

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

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 modelling. Acta hydrotechnica 25, 43: 85 – 103.

<ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a43sp.pdf>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 05-20-2014

UDK/UDC: 004.414.23:556.12:556.166/.167

Prejeto/Received: 26. 6. 2012

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 17. 6. 2013

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

Simona Pestotnik¹, Tomaž Hojnik², Mojca Šraj^{1,*}

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

²DHD d.o.o, Praprotnikova 37, 2000 Maribor

Izvleček

V članku je predstavljen hidrološki model Glinščice, izdelan s programom Flo-2D. Cilj raziskave je bila analiza uporabe dvodimenzijskega matematičnega modela Flo-2D za hidrološko modeliranje v primerjavi z enodimenzijskim modelom HEC-HMS. Flo-2D je komercialen, fizikalno zasnovan model z distribuiranimi parametri. Osnovni namen programa je račun rečne hidravlike. Odtok s porečja računa ob upoštevanju topografije oz. digitalnega modela višin (DMV), količine in jakosti padavin ter rabe in vrste tal. Na drugi strani pa je HEC-HMS prosto dosegljiv program, s katerim na podlagi podatkov o padavinah, maksimalnih pretokih in nekaterih lastnostih porečja, enostavno izdelamo dovolj natančen model površinskega odtoka. V obeh modelih so bile padavinske izgube izračunane po isti metodi, SCS CN (angl. *Soil Conservation Service Curve Number method*). Model Flo-2D je bil umerjen s spreminjanjem velikosti računske celice, koeficientov hrapavosti in različnih nastavitev koeficienta CN za izračun izgub. Podana je tudi primerjava hidrogramov odtoka za 10- in 100-letne nevihte s trajanjem 2, 12 in 24 ur. Izračunani volumni odtoka se dobro ujemajo z merjenimi, vendar daje model HEC-HMS ustrežnejšo obliko hidrograma odtoka. V programu Flo-2D je najbolj problematična ocena Manningovih koeficientov hrapavosti ter izbor velikosti računskih celic, v programu HEC-HMS pa ocena časa koncentracije. Sama izdelava tovrstnih modelov zahteva številne prostorsko razporejene podatke. Umerjanje modela z distribuiranimi parametri se je izkazalo za zelo zahtevno in dolgotrajno. Izkazalo se je, da je model Flo-2D v hidrološki praksi uporaben le za izkušene modelarje ter v primerih, kjer so na razpolago kvalitetni in natančni vhodni podatki.

Ključne besede: modeliranje površinskega odtoka, dvodimenzijski matematični model Flo-2D, porečje Glinščice, padavine.

Abstract

The paper presents a hydrological model of the Glinščica watershed with the program Flo-2D. The aim of the research was to analyze the applicability of the two-dimensional mathematical model Flo-2D for hydrological modeling and to compare the results with the one-dimensional HEC-HMS model. Flo-2D is a commercial, physically based model with distributed parameters. Its main purpose is modeling river

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

© Pestotnik S. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Pestotnik S. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence](#).

hydraulics. It continuously computes the rainfall runoff from the watershed according to the topography or a digital elevation model (DEM), the quantity and intensity of precipitation, the land use and soil type. On the other hand, HEC-HMS is freely available software that enables to create a simple and sufficiently detailed hydrologic model on the basis of precipitation, discharge and some watershed characteristics. In both cases precipitation losses were computed with SCS (Soil Conservation Service) Curve Number loss method. Flo-2D model was calibrated by varying input and modeling parameters including grid size, roughness coefficients and SCS Curve Numbers. The results of 10-year and 100-year events and 2, 12 and 24-hour storms are also compared. The results of runoff volumes are comparable, but the shape of runoff hydrograph computed with HEC-HMS model is much better. In the Flo-2D model assessing the Manning roughness coefficient and selecting the size of the grid cells are the most problematic, whereas in the HEC-HMS model it is the assessment of the time of concentration. Calibration of the model with distributed parameters is difficult and time-consuming. The results have shown that the Flo-2D model can be used in hydrological practice only in cases where good input data are available for the model and its calibration.

Keywords: rainfall-runoff modeling, two-dimensional mathematical model Flo-2D, Glinscica watershed, rainfall.

1. Uvod

Za namene določanja nevarnosti in ogroženosti zaradi naravnega pojava poplav, vpliva novih umestitev v prostor ter pridobivanja znanj o naravnih zakonitostih, vedno večji pomen dobivajo računalniška orodja za modeliranje, ki so že skoraj v celoti nadomestila dražje fizične modele.

Glede na način, kako zajemamo prostor, v katerem simuliramo pojav poplavnega vala, v osnovi ločimo eno-, dvo- in tro-dimenzijske modele. Prevladujejo enodimenzijski, v zadnjem času pa še poseben razmah doživljajo dvo- in tro-dimenzijski modeli, kar lahko v prvi vrsti pripišemo izredno hitremu razvoju vedno zmogljivejših računalnikov. Pri enodimenzijskih modelih so vrednosti v pravokotnem koordinatnem sistemu povprečene v dveh smereh in tako dobimo vrednosti v določenih prerezih območja. Odsek aproksimiramo z več celicami vzdolž izbrane smeri. Povprečenje le v eni smeri (npr. vertikalni) nam da dvodimenzijske modele. Dobimo vrednosti na površini obravnavanega območja. Področje razdelimo na mrežo celic v ravnini. Poleg hidrostatične razporeditve tlakov se v isti celici predpostavlja, da so hitrosti toka konstantne po globini, torej računamo z globinsko povprečnimi vrednostmi. Pri trodimenzijskih modelih vrednosti ne povprečimo, razen če enačb ne moremo rešiti analitično in je potrebno numerično reševanje. Pri tem povprečimo vrednosti v vseh treh smereh, vendar znotraj

majhnih volumnov (v primerjavi z obravnavanim območjem). Tudi robni pogoji za trodimenzijske modele so običajno povprečene vrednosti. Poznamo tudi t.i. kvazidimenzijske modele. Če na primer z 1D modelom poskušamo z določenimi pristopi opisati dogajanje v dveh smereh, govorimo o kvazi 2D modelu (DHD, 2010).

V članku predstavljamo rezultate dvodimenzijskega matematičnega modela Flo-2D in jih primerjamo z rezultati enodimenzijskega modela HEC-HMS za območje porečja ljubljanske Glinščice. To območje je bilo že predmet večih hidroloških raziskav (Brilly et al., 2006; Dirnberk in Šraj, 2010; Rusjan, 2003; Škrbec, 2005; Šraj et al., 2010; Štajdohar, 2005), kjer je bil enodimenzijski model HEC-HMS že uspešno uporabljen. Razvoj zmogljivejših računalnikov in večja ločljivost digitalnih modelov reliefa omogočata uporabo zahtevnejših 2D modelov za račun poplavnih valov in posledično natančnejše izračune. Pri dvodimenzijem modeliranju poplavnega vala je potrebno čim bolj natančno upoštevati hidrologijo, topografsko ločljivost modela, ustrezno razdaljo med prečnimi prerezi struge in omejeno kalibracijo parametrov modela. Seveda pa mora uporabnik najti ravnovesje med natančnostjo vhodnih podatkov in rezultatov.

V prispevku so prikazane metode računa padavinskega odtoka s programom Flo-2D, potrebni vhodni podatki in rezultati modela. V

zaključku so podana priporočila za izdelavo modela površinskega odtoka, ki so se izkazala kot najprimernejša in so dala najboljše ujemanja rezultatov meritev z rezultati modela in lahko služijo kot izhodišče za nadaljnje raziskave.

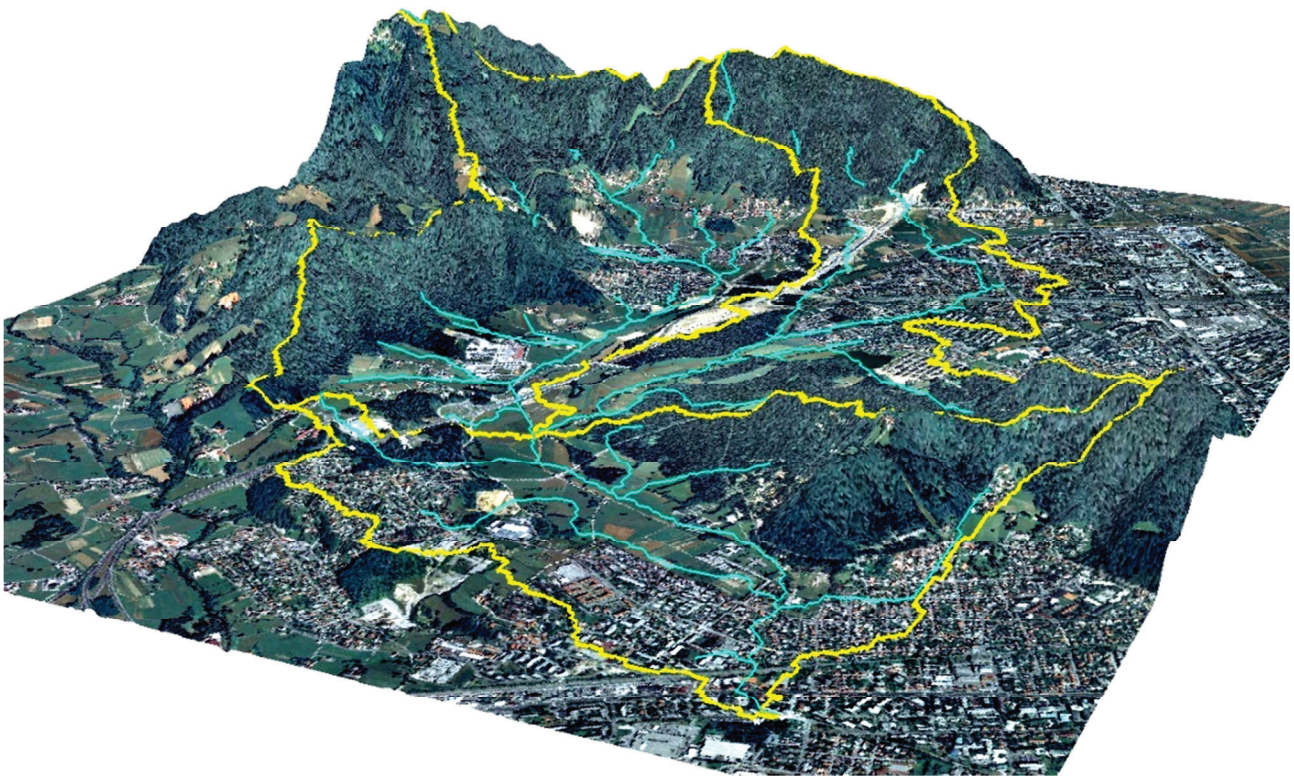
2. Opis porečja Glinščice

Porečje Glinščice leži v osrednjem delu Slovenije in obsega severo-zahodno obrobje Ljubljane. Glinščica izvira pod severovzhodnimi obronki Toškega čela in pri Podutiku preide v ravninski del Ljubljanske kotline in se po približno 10 km v ljubljanskem mestnem predelu Vič izlije v Gradaščico. Padavinsko prispevno območje obsega tako gričevje kot ravninski del Ljubljanske kotline (slika 1). Porečje je po šifrantu padavinskih območij R Slovenije padavinsko območje petega reda s šifro 14912 (Šraj, 2001a; 2001b).

