program). Unpublished Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 104 p. (in Slovenian).
- Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. 2011. Pedološka karta. <http://rkg.gov.si/GERK/> (Pridobljeno 15. 11. 2011.)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2011). Soil and water assesment tool theoretical documentation (version 2009). Texas, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas A&M University Sistem, College Station, 618 p.
- Ojstršek Zorčič, P., Glavan, M. (2015). Dotok suspendiranih snovi v akumulacijo Ledavsko jezero. 26. Mišičev vodarski dan, Maribor, 144–150.
- Pestotnik, S. (2011). Hidrološki model Glinščice s programom Flo-2D (Hydrologic model of Glinščica watershed with program Flo-2D). Unpublished Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 80 p. (in Slovenian).
- Pestotnik, S., Hojnik, T., Šraj, M. (2012). Analiza možnosti uporabe distribuiranega dvodimenzijskega modela Flo-2D za hidrološko modeliranje = Analysis of

the possibility of using the distributed two-dimensional model Flo-2D for hydrological modeling, *Acta hydrotechnica* **25(43)**, 85–103 (in Slovenian).

Prus, T. (2012). Pedološke značilnosti prispevnega območja Glinščice. Osebna komunikacija (15. 1. 2012.).

Rallison, R. E., Miller, N. (1981). »Past, present and future SCS runoff procedure« in Singh, V. P. (Eds), Rainfall runoff relationship. *Water resources publication*, Littleton, CO8: 353–364.

Rusjan, S. (2003). Sonaravno urejanje vodotokov - primer ureditve odseka Glinščice na območju Viča, Ljubljana. Unpublished Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 83 p. (in Slovenian).

Rusjan S, Fazarinc R, Mikoš M (2003). River rehabilitation of urban watercourses on the example of the Glinščica river in Ljubljana. *Acta hydrotechnica* **21(34)**, 1–22.

Schuol, J., Abbaspour, K. C., Srinivasan, Yang, H. (2008). Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology* **352**, 30–49.

Stepančič, D., Lobnik, F., Prus, T. (1982). Pedološke raziskave melioracijskega objekta Laboratorijsko polje (Pedological research of the Laboratorijsko polje structure). Univerza v Ljubljani, BF, Ljubljana, 8 p. (in Slovenian).

Škrbec, G. (2005). Hidrološki model Glinščice z Gradaščico (Hydrological model of Gradaščica and Glinščica rivers). Unpublished Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 99 p. (in Slovenian).

Šraj, M. (2001). Šifrant padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije = Watershed coding system of the Republic of Slovenia, *Acta hydrotechnica*, **19(30)**, 3–24.

Šraj, M., Dirnbek, L., Brilly, M. (2010). The influence of effective rainfall on modeled runoff hydrograph, *Journal of Hydrology and Hydromechanics* **58(1)**, 3–14.

Štajdohar, M. (2005). Analiza vpliva urbanizacije na režim odtoka Glinščice (An analysis of urbanisation on runoff regime of the Glinščica River). Unpublished Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 92 p. (in Slovenian).

USACE. (2000). Hydrologic modeling system HEC-HMS, Technical reference manual. US Army Corps of Engineers, Davis, CA, 138 p.

Williams, J.R. (1969). Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of ASAE*, **12(1)**: 100–103.