

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Jamova 2, p. 3422
1115 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



*UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
VODARSTVA IN
KOMUNALNEGA
INŽENIRSTVA*

Kandidatka:

SIMONA PESTOTNIK

Hidrološki model Glinščice s programom Flo-2D

Diplomska naloga št.: 175

**Hydrologic model of Glinščica watershed with program
Flo-2D**

Graduation thesis No.: 175

Mentor:
doc. dr. Mojca Šraj

Predsednik komisije:
doc. dr. Dušan Žagar

Somentor:
Tomaž Hojnik, univ. dipl. inž. gr.

Ljubljana, 2011

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana SIMONA PESTOTNIK izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»HIDROLOŠKI MODEL GLINŠČICE S PROGRAMOM Flo-2D«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 10. 10. 2011

Simona Pestotnik

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 556:53.072:519.6(043.2)
Avtor: Simona Pestotnik
Mentor: doc. dr. Mojca Šraj
Somentor: Tomaž Hojnik, univ. dipl. inž. gradb.
Naslov: Hidrološki model Glinščice s programom Flo-2D
Obseg in oprema: str. 80, pregl. 22, sl. 41, en. 15
Ključne besede: padavine, modeliranje površinskega odtoka, dvodimenzijski matematični model Flo-2D, povodje Glinščice

Izvleček:

V nalogi je predstavljen dvodimenzijski matematični model Flo-2D. Opisana je njegova uporaba, način delovanja in postopek izdelave modela padavine odtok za prispevno območje ljubljanske Glinščice. Nadalje je predstavljena analiza in primerjava končnih rezultatov z rezultati enodimenzijskega programa HEC-HMS. V občutljivostni analizi modela je analiziran vpliv različnih nastavitvev za upoštevanje izgub, Manningovega koeficienta hrapavosti, Froudovega števila, kontrolnega parametra modela TOL in velikosti računskih celic.

Neposredni površinski odtok je bil izračunan s programom Flo-2D po metodi SCS. Model je bil umerjen na osnovi izmerjenega padavinskega dogodka. Postopek umerjanja Flo-2D modela je bil izveden s spreminjanjem vhodnih parametrov in kontrolnih parametrov modela, koeficienta hrapavosti in različnimi možnostmi infiltracijskega koeficienta SCS CN. Glavni del naloge je primerjava rezultatov med enodimenzijskim hidrološkim modelom HEC-HMS in dvodimenzijskim modelom Flo-2D. Rezultate sem statistično ovrednotila z metodo srednjega kvadratičnega pogreška RMSE. Modelirane so bile 10-letne in 100-letne padavine.

Razlika med umerjenimi vrednostmi koeficienta izgub SCS CN za 1D in 2D model je posledica različnega matematičnega opisa in numeričnega modela. Kot največja pomanjkljivost med vhodnimi podatki v model Flo-2D so se izkazali podatki o terenu.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 556:53.072:519.6(043.2)
Author: Simona Pestotnik
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Šraj, Ph. D.
Co supervisor: Tomaž Hojnik, univ. dipl. inž. gradb.
Title: Hydrologic model of Glinscica watershed with program Flo-2D
Notes: p. 80, tab. 22, fig. 41, eq. 15
Key words: Rainfall, rainfall - runoff modeling, two-dimensional mathematical model Flo-2D, Glinscica watershed

Abstract:

The present work begins with description of two-dimensional mathematical model Flo-2D. Its use, functioning and procedure of modeling rainfall - runoff for watershed of river Glinscica is represented. In addition analysis and comparison of the final results with results of one-dimensional model HEC-HMS is described. In the sensitivity analysis of the Flo-2D model, the influences of different parameters were tested - the loss settings, the Manning roughness coefficient, the Froude number, the control parameter TOL and the computational grid size.

Direct runoff was computed with the Flo-2D program via the SCS Curve Number loss method procedure. Flo-2D model was calibrated and validated on measured hydrographs and runoff volume of Glinscica watershed for specific rainfall event by varying input and modeling parameters including the control parameters, the Manning roughness coefficients and the SCS curve numbers. The main part of the work contains a comparison of a two-dimensional rainfall runoff model conducted using Flo-2D model with a one-dimensional model HEC-HMS. Statistical analyses were made with the Root mean square error method - RMSE. The 10-year and 100-year storms were also modeled.