Porečje Glinščice sega na severni strani v pobočje Toškega čela in Črnega vrha, razvodnica na vzhodu sega v urbano območje mesta Ljubljane (Dravljje, Šiška), preko Šišenskega hriba in

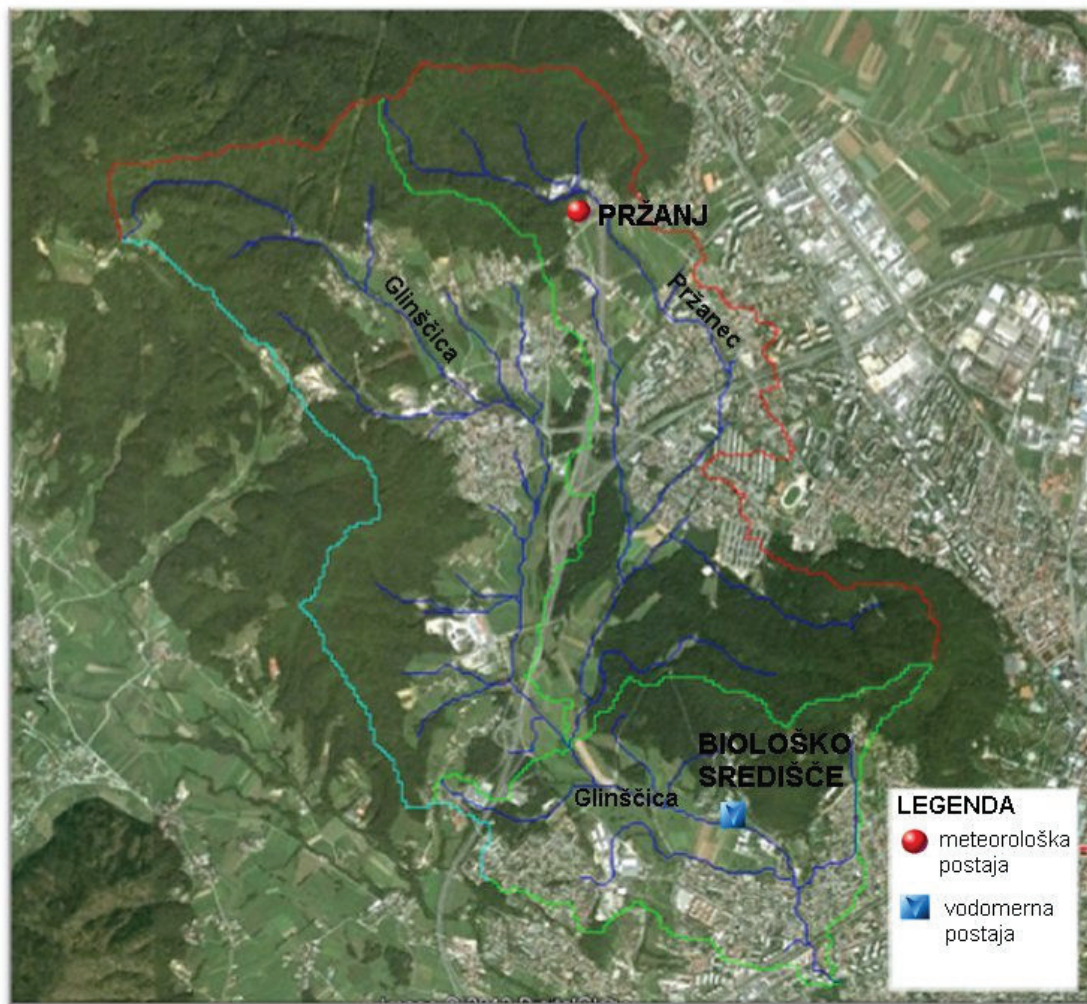
Rožnika do izliva v Gradaščico, ki predstavlja najjužnejšo točko porečja. V smeri proti zahodu poteka razvodnica skozi urbano območje, prek Brda vse do Tičnice, kjer se usmeri proti severu preko Stražnega vrha, Prevala do Toškega čela. Večji pritok Glinščice je Pržanec, čigar porečje sega v območje Velike trate in Male trate in odvaja vodo z večinoma ravninskega dela vzhodno od Glinščice (slika 2). Padavinsko prispevno območje Glinščice obsega 17,4 km². Skupno prispevno območje Glinščice je zaradi urejene površinske odvodnje na urbaniziranih površinah nekoliko večje in zajema 19,3 km² površine (Rusjan, 2003).

Zgornji del porečja je strm in gozdnat (slika 1). Odtok z zgornjega dela se zbira v več manjših pritokih, ki napajajo vodotoka Glinščico in Pržanec. Odtok s tega dela se skoncentrira v dokaj kratkem času zaradi majhne prispevne površine in strmega terena. Glede na ekomorfološko kategorizacijo vodotokov, s katero opisujemo stopnjo naravne ohranjenosti vodotokov, je zgornji del Glinščice in Pržanca klasificiran kot naravni do sonaravno urejeni vodotok (MOP, 2006).



Slika 1: Prikaz obravnavanega območja z rečno mrežo in razvodnicami (vir podlage: ARSO, 2007).

Figure 1: Study area with river network and watershed delineation (background source: ARSO, 2007).



Slika 2: Porečje Glinščice z merskimi postajami (vir podlage: ARSO, 2007).

Figure 2: Glinščica watershed and gauging stations (background source: ARSO, 2007).

Osrednji del porečja je precej urbaniziran (Glinca, Dolince, Kamna Gorica, Pržan, Podgora, Dravlje, Koseze in Podutik). Vodotoka sta v tem delu sonaravno do tehnično urejena (Rusjan, 2003). Izjema sta dva krajša odseka Glinščice (720 m) in en odsek Pržanca (280 m) med Podutikom in Kozemami, kjer je vodotok togo urejen. Med vodotokoma in izven stanovanjskih površin so predvsem kmetijska zemljišča. Rob zahodnega dela se zaključuje z gozdom.

V spodnjem delu se Pržanec priključi Glinščici in pot nadaljuje po ravninskem delu mimo Biološkega središča in Rožne doline do izliva v Gradaščico (slika 2). Ta del Glinščice je urejen togo. Dno struge od Brdnikove ceste pa do iztoka v Gradaščico je tlakovano. Globina betonskega korita je 25 cm, širina pa 103 cm. Struga je nato

razširjena v trapezno obliko, katere prečni prerez ima dimenzije do 50 cm višine in 255 cm širine. Brežine struge so pokrite z betonskimi bloki. Korito Pržanca je naravno, podlaga je sestavljena iz glinovcev in preperlega površinskega sloja (Rusjan, 2003).

V povezavi z značilnostmi reliefa, pokrovnostjo površja z vegetacijo, karakteristično sestavo tal ter deležem prepustnih in neprepustnih površin se spreminjajo tudi značilnosti površinskega odtoka.

Rezultati pedološke študije Laboratorijskega polja (Stepančič et al., 1982), ki zajema okoli 12,5 hektarjev velik kompleks zemljišč in se razprostira med potokom Glinščica in južnim odvodnim kanalom, so pokazali, da matično podlago območja tvori aluvialna naplavina Glinščice, ki prekriva

starejšo pleistocensko usedlino. V spodnjih plasteh (od 50 do 100 cm navzdol) se pojavljajo plasti peska in proda, gornji, površinski del pa sestavlja meljasto glinasto ilovnat material. Tla spadajo v razred hidromorfoloških tal in sicer v skupino karbonatnih glejev z bolj ali manj izraženim površinskim oglejevanjem. Kot osnovna in prevladujoča pedosistemska enota so predstavljena karbonatna, zmerno oglejena tla z izraženim površinskim oglejevanjem. Tla so v precejšnji meri skeletna.

Glede na teksturo spadajo tla v meljasto ilovico, v globjih horizontih tudi v meljasto glinasto ilovico. Glina je v teh tleh zastopana v zmerni količini, delež melja pa je nasprotno v večini primerov visok. Takšen teksturni sestav vpliva na slabo strukturiranost in slabo prepustnost tal. Površinska voda, ki se ob večjih padavinah ne utegne pravočasno odcediti v globino, stagnira dalj časa v površinskem delu tal (Stepančič et al., 1982).

3. Metode

3.1 Opis matematičnega modela Flo-2D

Računalniški program Flo-2D je bil razvit leta 1989 v ZDA in je delo avtorja O'Brien, ki se je teoretično in eksperimentalno ukvarjal predvsem z blatnimi in drobirskimi tokovi ter problemi plavin v vodotokih. Flo-2D je nadgradnja in razširitev programa MUDFLOW, ki je bil narejen leta 1988 izključno za račun razširjanja blatnih in drobirskih tokov. Kasneje so na pobudo Zvezne uprave za nezgode - FEMA (angl. *Federal Emergency Management Agency*) razvili program, ki vključuje komponente tako za simulacijo poplavnega vala kot tudi za simulacijo blatnih tokov. V ZDA je program uradno verificiran in priznan s strani FEMA. V Evropi ga široko uporabljajo v Avstriji, Švici in Italiji, uveljavlja pa se tudi v Sloveniji (Četina in Krzyk, 2003; Hojnik, 2009; Sodnik in Mikoš, 2010).

Flo-2D je kvazi-dvodimenzijski model, namenjen izračunu gibanja vode in masnih tokov. Model je kombinacija enodimenzijskega toka v strugi in dvodimenzijskega toka po poplavnem območju.

Račun poplavnega vala v dveh dimenzijah je izveden z numeričnim reševanjem enačb na osnovi aproksimativne metode končnih razlik, ki se uporabljajo za numerično reševanje Navier-Stokesovih enačb.