The results have shown that differences in calibrated parameters SCS CN between 1D and 2D model is due to different mathematical algorithms and numerical model. The topographic data turned out to be the main deficiency.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Mojci Šraj in somentorju Tomažu Hojniku za strokovno pomoč pri nastajanju diplomske naloge. Tomažu Hojniku se zahvaljujem tudi, ker mi je omogočil delo s programom Flo-2D in štipendiranje v času študija.

Družini se zahvaljujem, ker so me v času šolanja spodbujali.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Cilji diplomske naloge	2
2	MODELIRANJE HIDROLOŠKEGA SISTEMA Z MATEMATIČNIM MODELOM Flo-2D	3
2.1	Razvoj programa Flo-2D	3
2.2	Opis in delovanje modela Flo-2D	3
2.3	Algoritem računa	5
2.4	Modeliranje hidrološkega sistema - opis posameznih komponent	7
2.4.1	Geometrija.....	8
2.4.2	Manningov koeficient hrapavosti.....	11
2.4.3	Padavine	17
2.4.4	Izgube.....	19
2.4.5	SCS metoda padavinskih izgub.....	23
2.4.6	Nastavitve kontrolnih parametrov modela Flo-2D	26
3	OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA.....	29
3.1	Uvod	29
3.2	Topografija, vegetacija in raba tal	33
3.3	Pedologija	33
3.4	Geologija in podnebje.....	35
3.4.1	Peščeno prodnati zasipi Draveljske doline.....	35
3.4.2	Podnebje.....	35
3.5	Vodni viri in hidrologija	36
3.5.1	Koseški bajer.....	39
4	IZDELAVA MODELA POVRŠINSKEGA ODTOKA S PROGRAMOM Flo-2D	40
4.1	Geometrija	40
4.1.1	Določanje mej porečja	42
4.1.2	Struga Glinščice in Pržanca	43
4.1.3	Koseški bajer.....	43
4.1.4	Manningov koeficient hrapavosti.....	43
4.1.5	Iztok iz območja.....	44

4.2	Hidrologija	45
4.2.1	Izgube	47
4.3	Nastavitve kontrolnih parametrov modela Flo-2D.....	49
4.4	Umerjanje modela	50
4.4.1	Manningov koeficient hrapavosti	51
4.4.2	Koeficient izgub SCS CN.....	51
4.4.3	Urejanje topografije	52
4.4.4	Kontrolni parameter TOL.....	53
5	ANALIZA REZULTATOV	54
5.1	Rezultati modela HEC-HMS.....	54
5.2	Rezultati modela Flo-2D	57
5.2.1	Opis modela in rezultatov za izmerjen dogodek	57
5.2.2	Sintetični histogrami.....	59
5.3	Primerjava in analiza rezultatov	61
6	OBCUTLJIVOST MODELA	64
6.1	Rezultati analize s komentarji	64
6.1.1	Vpliv različnih nastavitev za upoštevanje izgub	64
6.1.2	Vpliv različnih nastavitev za določanje hrapavosti	67
6.1.3	Vpliv nastavitev Froudovega števila za tok v strugi.....	68
6.1.4	Vpliv parametra TOL	69
6.1.5	Vpliv velikosti računske celice.....	71
7	ZAKLJUČKI	74