Model vključuje kontinuitetno in polno dinamično enačbo (kinematični in dinamični val). Uporabljena je v nekonservativni obliki. S kontinuitetno enačbo je zagotovljena ohranitev volumna, s polno dinamično enačbo pa potovanje poplavnega vala.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hv}{\partial x} = i \quad (1)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v_x}{g} \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v_x}{\partial t} \quad (2)$$

V enačbah (1) in (2) predstavlja h globino toka, v globinsko povprečno komponento hitrosti v eni od osmih smeri toka x , i intenziteto efektivnih padavin, ki je na gladini toka različna od nič, S_f padec gladine in S_0 padec dna. V enačbi (2) nastopa še izraz za gradient tlaka in členi lokalnih pospeškov, ki označujejo, da gre za nestalni tok.

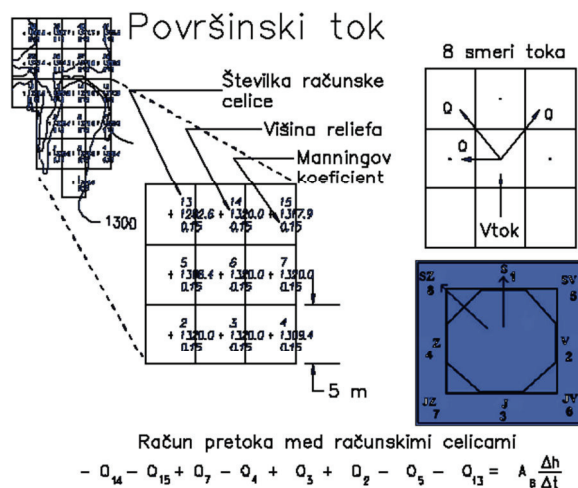
Model simulira napredovanje poplavnega vala po sistemu kvadratnih mrežnih elementov pri pogoju ohranjanja volumna tekočine (slika 3). V prvem koraku model izračuna povprečno geometrijo, hrapavost in naklon med sosednjima računskima celicama. Globina toka za izračun hitrosti skozi rob mrežnega elementa za naslednji časovni korak je ocenjena iz predhodnega časovnega koraka, z uporabo linearne (povprečne) ocene globine med dvema celicama. Prvo oceno hitrosti izračunamo z uporabo enačbe difuzijskega vala (preoblikovane dinamične enačbe). Edina neznanka v tej enačbi je hitrost površinskega toka, ki jo izračunamo za tok po površini, v strugi ali po cesti. Predpostavljeno hitrost iz enačbe difuzijskega vala nato uporabimo kot prvo oceno hitrosti za rešitev polne dinamične in kontinuitetne enačbe po Newton-Raphsonovi metodi in izračun prave hitrosti toka. Pretok čez rob računske celice se izračuna kot produkt hitrosti in pretočnega prereza v določenem prečnem prerezu. Pri računu površinskega toka, je širina toka prilagojena z uporabniško določenim

redukcijskim faktorjem širine (WRF - *Width Reduction Factor*). Prirastki pritokov za posamezno računsko celico v določenem časovnem koraku in v vseh osmih smereh, to je gorvodnih in dolvodnih elementov struge, se seštejejo. Seštevek se razporedi po razpoložljivi površini znotraj mreženega elementa, za določitev prirastka oz. spremembe globine toka. Nato se pred izračunom globine v naslednji celici preveri kriterij numerične stabilnosti. Če je kriterij numerične stabilnosti presežen, se časovni korak simulacije ponastavi na prejšnji čas simulacije, prirastek časovnega koraka se zmanjša, vsi računi s predhodnim časovnim korakom so zavrženi in računi hitrosti se znova ponovijo. Simulacija poteka in časovni korak se povečujeta dokler kriterij numerične stabilnosti ni presežen.

V tem zaporedju se najprej izračuna vtok v mrežni sistem in padavine, nato tok v strugi in po cesti, če je ta vključen v simulacijo. Na koncu pa je določen površinski tok v osmih smereh. Ko so vse komponente toka gotove, se preveri kriterij numerične stabilnosti za vsako računsko celico poplavnega območja, za vsak element struge ali ceste. Če je kriterij stabilnosti katerega koli elementa presežen, se zmanjša časovni korak z različnimi funkcijami, odvisno od predhodne zgodovine uspešnih stabilnosti. Nato se račun ponovno zažene. Ko je kriterij numerične stabilnosti uspešno izpolnjen v vseh računskih celicah, se časovni korak poveča za nadaljnji račun napredovanja vala po mrežnem sistemu. Med napredovanjem po mrežnem sistemu v časovnem koraku se vtočnim elementom prišteje pritok, izračunajo se hitrosti toka in pretoki med mrežnimi elementi ter določijo spremembe v volumnu zadrževanja za vsak mrežni element. Na koncu vsakega časovnega koraka se sešteje celotni volumen vtoka in odtoka, volumen sprememb v zadrževanju ali izgube iz površine mrežnega sistema in izvede račun ohranitve volumna. Rezultati so zapisani v izhodnih datotekah ali na zaslonu v uporabniško določenih časovnih intervalih.

Flo-2D je sestavljen iz procesorskih programov, ki olajšajo grafično urejanje in kartiranje ter komponent za simulacijo in določitev elementov

struge in fizičnih lastnosti prispevnega območja. Procesorska programa GDS in FLOENVIR omogočata prostorsko urejanje atributov na mrežnem sistemu. S pomočjo programa PROFILES urejamo padec dna struge in obliko prečnih prereзов struge. Grafični prikaz rezultatov računa poplavnega vala pa omogočajo programi MAXPLOT, MAPPER in HYDROG. Slednji omogoča prikaz hidrograma.



Slika 3: Pretok čez robove računskih celic (prirejeno po: O'Brien, 2009c).

Figure 3: Discharge flux across grid element boundaries (adapted from O'Brien, 2009c).

3.2 Priprava podatkov

Za postavitev modela potrebujemo podatke o terenu, hidrologiji ter nastavitve kontrolnih in numeričnih stabilnostnih parametrov.

Podatke o terenu prikažemo z digitalnim modelom reliefa. Podatki so lahko v ASCII (*.pts) ali shape (*.shp) obliki. Digitalni modeli višin (DMV) pokrivajo celotno Slovenijo in so dosegljivi na Geodetski upravi RS (GURS, 2012). Kot najbolj geomorfološko primerni in homogeni so se izkazali podatki DMV ločljivosti 12,5 m (Podobnikar, 2008). Digitalni model višin je potrebno projicirati na mrežo končnih elementov. Vsaka celica ima določeno velikost, vrednosti (zaporedno številko, višino in Manningov koeficient) in druge fizične lastnosti (objekt, cesta, nasip, kanal, hidravlični objekt ipd.). Velikost mrežne celice in vrsta terena zelo vplivata na hitrost računa in natančnost

interpolacije višin. Mrežo čim natančneje omejimo z območjem računa gibanja vode in jo višinsko interpoliramo. Program omogoča interpolacijo naklonov celic glede na obseg upoštevanih višinskih točk, filtriranje višinskih točk, upoštevanje največje razlike med višinskimi točkami, ali standardne deviacije vseh višinskih točk. S filtriranjem višinskih točk lahko dosežemo določeno stopnjo glajenja (polnjenje večjih lukenj in ustvarjanje ravnih ploskev). Na osnovi ortofoto posnetka in temeljnega topografskega načrta v računsko mrežo umestimo potek vodotokov, geometrijo struge in izvedemo interpolacijo padcev prečnih profilov med računskimi celicami struge v programu PROFILES. Rezultat te interpolacije je enakomeren padec dna struge osnovnega korita. Vpliv trenja in izgube energije toka zajema Manningov koeficient hrapavosti n_g , katerega vrednosti vplivajo na globine in hitrosti toka ter na velikost preplavljene površine. Manjši koeficienti pomenijo večje hitrosti in manjše globine toka in obratno. Spodnji robni pogoj določimo končnim elementom struge in elementom, kjer meje računskega območja in linije hidrografskih razvodnic na osnovi reliefnih značilnosti odstopajo od topografskih razvodnic. Pri simulaciji toka vode se upošteva, da po zapolnitvi struge voda začne slediti lokalni topografiji. Ko tok prestopi bregove reke, se razlije po mrežnih elementih glede na topografijo, hrapavost in objekte na poplavnem območju. Pri določanju pretoka v posameznem profilu struge je zato potrebno sešteti pretok v strugi in inundaciji.

Padavine vnašamo v datoteko RAIN.DAT. Program omogoča uporabo zgodovinskih in sintetičnih padavin. Osnovna zahtevana podatka sta količina skupnih padavin v milimetrih in časovna razporeditev padavin. V program Flo-2D je kodiranih sedem sintetičnih razporeditev padavin (SCS (angl. *Soil Conservation Service*) brezdimenzijska razporeditev, SCS 24-urna porazdelitev tipa II in II A, FCDMC 2 (angl. *Flood Control District of Maricopa County*), 2-urna razporeditev padavin za projektiranje zadrževanih padavin na določeni prispevni površini in pet 6-urnih vzorcev razporeditve padavin FCDMC.

Model Flo-2D omogoča tudi simulacijo padavinskih izgub. Padavinske izgube so odvisne od hidrološkega tipa zemljine, rabe in obdelave tal, pokrovnosti tal in predhodne vlažnosti zemljine. Zajemajo tudi začetne izgube zaradi infiltracije in izhlapevanja. Za izračun padavinskih izgub ima Flo-2D možnost uporabe metode SCS, metode Greena in Ampta ali kombinacije obeh. Enačba modela Greena in Ampta zahteva oceno hidravlične prevodnosti, efektivne poroznosti, začetne vlažnosti zemljišča in začetnega gradienta kapilarnega potenciala. Vsi parametri imajo ustrezne fizikalne osnove. Infiltracija se izračuna za vsak časovni korak, v katerem imamo padavine. SCS metoda padavinskih izgub oceni presežek padavin kot funkcijo celotne količine padavin in empiričnega koeficienta CN. Vrednost koeficienta CN je med 1 in 100. V našem modelu je bila za določanje izgub uporabljena metoda SCS CN, ker je enostavna in zahteva le parameter CN.