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrednosti Manningovih koeficientov n_g na prispevni površini (Flo-2D, 2009d).	11
Preglednica 2: Vrednosti Manningovega koeficienta n_g za različne površine (Julien, 2002)..	12
Preglednica 3: Kriterij in pravila za določanje hrapavosti celice (O'Brien, 2009a).....	14
Preglednica 4: Začetne izgube - prestrežene padavine (Prirejeno po: Flo-2D, 2009d).	21
Preglednica 5: Koeficienti CN za izbrane kmetijske, primestne in urbane površine (Prirejeno po: Chow in sod., 1988).	25
Preglednica 6: Hitrost simulacije v odvisnosti od velikosti mrežnega sistema (O'Brien, J. S. 2009c).....	28
Preglednica 7: Šifrant podpovodij na 6. ravni (Šraj, 2000).	37
Preglednica 8: Merske postaje.	37
Preglednica 9: Višine padavin za različne povratne dobe in trajanje padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad (1948 – 2007) (ARSO, 2009).....	38
Preglednica 10: Količine padavin za različne povratne dobe in trajanje padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad (1948 – 2007) (ARSO, 2009).....	39
Preglednica 11: Visoke vode na različnih odsekih Glinščice pri različnih povratnih dobah (Rusjan, 2003).	47
Preglednica 12: Vhodni podatki v HEC-HMS model - SCS metoda.	48
Preglednica 13: Vpliv kontrolnega parametra TOL na volumen odtoka.	53
Preglednica 14: Prikaz rezultatov modela HEC-HMS za posamezna podpovodja Glinščice (Dirnberk, 2009).....	55
Preglednica 15: Izračuni modela HEC-HMS in izmerjene vrednosti rezultatov končnega iztoka ter koeficient RMSE (Dirnberk, 2009).....	55
Preglednica 16: Prikaz izračunanih vrednosti za 10- in 100-letno povratno dobo (Dirnberk, 2009).	56
Preglednica 17: Opis in rezultati modela za zgodovinski padavinski dogodek.....	57
Preglednica 18: Rezultati modelov neviht z 10- in 100- letno povratno dobo.	60
Preglednica 19: Prikaz primerjave izračunanih vrednosti dvodimenzijskega modela Flo-2D in enodimenzijskega modela HEC-HMS ter koeficientov ujemanja RMSE vršnih pretokov.	61
Preglednica 20: Rezultati različnih nastavitvah računa izgub modela Flo-2D.	65

Preglednica 21: Rezultati različnih nastavitvev računa hrapavosti modela Flo-2D.....	67
Preglednica 22: Rezultati simulacije pri različnih nastavitvah parametra TOL modela Flo-2D.	70

KAZALO SLIK

Slika 1: Račun toka v osmih smereh - štiri smeri kompasa so oštevilčene od 1 do 4 in štiri diagonalne smeri so oštevilčene od 5 do 8 (Prirejeno po: O'Brien, 2009c).	5
Slika 2: Pretok čez robove računskih celic (Prirejeno po: O'Brien, 2009d).	7
Slika 3: Pogovorno okno programa GDS za določitev pogojev interpolacije in filtriranja višinskih točk.	9
Slika 4: Prikaz nekaterih fizikalnih procesov simuliranih s Flo-2D modelom (Prirejeno po: Flo-2D, 2009d).	11
Slika 5: Prikaz globinsko spremenljive hrapavosti na prispevni površini (prirejeno po: Sharp, 2008).	14
Slika 6: Prikaz globinsko spremenljive hrapavosti struge (prirejeno po: Sharp, 2008).	16
Slika 7: Osem izbir razporeditve padavin.	17
Slika 8: Tipična 24-urna razporeditev (USDA SCS, 1956).	19
Slika 9: SCS 24-urna razporeditev (USDA SCS, 1956).	19
Slika 10: Pogovorno okno za simulacijo premikajoče se nevihte (Prirejeno po: Flo-2D, 2009d).	19
Slika 11: Prikaz padavinskih izgub pri konstantni intenziteti padavin (Prirejeno po: Hydrology, 2009).	20
Slika 12: Pogovorno okno modela Flo-2D za določitev parametrov infiltracije.	23
Slika 13: Pogovorno okno programa Flo-2D za nastavitve kontrolnih in numeričnih stabilnostnih parametrov.	28
Slika 14: Položaj obravnavanega območja.	30
Slika 15: Reguliran del struge Glinščice, od Biološkega središča navzgor.	31
Slika 16: Prečni prerez struge Glinščice pri Biološkem središču (Škrbec, 2005).	31
Slika 17: Razvrstitev vodnih teles na območju porečja Glinščice glede na stanje hidromorfoloških elementov in prikaz poplavne varnosti (katastrofalne poplave - povratna doba Q50 in več, redke poplave - Q10 do Q20, pogoste poplave - Q2 do Q5) in smeri poplavljanja. Vir: spletna stran MOP, http://www.sigov.si/mop/ , junij 2006.	32
Slika 18: Šifrant padavinskih območij (Šraj, 2000) in linije hidrografskih razvodnic na osnovi reliefnih karakteristik (ARSO).	36
Slika 19: Digitalni model reliefa študijskega območja.	41

Slika 20: Prikaz določitve Manningovih koeficientov hrapavosti.....	44
Slika 21: Položaj merskih postaj.	45
Slika 22: Prikaz razporeditve padavin za postajo Pržanec za dogodek v januarju 2004.....	46
Slika 23: Določitev koeficientov SCS CN.	49
Slika 24: Končne gladine toka [m] na prispevnem območju.	53
Slika 25: Končne gladine toka [m] na prispevnem območju po urejanju topografije.....	53
Slika 26: Površinski odtok na iztoku iz povodja dobljen s SCS metodo padavinskih izgub (Dirnberk, 2009).	55
Slika 27: Skupne padavine in izračunane izgube po SCS metodi in efektivne padavine.....	56
Slika 28: Površinski odtok v prerezu pri Biološkem središču dobljen s SCS metodo padavinskih izgub.	58
Slika 29: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine z 10-letno povratno dobo in 2-urnim trajanjem.	62
Slika 30: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine z 10-letno povratno dobo in 12-urnim trajanjem.	62
Slika 31: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine z 10-letno povratno dobo in 24-urnim trajanjem.	62
Slika 32: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine s 100-letno povratno dobo in 2-urnim trajanjem.....	63
Slika 33: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine s 100-letno povratno dobo in 12-urnim trajanjem.	63
Slika 34: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine s 100-letno povratno dobo in 24-urnim trajanjem.	63
Slika 35: Primerjava maksimalnih pretokov v prerezu BS glede na različne možnosti upoštevanja izgub.	66
Slika 36: Primerjava vpliva koeficienta hrapavosti na maksimalne pretoke v prerezu BS.....	68
Slika 37: Primerjava vpliva Froudovega števila na maksimalne pretoke v prerezu BS.....	69
Slika 38: Primerjava vpliva parametra TOL na obliko hidrograma odtoka v prerezu BS.	70
Slika 39: Vpliv velikosti računske celice na obliko hidrograma odtoka.....	71
Slika 40: Odzivnost modelov na spremembe koeficientov hrapavosti v odvisnosti od velikosti računske celice.....	72

Slika 41: Odzivnost modela z mrežo 50 x 50 m na obliko hidrograma odtoka na padajočem delu..... 73

1 UVOD

Namen modeliranja je napovedovanje dogodkov in njihovih posledic, ugotavljanje vplivov zaradi posegov ali drugih sprememb (zmanjševanje ogroženosti, ranljivosti in škod) ter pridobivanje boljšega vpogleda v naravo procesov. Model prenese realnost v neko uporabno in razumljivo obliko, torej gre za poenostavitev realnega sistema, opis pojava oz. njegovih bistvenih značilnosti, ki nam omogoči razumevanje, razlago, spremembe ali ohranitvene lastnosti, napovedovanje in morda tudi vodenje obravnavanega sistema. Model lahko služi tudi kot nadomestek nekega konkretnega sistema ali opreme. Poudarja tiste učinke gradnikov sistema, ki so pomembni s stališča modeliranja in predstavi naše znanje o sistemu v primerni obliki tudi na drugih medijih (papirju, računalniku).

Fizični modeli pomenijo nekakšno drugačno fizično predstavitev realnih sistemov. Poznamo več vrst fizičnih modelov, lahko so statični, imitacijski ali dinamični (Rothenberg, 1989). Izgradnja fizičnega modela terja mnogo časa, natančnega dela, materialnih stroškov, izvajanje meritev pri poskusih (časovno zamudno), rezultati so zanesljivo poznani le v točkah, kjer smo izvedli meritev. Velik preskok v modeliranju je pomenil razvoj matematičnih modelov, ki so že skoraj v celoti nadomestili dražje fizične modele.

Glede na način, kako zajemamo prostor, v katerem simuliramo pojav poplavnega vala, v osnovi ločimo eno-, dvo- in tridimenzijske modele. Široko se že uporabljajo enodimenzijski, v zadnjem času pa še poseben razmah doživljajo dvo- in tridimenzijski modeli, kar v prvi vrsti pripisemo 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 ene smeri. Povprečenje v eni smeri 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 tridimenzijskih modelih, vrednosti ne povprečimo, razen če matematičnega modela 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 tridimenzijske modele so običajno povprečene vrednosti (DHD modeliranje..., 15.08.2010).