Pred zagonom modela moramo nastaviti še kontrolne in numerične parametre stabilnosti:

- *n-value Adjustment* (AMANN): spreminjanje koeficienta n_g z globino [0 – 0,4; - 99; > 1];
- *Floodplain Limiting Froude No.:* omejevanje Froudovega števila, nastajanja deročega toka [< 1 , = 1; > 1];
- *Flow depth for Depth Duration Analysis:* komponenta za beleženje časa trajanja poplav;
- *Shallow Flow n-value:* vrednost koeficienta n_g za plitve tokove [0,1 – 0,4];
- *Area Reduction Factor:* možnost za zmanjšanje površine posamezne celice ali blokiranje računskih celic (suhe celice) [0 - 1];
- *Surface Detention (TOL):* najmanjša globina, ki jo model še modelira oz. debelina vodne plasti, potrebna za račun poplavnega vala [0,005 – 0,3 m]. Privzeta vrednost je nastavljena na 0,03 m.
- *Percent Change in Flow Depth (DEPTOL):* nastavitve za tolerance sprememb v globini sosednjih računskih celic v časovnem koraku [0; 0,1 – 0,5];

- *Dynamic Wave Stability Coefficient*: nastavitveni koeficienta stabilnosti računa [< 0 ; 0,01 do 2; > 100];
- *Courant Number*: pogoj za kontrolo računskega koraka [0,1 – 1,0].

3.3 Umerjanje

Glavni parametri, potrebni za umerjanje modela so: Manningov koeficient hrapavosti n_g , Froudovo število, koeficient izgub SCS CN, topografija, velikost računske celice in kontrolni parameter TOL.

3.3.1 Manningov koeficient hrapavosti

Hrapavost prispevne površine umerjamo z določitvijo koeficienta hrapavosti prispevne površine. Določimo ga za vsako celico posebej v datoteki FPLAIN.DAT in predstavlja osnovno hrapavost prispevne površine. Vrednosti tako določenih koeficientov hrapavosti lahko omejujemo tudi s pomočjo določitve globalnega Froudovega števila v datoteki CONT.DAT ali pa spremenljivo v odvisnosti od globine toka.

Za plitve tokove je na voljo funkcija SHALLOWN v datoteki CONT.DAT, ki omogoča enotno določitev koeficientov hrapavosti za globine toka manjše od 0,6 m. Razpon te vrednosti je med 0 in 0,4. Namen te funkcije je izboljšati čas potovanja vala po mrežnem sistemu (O'Brien, 2009a). Za preplavljene celice z globino toka večjo od 0,6 m veljajo uporabniško določeni koeficienti hrapavosti.

Za boljšo oceno časa potovanja vala po prispevni površini program omogoča tudi uporabo globinsko spremenljive hrapavosti. Osnovna enačba za izračun hrapavosti celice n_d , glede na globino toka na prispevni površini, je:

$$n_d = 1.5 \cdot n_b \cdot e^{-\left(\frac{0.4 \cdot \text{globina}}{d_{\max}}\right)} \quad (3)$$

kjer je n_b hrapavost pri plitvem toku, globina predstavlja globino toka, d_{\max} pa je globina toka pri poplavljeni hrapavosti elementov in vegetacije (privzeta vrednost v programu je 1 m).

Z enačbo 3 je določeno, da je globinsko spremenljiva hrapavost na prispevni površini za preplavljene celice (globina toka 1 m) enaka uporabniško določeni. Funkcija za spreminjanje koeficienta hrapavosti glede na globine toka je privzeto vklopljena. Če jo želimo izklopiti, v datoteko CONT.DAT zapišemo vrstico AMANN = -99. Takšno uravnavanje hrapavosti posledično upočasni potovanje poplavnega vala. Račun spremenljive hrapavosti se izvaja do globine 1 m. V praksi to pomeni, da bo pri globini toka 0,3 m izračunana hrapavost 1,3-krat večja od uporabniško določene hrapavosti pri globini toka 1 m. S funkcijo ROUGHADJ lahko znižamo morebitne visoke vrednosti Froudovega števila.

S sočasno uporabo funkcij za uravnavanje hrapavosti, tj. za plitvi tok in za globinsko spremenljivo hrapavost, se račun za vsako računsko celico izvaja na način, ki je prikazan v preglednici 1.

Preglednica 1: Kriteriji in pravila za določanje hrapavosti celice (O'Brien, 2009a).

Table 1: Grid element roughness rules (O'Brien, 2009a).

Kriterij/Criterion	Pravilo/Rule
$0 < \text{globina toka [m]} < 0,06$	$n_g = \text{SHALLOWN}$ (vrednost hrapavosti za plitvi tok)
$0,06 < \text{globina toka [m]} < 0,15$	$n_g = \text{SHALLOWN} / 2$
$0,15 < \text{globina toka [m]} < 1$	$n_g = 1.5 \cdot n_b \cdot e^{-\left(\frac{0.4 \cdot \text{globina}}{d_{\max}}\right)}$
$\text{globina toka [m]} > 1$	$n_g = n_g$ (vrednost hrapavosti določene v FPLAIN.DAT)

Na sliki 4 je grafičen prikaz globinsko spremenljive hrapavosti na prispevni površini v programu Flo-2D. Za izbran primer veljajo naslednje nastavitve parametrov (Sharp, 2008):

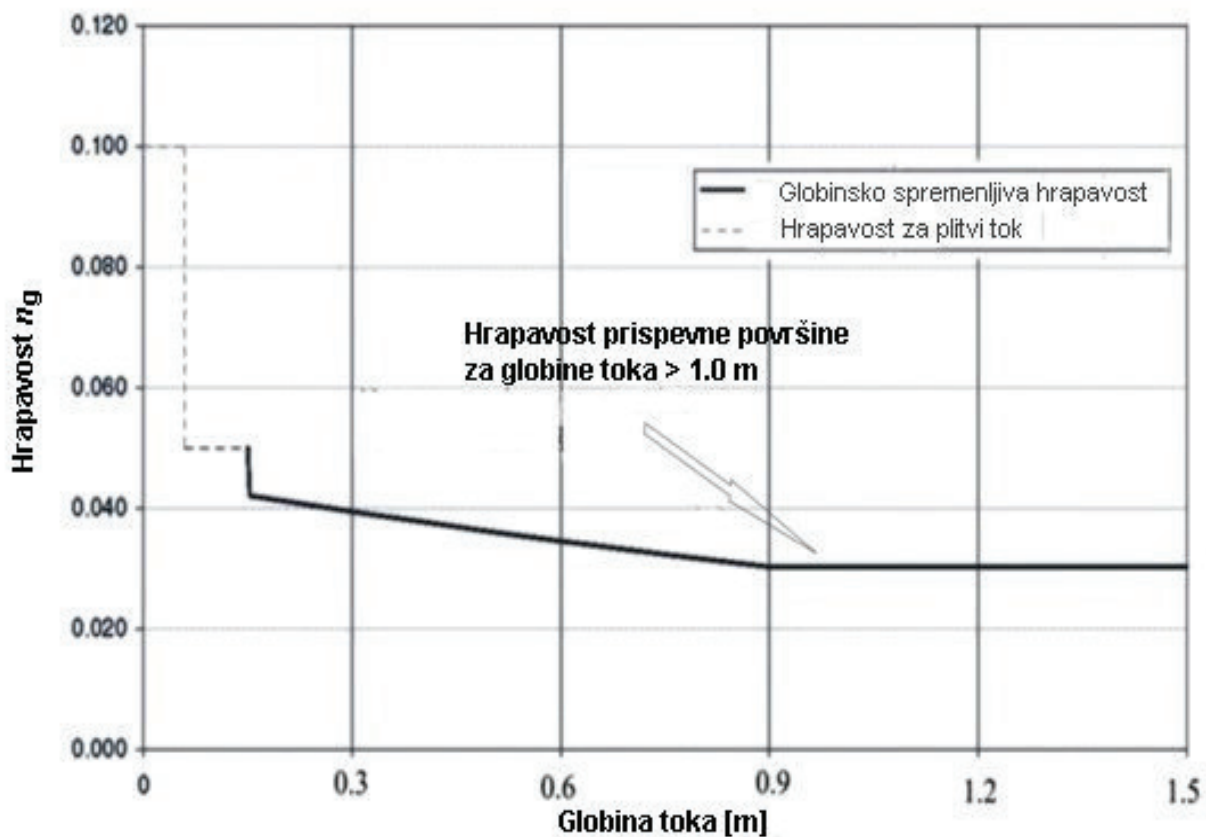
- globalna vrednost hrapavosti za plitvi tok SHALLOW je 0,10;
- funkcija za račun globinsko spremenljive hrapavosti je vključena;
- uporabniško določena hrapavost prispevne površine je 0,03.

Posledica pravil za račun globinsko povprečne hrapavosti, navedenih v preglednici 1, je za izbrani primer 1,3-krat večja vrednost uporabniško določenega koeficienta hrapavosti za prispevno površino (0,039) pri globini toka 0,3 m in 1,4-krat večja vrednost koeficienta hrapavosti (0,042) pri globini toka 0,18 m (slika 4) (Sharp, 2008).

Hrapavost struge umerjamo z določitvijo koeficienta n_d za vsako celico struge posebej v datoteki CHAN.DAT, z omejevanjem Froudovega števila in/ali s spreminjanjem koeficienta n_d glede na globino toka ROUGHADJ. Razpon vrednosti ROUGHADJ je med 0 in 1,2. Večji koeficient dovoljuje večje spremembe vrednosti koeficienta n_d , in obratno. Osnovna enačba za izračun hrapavosti celice n_d glede na globino toka v strugi je:

$$n_d = a \cdot n_b \cdot e^{-\left(\frac{b \cdot \text{globina}}{d_{\max}}\right)} \quad (4)$$

Kjer je n_b hrapavost struge pri strugotvorni globini, globina predstavlja globino toka, d_{\max} je globina polne struge, b je uporabniško določena sprememba koeficienta hrapavosti [0 – 1,2] in $a = 1/e^{-b}$.

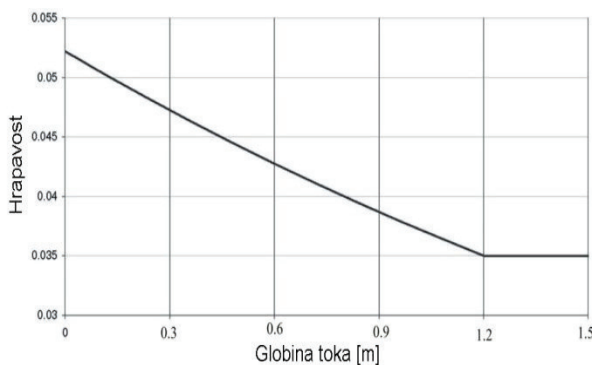


Slika 4: Prikaz globinsko spremenljive hrapavosti na prispevni površini (prirejeno po: Sharp, 2008).

Figure 4: Representation of depth-varied floodplain roughness (adapted from Sharp, 2008).