Z razvojem hitrejših računalnikov in večjo ločljivostjo digitalnih modelov reliefa, postajajo modeli računa poplavnega vala zelo podrobni. Pri dvodimenzionalnem modeliranju računa poplavnega vala, je potrebno upoštevati čim bolj natančno poplavno hidrologijo, topografsko ločljivost modela, zadovoljivo razdaljo med prečnimi prerezi struge in omejeno kalibracijo podatkov. Uporabnik mora najti ravnovesje med resolucijo modela, zmogljivostjo računalnika in danimi sredstvi.

Zanesljiv in točen model poplavne ogroženosti zahteva kritičen pregled uporabnosti modela, predpostavk in razpoložljivih podatkovnih baz. Z zmogljivimi računalniki je uporabnost modelov, ki temeljijo na osnovi metode končnih razlik vse večja, vendar sta natančnost in točnost modelov poplavne ogroženosti zaradi pomanjkljivih hidrografskih baz podatkov, še vedno omejeni. Rezultati so lahko le tako natančni, kot je natančno umerjanje modela vhodnih podatkov. Torej, prilagajanje parametrov modela na osnovi upoštevanja fizikalnih osnov ali z matematično optimizacijo, tako da se podatki opazovanj čim bolj skladajo z rezultati modela.

1.1 Cilji diplomske naloge

Glavni cilji te diplomske naloge so izdelati model površinskega odtoka z uporabo komercialnega matematičnega modela Flo-2D, ga umeriti, primerjati z rezultati javno dostopnega 1D modela HEC-HMS in oceniti uporabnost 2D modelov za hidrološko modeliranje. V nalogo je bilo vključeno prispevno območje ljubljanske Glinščice. To območje je bilo predmet večih raziskav (Dirnberk, 2009; Rusjan, 2003; Škrbec, 2005; Štajdohar, 2005), kjer je bil model HEC-HMS že uspešno umerjen.

V modelu Flo-2D so podatki o terenu predstavljeni z digitalnim modelom višin z natančnostjo 12.5 m. Uporabljeni so bili dvoje vrst podatkov o padavinah, in sicer padavine za izmerjen dogodek, ter sintetične padavine z 10- in 100-letno povratno dobo. V nalogi je opravljena primerjava rezultatov in analiza občutljivosti modela Flo-2D.

2 MODELIRANJE HIDROLOŠKEGA SISTEMA Z MATEMATIČNIM MODELOM Flo-2D

2.1 Razvoj programa Flo-2D

Računalniški program je bil razvit v ZDA in je delo avtorja J. S. O'Brien (1989), 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 (1988), ki je bil narejen izključno za račun razširjanja blatnih in drobirskih tokov. Kasneje so na pobudo Zvezne uprave za nezgode - FEMA (ang. *Federal Emergency Management Agency*) razvili program, ki vključuje komponente tako za simulacijo poplavnega vala kot tudi simulacijo blatnih tokov.

Prvotni model MUDFLOW je bil omejen na 250 mrežnih elementov. Zagon 6-urnega hidrograma na XT računalniku je trajal več kot 12 ur (Flo-2D, 2009d). Po 21 letih razvoja, Flo-2D izračuna površinski tok v osmih smereh, poroča o kontinuiteti masnega toka v dvodimenzijski obliki, uporablja shemo variabilnega časovnega koraka, vključuje učinkovit kriterij numerične stabilnosti, ima neomejeno število mrežnih elementov, vključuje komponente za grafično urejanje in ima procesorski program za prikaz rezultatov. V ZDA je program že uradno verificiran in priznan s strani FEMA, ter se uporablja pri raznih študijah. V Evropi ga široko uporabljajo v Avstriji, Švici in Italiji, pri nas pa se vedno bolj uveljavlja (Četina in Krzyk, 2003; Hojnik, 2009, Sodnik, 2009...).

2.2 Opis in delovanje modela Flo-2D

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, z računalniško obdelavo podatkov, ki jih ustvarjajo računalniški algoritmi na osnovi aproksimativne metode končnih razlik in se uporabljajo za številčno reševanje Navier - Stokes enačb. Model simulira napredovanje poplavnega vala po sistemu kvadratnih mrežnih

elementov, s katerimi je predstavljena topografija, hrapavost površine in druge značilnosti, pri pogoju ohranjanja volumna tekočine. Pri hidrološkem modeliranju je model uporaben za simulacijo poplavljanja rek, rečnih dolin, urbanih površin in hidravlično načrtovanje protipoplavnih ukrepov.