Z enačbo 4 je predpisano, da je globinsko spremenljiva hrapavost struge enaka hrapavosti struge pri strugotvorni globini. Če uporabnik določenemu odseku struge pripiše vrednost koeficienta spremenljive hrapavosti b [0 – 1,2], se bodo posledično pri nižjih gladinah vode vrednosti koeficientov hrapavosti povečale. Večji kot je koeficient b , večje so dovoljene spremembe v hrapavosti. Vpliv sprememb v hrapavosti se kaže v zmanjšanju hitrosti napredovanja poplavnega vala v strugi na način, da se poveča hrapavost pri plitvem toku v strugi, pri čemer na uporabniško določeno višino hrapavosti dna struge ne vpliva. V praksi to pomeni, da bo hidravlični Manningov koeficient hrapavosti 1,4-krat višji od predpisanega za strugotvorni tok, kadar je globina toka v strugi 20 % zapolnjenosti korita in je vrednost koeficienta b nastavljena na 0,44. Z določitvijo vrednosti ROUGHADJ lahko vplivamo na zmanjšanje Froudovega števila.

Slika 5 prikazuje, na kakšen način je z enačbo 4 v programu Flo-2D definirano razmerje hrapavosti struge pri nastavitvah uporabniško določene hrapavosti 0,035 in strugotvorni globini 1,2 m (Sharp, 2008).



Slika 5: Prikaz globinsko spremenljive hrapavosti struge (prirejeno po: Sharp, 2008).

Figure 5: Representation of depth-varied channel roughness (adapted from Sharp, 2008).

Za opis tokovnih razmer program Flo-2D omogoča tudi uporabo Froudovega števila, s katerim je podano razmerje med hitrostjo toka in hitrostjo potovanja vala. Fizikalno razmerje med gibalnimi in težnostnimi silami vključuje padec dna, površino prečnega prereza in odpor toku vode

(O'Brien, 2009b). Froudovo število F_r je določeno z enačbo:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (5)$$

kjer je v ocenjena hitrost in h globina vode pri strugotvorni globini.

Omejevanje Froudovega števila se izvaja pri računu na način, da v celicah, kjer je bila nastavljena omejena vrednost presežena, program poveča vrednost koeficienta hrapavosti n_g , hitrost toka pa se posledično zmanjša. Te spremembe vrednosti se med simulacijo zapišejo v datotekah rough.out, chan.rgh in fplain.rgh. Po končani simulaciji lahko končne vrednosti koeficientov nadomestimo s predpostavljenimi in ponovno izvedemo račun, vse dokler ne dosežemo zadovoljivega ujemanja vrhov merjenega in izračunanega hidrograma odtoka.

3.3.2 Koeficient izgub SCS CN

Program Flo-2D začne račun poplavnega vala, ko so depresije zapolnjene z vodo in je debelina vodne plasti večja od TOL. Začetne izgube največkrat (tudi v programu HEC-HMS) predstavljajo vodo, ki se nabere v depresijah, preden se začne površinski odtok. V programu Flo-2D pa so te začetne izgube vključene v parametru TOL, katerega vrednost se giblje med 0,005 in 0,03 m. V priročniku modela Flo-2D je priporočena vrednost za modeliranje manjših poplavnih dogodkov enaka 0,015 m. To pomeni, da je debelina vodne plasti preden se začne odtok enaka 0,015 m, volumen te plasti pa je del začetnih izgub.

Pri ocenjevanju izgub je potrebno upoštevati vrednost parametra površinskega zadrževanja TOL, hkrati pa tudi dejstvo, da je zaradi topografije velik del začetnih izgub avtomatsko pokrit in da delež neprepustnih površin lahko zajamemo le s koeficientom CN. Izračun začetnih izgub je pri možnosti določanja prostorsko spremenljive infiltracije samodejen glede na podan CN. V primeru določitve skupnega povprečnega koeficienta CN za celotno modelirano območje, pa te začetne izgube določi uporabnik. Če nastavimo

začetne izgube na vrednost 0 mm, pa se te izračunajo samodejno.

3.3.3 Topografija

Interpolacija točk DMV za določitev višin posameznih računskih celic s programom GDS ni popolnoma točna. Komponenta za pregledovanje rezultatov Mapper omogoča hitro določitev lege elementov, ki imajo čezmerne globine toka in tvorijo neobstoječe depresije. Popravke višin lahko ročno korigiramo z ozirom na obstoječe topografske podlage TTN5 (potek plastnic) in ortofoto posnetek. Med digitalnimi modeli višin različnih resolucij (DMV 5, DMV 10 generiran iz DMV 5, DMV 12,5 in DMV 25) se je po grobi primerjavi rezultatov vodne bilance med modeli kot najbolj ustrezen izkazal DMV 12,5 m.

3.3.4 Velikost računske celice

Ko vnesemo višinske točke v program, je potrebno podlogo prekrito z računsko mrežo poljubne gostote. Vsaka celica ima določeno velikost, zaporedno številko, višino, Manningov koeficient n_g in druge fizične lastnosti (objekt, cesta, nasip, kanal, hidravlični objekt ipd.).

Za pomoč pri izbiri velikosti mrežnega elementa avtor programa navaja naslednji kriterij: razmerje med ocenjeno konico visokih vod Q_{peak} in površino mrežnega elementa A_{surf} , naj bo v mejah:

$$\frac{0.03 \text{ m}^3/\text{s}}{\text{m}^2} < \frac{Q_{peak}}{A_{surf}} < \frac{0.3 \text{ m}^3/\text{s}}{\text{m}^2} \quad (6)$$

Bližje kot je razmerje Q_{peak} / A_{surf} $0,03 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$, hitrejši je izračun. Če je razmerje večje od $0,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$, se računski čas bistveno podaljša (O'Brien, 2009b).

3.3.5 Kontrolni parameter TOL

Najmanjša globina, ki jo model še modelira (parameter TOL) ima pomemben vpliv na volumen odtoka. Večje vrednosti parametra TOL pomenijo večje izgube in manjši odtok in obratno. Vrednost 0,005 m predstavlja spodnjo mejo, pri kateri je še zagotovljena stabilnost modela.

4. Model površinskega odtoka

Za izdelavo modela je bilo potrebno digitalni model višin projicirati na mrežo končnih elementov. Kot najbolj ustrezen se je izkazal DMV 12,5 m, zato so bili končni izračuni modela narejeni z mrežo z 12,5 metriskimi celicami, generiranimi iz DMV 12,5. Naklon posamezne celice je bil izračunan z interpolacijo višinskih točk.

Pomembno je tudi čim bolj natančno določiti računsko območje, ki pokriva celotno območje gibanja vode. Velikost računskega območja pogojuje število računskih celic in čas računa. Za namen vzpostavitve hidrološkega modela Glinščice smo za meje porečja upoštevali razvodnice, kjer je poleg topografije terena upoštevana tudi odvodnja meteornih voda z urbanih območij, ki segajo že izven padavinskega prispevnega območja Glinščice in odražajo dejansko stanje na porečju.

Na osnovi ortofoto posnetka in temeljnega topografskega načrta v merilu 1:5000 (TTN5) smo v računsko mrežo umestili poteke vodotokov Glinščice in Pržanca. Skupna dolžina modeliranih vodotokov znaša 10.663 m (738 celic). Interpolacija padcev prečnih profilov med računskimi celicami struge je bila izvedena v programu PROFILES. Rezultat te interpolacije je enakomeren padeč dna struge osnovnega korita. Koseški bajer je z modelom reliefa predstavljen kot večja depresija, kamor se stekajo večje količine vode in v njem tudi zadržijo. V modelu smo izločili vpliv bajerja tako, da smo topografijo (višine) na tem območju ročno zgladili. Pri tem smo upoštevali, da voda gravitira proti zahodnemu delu, v potok Pržanec.

Koeficiente hrapavosti smo določili na osnovi obstoječe literature (Julien, 2002; O'Brien, 2009a). Za porečje Glinščice smo uporabili naslednje Manningove koeficiente hrapavosti: n_g (gozd) = 0,1, n_g (njiva, travnik) = 0,06, n_g (urbano) = 0,03. Za strugo je bil uporabljen enoten Manningov koeficient hrapavosti, enak 0,04. Slednjega je bilo potrebno za ujemanje vrhov hidrograma odtoka kasneje umeriti. Umerjanje parametrov pretoka je potekalo s pomočjo vgrajene funkcije za omejevanje Froudevega števila. Največje

Froudovo število je bilo za tok v strugi približno ocenjeno na 0,6 in za tok po prispevni površini na 0,8.

Da bi preprečili razlivanje toka izven računskega območja, je bilo potrebno določiti spodnji robni pogoj. Glavni iztok s porečja predstavlja končni element struge. Ker je širina struge manjša od širine mrežnega elementa, ta iztočna celica predstavlja kombiniran iztok iz struge in s prispevne površine.

Za določanje padavinskih izgub smo uporabili SCS CN metodo izgub. Vrednosti koeficientov, ki jih zahteva SCS CN metoda, sta za model Glinščice ocenila že Dirnberk in Šraj (2010). Te koeficiente smo uporabili za prvo umerjanje. Ker je v programu Flo-2D zaradi topografije velik del začetnih izgub avtomatsko pokrit, delež neprepustnih površin lahko zajamemo le s koeficientom CN. Posledično so se ti koeficienti pri umerjanju izkazali kot podcenjeni in neprimerni. Ker so v modelu Flo-2D izgube upoševane tudi s parametrom TOL, smo izbrali možnost določitve skupnega, povprečnega CN, ki omogoča poljubno nastavitvev začetnih izgub. Vrednost začetnih izgub smo nastavili na 0,01 m.

Za namen umerjanja sta bili izbrani meteorološka postaja Pržanec (UL FGG, KSH) in vodomerna postaja pri Biološkem središču (UL FGG, KSH) (slika 2). Izbran je bil padavinski dogodek 17. - 18. januar 2004 in pripadajoč hidrogram odtoka (slika 6). To je tudi eden od dogodkov, na katerega je bil s program HEC-HMS umerjen model Glinščice (Dirnberk in Šraj, 2010; Šraj et al., 2010).

5. Rezultati in razprava

5.1 Primerjava in analiza rezultatov za izbran padavinski dogodek

Opis in rezultati modela Flo-2D za izbran padavinski dogodek 17. - 18. januar 2004 so prikazani v preglednici 2.

V prvem delu preglednice 2 so predstavljene glavne geometrijske lastnosti modela, v drugem delu nekaj pomembnejših vhodnih spremenljivk in rezultatov modela ter na koncu še merjene

vrednosti odtoka na vodomerni postaji pri Biološkem središču (UL FGG, KSH) (slika 2).

Preglednica 2: Opis in rezultati modela za padavinski dogodek januarja 2004.

Table 2: Description and model results for the precipitation event in January 2004.

Ime spremenljivke/parametra Name of variable/parameter	Podatek/rezultat Datum/Result
<i>Geometrija/Geometry</i>	
Velikost računske celice [m]	12,5
Podatki o višini	GURS DMV 12,5
Število računskih celic - skupno	106.493
Število računskih celic - odtok	325
Povprečni CN	94,18
<i>Rezultati modela/Model results</i>	
Količina padavin [mm]	50,4
Infiltracija [mm]	11,99
Odtok [mm]	38,41
Volumen vtoka [m ³]	838.631,53
Volumen infiltracije [m ³]	198.840,22
Volumen zadržane vode [m ³]	84.261,16
Celotne izgube [m ³]	283.101,38
Odtok s prispevne površine [m ³]	177.156,04
Odtok po strugi [m ³]	378.374,14
Skupni odtok [m ³]	555.530,18
Konica pretoka [m ³ /s]	9,4
<i>Merjene vrednosti/Measured values</i>	
Konica pretoka [m ³ /s]	9,74
Volumen odtoka [m ³]	555290

Slika 6 prikazuje rezultate umerjenega dvodimenzijskega modela Flo-2D v primerjavi z rezultati meritev in rezultati enodimenzijskega

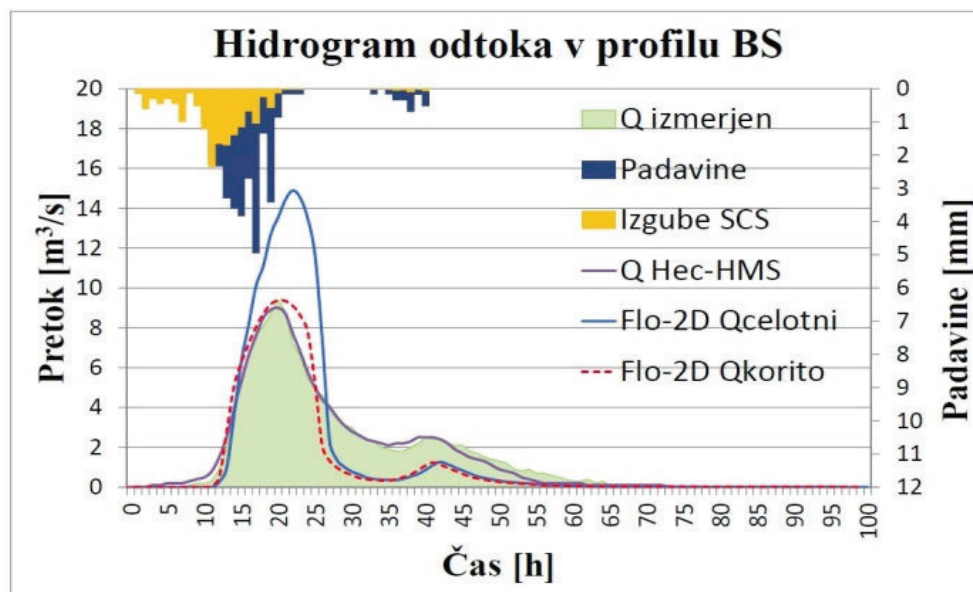
modela HEC-HMS. Odstopanje (RMSE) modela celotnega padavinskega odtoka (odtoka s prispevne površine in odtoka po strugi) s programom Flo-2D od dejanskih meritev znaša $1,04 \text{ m}^3/\text{s}$, Volumen odtoka je za 0,04 % večji od izmerjenega, konica odtoka pa je nastopila 50 minut po izmerjeni.

Oblika naraščajočega dela hidrograma in vrh hidrograma se lepo ujemata z rezultati meritev in rezultati modela HEC-HMS. Zelo problematičen je padajoči del hidrograma. Slika 6 kaže, da se voda v strugi in na prispevni površini sprva predolgo zadržuje, kasneje pa prehitro odteče.

Najbolj problematična je oblika drugega dela vala. Pri metodi SCS velja, da so začetne padavinske izgube razporejene znotraj prve periode padavinskega dogodka, padavine, ki padejo kasneje, pa prispevajo le k površinskemu odtoku. Pri modelu Flo-2D se za izračun poplavnega vala upoštevajo padavinske izgube, ki so določene s parametrom TOL. Zato je takšen rezultat najverjetneje posledica dejstva, da je v simulaciji s programom Flo-2D upoštevano zadrževanje zaradi topografije in upoštevanje potrebne najmanjše višine padavin, preden se začne račun pretoka med celicami. Slednje v program HEC-HMS ni v celoti vključeno, manjši del je zajet z začetnimi

izgubami. V programu HEC-HMS je najbolj problematična ocena časa koncentracije padavinskega odtoka vode s prispevne površine, v programu Flo-2D pa ocena Manningovih koeficientov hrapavosti.

Koeficientov SCS CN seveda ne moremo prenesti neposredno iz enega v drug model, saj se v modelu HEC-HMS parameter CN določi za vsako posamezno podpovodje (Dirnberk in Šraj, 2010), v distribuiranem modelu Flo-2D pa za vsako celico modela. Poleg tega model HEC-HMS omogoča dodatno tudi vnos deleža neprepustnih površin, v modelu Flo-2D pa moramo le-te upoštevati v sami vrednosti koeficienta CN. To je tudi razlog, da so bile povprečne vrednosti uporabljenih in umerjenih koeficientov CN v modelu Flo-2D nekoliko višje od tistih v modelu HEC-HMS. Upoštevali smo, da po teksturi tla na porečju Glinščice spadajo v meljasto ilovico, v globljih horizontih tudi v meljasto-glinasto ilovico. Takšen teksturni sestav vpliva na to, da so tla slabo strukturirana in slabo prepustna. Površinska voda, ki se ob večjih padavinah ne utegne pravočasno odcediti v globino, stagnira dalj časa v površinskem delu tal (Stepančič et al., 1982). Vrednost skupnega, povprečnega koeficienta CN je bila določena na 94,18 in vrednost začetnih izgub na 0,01.



Slika 6: Površinski odtok v profilu pri Biološkem središču dobljen s SCS metodo padavinskih izgub.

Figure 6: Runoff in the channel cross section Biološko središče computed by SCS Curve Number Methodology.

V splošnem na obliko hidrograma poleg prostorske in časovne razporejenosti padavin vplivajo še fizične lastnosti porečja, kot so površina, padec, hrapavost, skladiščna zmogljivost, gostota vodotokov in predhodna vlažnost. Model Flo-2D je fizikalno osnovan, distribuiran model, ki kontinuirano računa odtok padavin tako, da upošteva topografijo. To pomeni, da so površina porečja oz. razvodnice, padec terena, potek in skladiščne zmogljivosti samega vodotoka in prispevne površine določeni neposredno z digitalnim modelom višin, na katerega modelar nima bistvenega vpliva. Edina empirična enačba je Manningova enačba hrapavosti.

5.2 Primerjava in analiza rezultatov modela z uporabo sintetičnih histogramov padavin

Z umerjenim modelom smo izvedli še izračun odtokov za 10- in 100-letne padavine različnih trajanj in jih primerjali z rezultati, dobljenimi s programom HEC-HMS.

V preglednici 3 je prikazana primerjava tako dobljenih površinskih odtokov. Pretok, izračunan s programom Flo-2D, je v splošnem večji v povprečju za 5 m³/s, nasprotno pa velja za volumne

odtoka, ki so v splošnem manjši. To ne velja za 24-urno trajanje padavin. V teh dveh primerih je izračunani volumen programa Flo-2D večji od tistega, ki ga izračuna HEC-HMS, in sicer za 3,4 % pri 10-letni povratni dobi in za 2,5 % pri 100-letni povratni dobi. Čas nastopa vrha odtoka v vseh primerih nastopi kasneje pri modelu Flo-2D.

5.3 Občutljivostna analiza modela

Z namenom izboljšanja oblike hidrograma odtoka v kontrolnem prerezu in določitve občutljivosti modela smo izdelali več modelov z različnimi nastavitvami. V nadaljevanju so predstavljeni vplivi različnih nastavitvev podajanja padavin oziroma izgub, vpliv različnih nastavitvev podajanja Manningovega koeficienta hrapavosti in vpliv velikosti mreže.

Vpliv različnih nastavitvev računa izgub po metodi SCS CN s programom Flo-2D smo testirali na petih modelih (slika 7). Prvi model (MP1) je bil narejen s celotnimi padavinami in brez računa izgub. Drugi model (MP2) je bil narejen z efektivnimi padavinami, ki so bile rezultat HEC-HMS modela (Dirnberk in Šraj, 2010). Vhodni podatki za tretji model (MP3) so bili prostorsko

Preglednica 3: Primerjava izračunanih vrednosti dvodimenzijskega modela Flo-2D in enodimenzijskega modela HEC-HMS za 10- in 100-letne povratne dobe padavin.

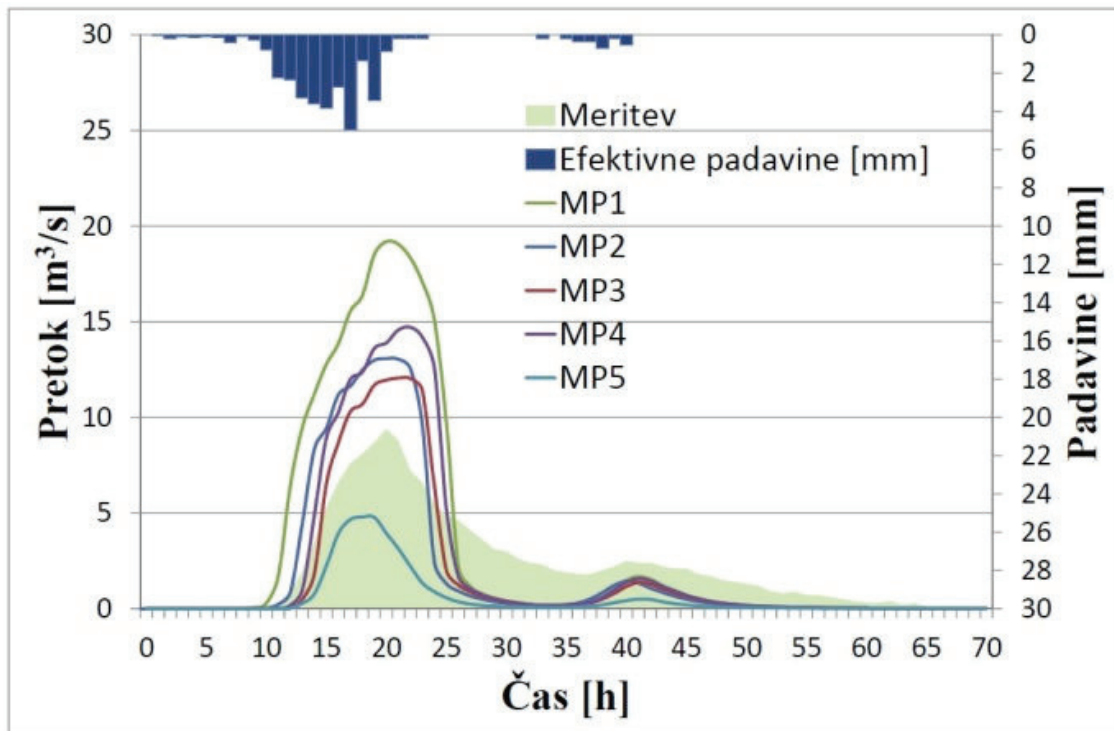
Table 3: Comparison of the two-dimensional Flo-2D model and one-dimensional HEC-HMS model results for 10- and 100-year return period.

T [leta/ years]	Trajanje nevihte/ Duration of the storm [h]	Volumen odtoka/ Runoff volume [m ³]		Konica vala/ Peak of the wave [m ³ /s]		Čas nastopa konice/ Time of peak occurrence	
		Flo-2D	HEC-HMS	Flo-2D	HEC-HMS	Flo-2D	HEC-HMS
10	2	643.204	754.300	24,2	22,4	8:00	5:00
	12	1.110.005	1.169.600	33,3	30,3	12:00	10:00
	24	1.468.773	1.419.900	36,4	32,0	16:00	15:50
100	2	1.061.249	1.180.200	41,5	35,0	7:00	5:00
	12	1.632.681	1.697.300	51,7	44,5	11:00	10:00
	24	2.093.198	2.041.700	53,6	46,5	20:00	15:50

spremenljivi koeficienti SCS CN, kot sta jih določila Dirnberk in Šraj (2010) za umerjen model HEC-HMS, vendar brez deležev neprepustnih površin. V četrtem modelu (MP4) je bil koeficient SCS CN določen kot enotni povprečni, z upoštevanjem neprepustnih površin. Pri petem modelu (MP5) je bila uporabljena funkcija za blokado celic (ARF). Celice, ki so na ortofoto posnetku prepoznavne kot neprepustne površine, so bile določene kot popolnoma suhe celice s funkcijo ARF. Delež takih površin je bil enak deležu neprepustnih površin, ki sta ga Dirnberk in Šraj (2010) določila v modelu HEC-HMS. Namen te primerjave je bil ugotoviti način upoštevanja izgub programa Flo-2D. Iz teh modelov lahko zaključimo, da so skupne izgube enake vsoti izgub zaradi infiltracije, zadrževanja na prispevni površini in zadrževanja v strugi. Kot zadrževanje je upoštevana tudi najmanjša globina računa (TOL). Skupne izgube v modelu HEC-HMS znašajo 17,5 mm, povprečna vrednost koeficienta CN pa 88,6. Če te vrednosti primerjamo z rezultati modela MP4, znašajo skupne izgube 18,3 mm pri

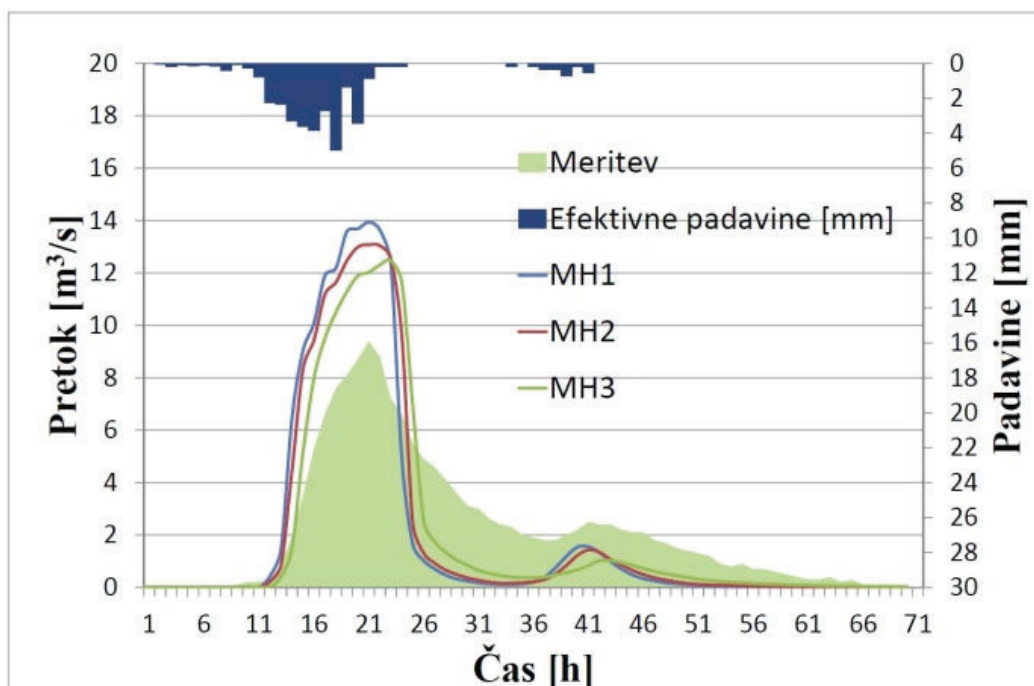
povprečni vrednosti koeficienta CN 94,2. Iz tega sledi, da je potrebno pri ocenjevanju parametrov infiltracije za metodo SCS upoštevati tudi izgube zaradi zadrževanja v depresijah in računa poplavnega vala. Z vrednostjo koeficienta CN 94,2 se najbolj približamo izmerjenemu volumnu odtoka. Uporaba suhih celic v modelu MP5 se je za upoštevanje deleža neprepustnih površin izkazala kot neprimerna, saj pri modelu ni bil izpolnjen pogoj ohranitve volumna. Izračunana volumna odtoka z modeloma MP2 in MP3 sta v primerjavi z izmerjenim močno podcenjena.

Pri izgubah ima pomemben vpliv najmanjša globina, ki jo model še modelira in je določena s parametrom TOL. Večje vrednosti parametra pomenijo večje izgube in manjši odtok, in obratno. V preglednici 4 je prikazana bilanca volumnov pri različnih nastavitvah komponente TOL in enakih ostalih pogojih. Za končni račun je bila izbrana vrednost 0,005 m (Pestotnik, 2011). Ta vrednost predstavlja spodnjo mejo, pri kateri je še zagotovljena stabilnost modela.



Slika 7: Primerjava odtoka za različne možnosti upoštevanja izgub.

Figure 7: Comparison of runoff for different ways of calculating precipitation losses.



Slika 8: Vpliv Manningovega koeficienta hrapavosti na odtok.

Figure 8: The influence of Manning roughness coefficient on runoff.

Preglednica 4: Vpliv kontrolnega parametra TOL na volumen odtoka.

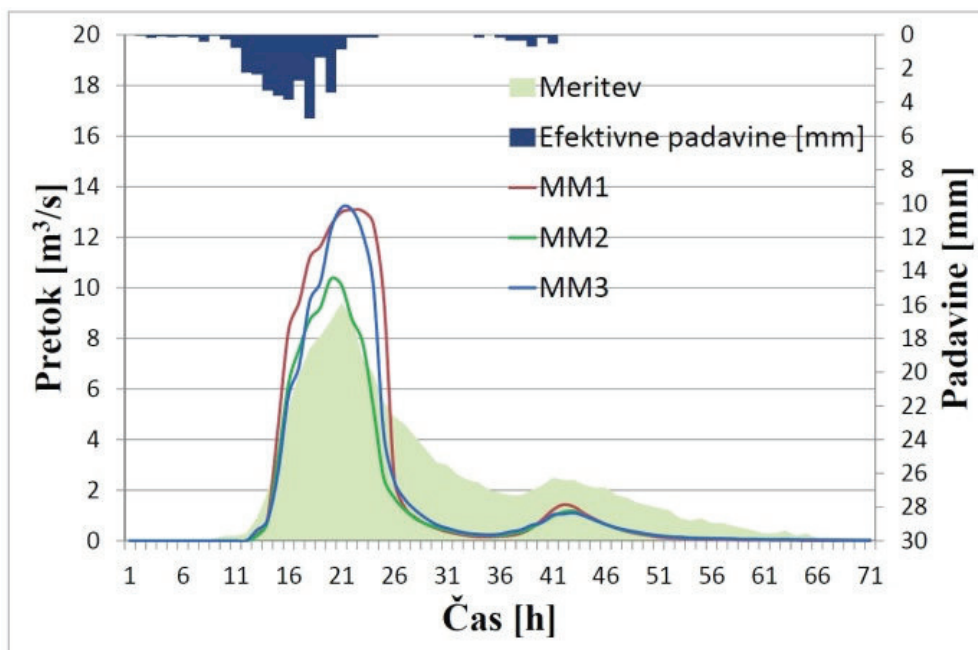
Table 4: The influence of TOL value on the surface runoff volume.

Model	TOL [m]	Izgube/Loss [m ³]	Odtok/Runoff [m ³]
M1	0,015	496.857	343.595
M2	0,010	414.383	426.071
M3	0,005	332.163	508.294

Vpliv Manningovega koeficienta hrapavosti smo testirali na treh modelih (slika 8). Pri prvem modelu (MH1) so bili določeni koeficienti hrapavosti za vsako celico posebej glede na vrsto površine in na priporočene vrednosti koeficientov za modeliranje površinskih tokov iz literature (O'Brien, 2009c). Uporabljene so bile naslednje vrednosti: n_g (gozd) = $0,1 \text{ sm}^{-1/3}$, n_g (njiva, travnik) = $0,06 \text{ sm}^{-1/3}$, n_g (urbano) = $0,03 \text{ sm}^{-1/3}$ in n_g (struga) = $0,04 \text{ sm}^{-1/3}$. Funkcija za račun globinsko spremenljive hrapavosti je bila v tem primeru izključena (AMANN = -99). Pri drugem (MH2) in tretjem (MH3) modelu so bili koeficienti

hrapavosti določeni enotno, in sicer za prispevno površino 0,03 in za strugo 0,04. Funkcija za račun globinsko spremenljive hrapavosti je bila vključena in nastavljena na vrednost 0,1 pri drugem modelu (MH2) in na vrednost 0,25 pri tretjem modelu (MH3).

Vpliv različnih nastavitvev koeficientov hrapavosti prispevne površine je viden predvsem pri času nastopa največjega odtoka. Razlike v največjih pretokih v kontrolnem prerezu so zelo majhne. Pri tej primerjavi najbolj izstopajo razlike v volumnih odtoka. Pri modelu MH3 so koeficienti hrapavosti za plitvi tok relativno visoki (0,25), kar povzroči večji volumen zadržane vode, ki ne odteče, temveč se zadrži na poplavnem območju in v strugi. Posledično je tudi volumen hidrograma odtoka v kontrolnem prerezu struge za ta primer največji. Za prispevno površino velja ravno nasprotno, velik del vode se zadrži in ne prispeva k odtoku. Različne nastavitve računa hrapavosti vplivajo na porazdelitev mas znotraj kontrolnega volumna in na volumen odtoka v določenem kontrolnem prerezu (Pestotnik, 2011). Na obliko hidrograma pri izbrani velikosti celice te nastavitve nimajo pomembnega vpliva.



Slika 9: Vpliv velikosti računske celice na odtok.

Figure 9: The influence of the grid element size on the hydrograph.

Vpliv velikosti računske celice smo testirali na treh modelih (slika 9). Pri prvem modelu (MM1) je bila velikost računske celice enaka 12,5 m, pri drugem modelu (MM2) 25 m in pri tretjem modelu (MM3) 50 m (Pestotnik, 2011). Pri tem je potrebno omeniti, da pri mrežah s stranicama 25 in 50 m topografija, razen zgladitve terena Koseškega bajerja, ni bila dodatno ročno obdelana. Slika 9 prikazuje rezultate vpliva velikosti računske celice na odtok v kontrolnem prerezu. Iz slike je razvidno, da je volumen hidrograma odtoka največji pri modelu MM1 (476.929 m^3), ki ima najbolj natančno mrežo. Volumen modela MM2 je manjši za 22 % in volumen modela MM3 za 1 %. Glede oblike se mreža s stranico 50 m izkaže kot ugodnejša v primerjavi z 12,5 m mrežo, saj je vrh hidrograma ožji. Analizirana je bila tudi odzivnost modelov MM1 in MM3 na spremembe koeficientov hrapavosti. Izkazalo se je, da je model z večjo računsko celico bolj odziven na spremembe kot model z manjšo (Pestotnik, 2011). Verjetno je to posledica enačb, ki jih uporablja Flo-2D za račun toka po prispevni površini. Večji poudarek je namreč na kontinuitetni enačbi kot na dinamični enačbi. Dinamična enačba je

poenostavljena tako, da je pretakanje med celicami mogoče samo v 8 smereh. Pri velikih celicah ima relativno majhna sprememba gladine večji vpliv na volumen v celici, pri zelo majhnih celicah pa se sistem poruši.

6. Zaključki

Umerjanje modela z distribuiranimi parametri je zahtevno in dolgotrajno, saj rezultati niso vedno predvidljivi. Izdelava tovrstnih modelov zahteva številne prostorsko razporejene podatke, katerih pridobivanje je zamudno. Za izdelavo modela Flo-2D tako poleg poteka in dimenzij strug potrebujemo tudi digitalni model višin, podatke o pokrovnosti tal ter podatke o pedološki in geološki sestavi tal. V programu Flo-2D je precej problematična ocena Manningovih koeficientov hrapavosti. Za prispevne površine so bili koeficienti določeni na podlagi podatkov o rabi tal, za strugo pa smo ga določili z umerjanjem.

Kot največja pomanjkljivost modela so se izkazali podatki o terenu oz. strugi. Verjetno bi bil rezultat vnosa natančnejše geodetske izmere strug Glinščice in Pržanca, oziroma zajem vhodnih

podatkov, ki jih omogoča lidar tehnologija, boljše ujemanje oblike hidrograma odtoka.

Izgube so v modelu Flo-2D enake vsoti infiltracije in zadrževanja v depresijah. Kot zadrževanje je upoštevana tudi najmanjša globina izračuna TOL. Upoštevati je treba tudi dejstvo, da je zaradi topografije velik del začetnih izgub avtomatsko pokrit in da delež neprepustnih površin lahko zajamemo le s koeficientom CN. Infiltracijo vode v posameznih celicah smo izračunali s pomočjo SCS modela padavinskih izgub, ki oceni presežek padavin kot funkcijo celotnih padavin, pokrovnosti tal, rabe tal in vlažnosti tal. Depresijske akumulacije predstavljajo začetne izgube padavin, ki so upoštevane na začetku odtoka in jih ocenimo s pomočjo tabel. Manjša razlika med umerjenimi vrednostmi koeficienta izgub CN pri 1D modelu HEC-HMS in 2D modelu Flo-2D je posledica različnega matematičnega opisa procesov v obeh modelih.

Rezultati umerjenega modela Flo-2D kažejo, da se izračunani volumen odtoka dobro ujema z izmerjenim. Se pa pojavi odstopanje pri obliki poplavnega vala. To odstopanje je najverjetneje posledica geometrije, saj s spreminjanjem vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti n_g za strugo in prispevno območje nismo dosegli bistvenega izboljšanja. Slednje pomeni, da je model padavinskega odtoka na spreminjanje parametrov hrapavosti precej neobčutljiv. Ima pa spreminjanje vrednosti Manningovih koeficientov vpliv na konico pretoka.

Določeno odstopanje rezultatov modela od meritev bi lahko pripisali tudi vhodnim padavinskim podatkom. Območje porečja je lahko podvrženo lokalnim vremenskim razmeram, ki jih oddaljene padavinske postaje težko opišejo.

V danem primeru model Flo-2D ni upravičil vseh pričakovanj. Skrbi predvsem slabo ujemanje oblike hidrograma. Zelo zanimivo je, da je oblika hidrograma, izračunana s HEC-HMS, praktično enaka izmerjeni. Pričakovali bi, da bodo zaradi ustrežnejšega opisa geometrijskih značilnosti porečja rezultati modela Flo-2D mnogo boljši. Številni izračuni in analize so pokazali, da v primeru rečne hidravlike takšen razmislek

nedvomno drži. Rezultati modeliranja odtoka bi lahko nakazovali, da je topografija pri modeliranju odtoka relativno manj pomembna.

Rezultati raziskave se pokazali, da na podlagi javno dostopnih podatkov o reliefu (digitalni model višin) dobimo manj natančne rezultate padavinskega odtoka kot z enodimenzijskim hidrološkim modelom HEC-HMS. Ugotovimo lahko, da s kompleksnostjo modela ne pridobimo na natančnosti rezultatov, še več, umerjanje je dolgotrajnejše in težje, pri čemer so ključnega pomena izkušnje modelarja.

Menimo, da je model Flo-2D v hidrološki praksi zaenkrat uporaben le v primerih, kjer so na razpolago dobri podatki za umerjanje. Pred tem je potrebno opraviti še dodatne kontrolne izračune in analize za razumevanje vpliva velikosti računskih celic na rezultate.

Viri

- ARSO (2007). Geoportal ARSO. <http://gis.arso.gov.si/geoportal/catalog/main/home.page> (Pridobljeno 7. 6. 2012.)
- Brilly, M., Rusjan, S., Vidmar, A. (2006). Monitoring the impact of urbanisation on the Glincica stream, *Physics and Chemistry of the Earth*, **31 (17)**, 1089–1096.
- Četina, M., Krzyk, M. (2003). Dvodimenzijsko modeliranje gibanja drobirskega toka v Logu pod Mangartom kot primer nenenewtonske tekočine = Two-Dimensional Modelling of Debris-Flow Movement in Log pod Mangartom as an Example of a Non-Newtonian Fluid, *Strojniški vestnik*, **49 (3)**, 161–172.
- DHD modeliranje, projektiranje in meritve v hidrotehnik d.o.o. (2010). <http://www.dhd.si/model.html> (Pridobljeno 15. 8. 2010.)
- Dirnberk, L., Šraj, M. (2010). Hidrološko modeliranje: Vpliv histograma padavin na hidrogram površinskega odtoka, *Gradbeni vestnik*, **59(3)**, 48–56 (in Slovenian).
- GURS (2012). Geodetska uprava Republike Slovenije. <http://www.gu.gov.si/> (Pridobljeno 16. 4. 2012.)
- Hojnik, T. (2009). Karte poplavne in erozijske nevarnosti ter omilitveni ukrepi. 20. Mišičev vodarski dan 2009, Maribor, 131–137 (in Slovenian).
- Julien, P.Y. (2002). *River Mechanics*. University Press, Cambridge, 434 p.

- MOP (2006). Kategorizacija urejanja vodotokov in karta poplavne varnosti. <http://www.sigov.si/mop/> (Pridobljeno 16. 4. 2012.)
- O'Brien, J. S. (2009a). *Flo-2D - Data input manual*, Flo-2D Software Inc., 162 p.
- O'Brien, J. S. (2009b). *Flo-2D - Handouts: Pocket Guide*, Flo-2D Software Inc., 51 p.
- O'Brien, J. S. (2009c). *Flo-2D - Reference Manual*, version 2009, Flo-2D Software Inc., 63 p.
- 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).
- Podobnikar, T. (2008). Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki. *Geodetski vestnik* **52(4)**, 834–853 (in Slovenian).
- Rusjan, S. (2003). Sonaravno urejanje vodotokov - primer ureditve odseka Glinščice na območju Viča, Ljubljana. Unpublished Thesis, Univerza v Ljubljani, FGG, 83 p. (in Slovenian).
- Sharp, P. I. (2008). *Two - Dimensional Flow Analysis Report for the Lee Moore Wash Basin Management study in Pima County Arizona*, JE Fuller Hydrology & Geomorphology Inc., Arizona, 101 p.
- Sodnik, J., Mikoš, M. (2010). Modeling of debris flow from the Hrenovec torrential watershed above the village of Kropa, *Acta Geographica Slovenica*, **50(1)**, 59–84.
- Stepančič, D., Lobnik, F., Prus, T. (1982). Pedološke raziskave melioracijskega objekta Laboratorijsko polje. UL 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. (2001a). Šifrant padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije = Watershed coding system of the Republic of Slovenia, *Acta hydrotechnica*, **19(30)**, 3–24.
- Šraj, M. (2001b). Uporaba šifranta padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije za pripravo hidroloških modelov = The application of the watershed coding system of the Republic of Slovenia for hydrological modelling, *Acta hydrotechnica*, **19(31)**, 95–116.
- 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).