Osnovna enačba modela je enačba gibalne količine (kontinuitetna in polna dinamična enačba - kinematični in dinamični val), uporabljena v nekonservativni obliki. S kontinuitetno enačbo je zagotovljena konzervacija volumna, s polno dinamično enačbo pa distribucija poplavnega vala.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (Vh)}{\partial x} = i - S_f, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{g} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{g} \right) = S_o - S_f, \quad (2)$$

kjer je:

h - globina toka tekočine,

V - globinsko povprečena komponenta hitrosti v eni od osmih smeri toka x ,

i - intenziteta preseženih padavin, ki je različna od nič na gladini toka,

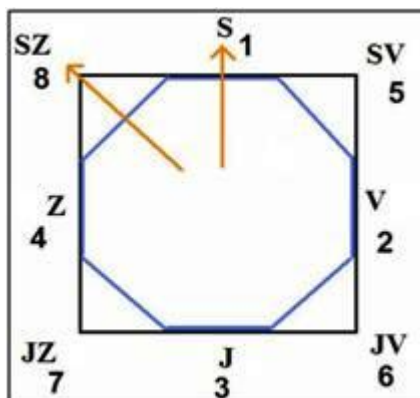
S_f - padec gladine,

S_o - padec dna.

V enačbi (2) nastopa še izraz za gradient tlaka in členi lokalnih pospeškov, ki označujeta, da gre za nestalni tok.

Zgornja enačba predstavlja izračun globinsko povprečenega enodimenzionalnega nestalnega, neenakomernega toka odprtih vodotokov. Na poplavnem območju je uporabljen algoritem večsmerne toka, kjer je vodni tok mogoče zvezno usmeriti v katerokoli smer. V tem primeru so enačbe gibanja prilagojene z računom povprečnih hitrosti toka okoli mej mrežnih elementov za vsako smer posebej (Slika 1). Hitrosti se računajo v osmih smereh (sever, jug, vzhod, zahod in vmesne smeri severovzhod, severozahod, jugozahod in jugovzhod). Račun posamezne hitrosti je po lastnostih enodimenzionalen in rešen neodvisno od ostalih sedmih smeri. Odvodi po prostoru so aproksimirani z metodo končnih razlik, časovni odvodi pa z

eksplicitno shemo drugega reda. Stabilnost te eksplicitne numerične sheme temelji na strogem kriteriju za kontrolo velikosti variabilnega računskega časovnega koraka.



Slika 1: Račun toka v osmih smereh - štiri smeri kompasa so oštevilčene od 1 do 4 in štiri diagonalne smeri so oštevilčene od 5 do 8 (Prirejeno po: O'Brien, 2009c).

2.3 Algoritem računa

Algoritma računa vključuje naslednje korake (O'Brien, 2009d):

- Izračun povprečne geometrije toka, hrapavosti in naklona med sosednjima računskima celicama.
- Globina toka dx za izračun hitrosti skozi rob mrežnega elementa za naslednji časovni korak ($i + 1$) je ocenjena iz predhodnega časovnega koraka i , z uporabo linearne (povprečne) ocene globine med dvema celicama:

(3)

- Prva ocena hitrosti se izračuna z uporabo enačbe difuzijskega vala (preoblikovane dinamične enačbe). Edina neznanka v tej enačbi je hitrost površinskega toka, ki se izračuna za tok po površini, v strugi ali po cesti.
- Predpostavljeno hitrost iz enačbe difuzijskega vala se nato uporabi kot prvo oceno hitrosti za rešitev polne dinamične in kontinuitetne enačbe po Newton - Raphsonovi metodi in izračun prave hitrosti toka.

- Pretok Q čez rob računске celice (Slika 2) se izračuna kot produkt hitrosti in površine toka v določenem prečnem prerezu. Pri računu površinskega toka, je širina toka prilagojena z uporabniško določenim redukcijskim faktorjem širine (WRF - ang. *Width reduction factor*).
- Prirastki pritokov za posamezno računsko celico v določenem časovnem koraku in v vseh osmih smereh (oz. gorvodnih in dolvodnih elementov struge) se seštevajo:

(4)

- Seštevek se razporedi po razpoložljivi površini znotraj mreženega elementa, za določitev prirastka oz. spremembe globine toka:

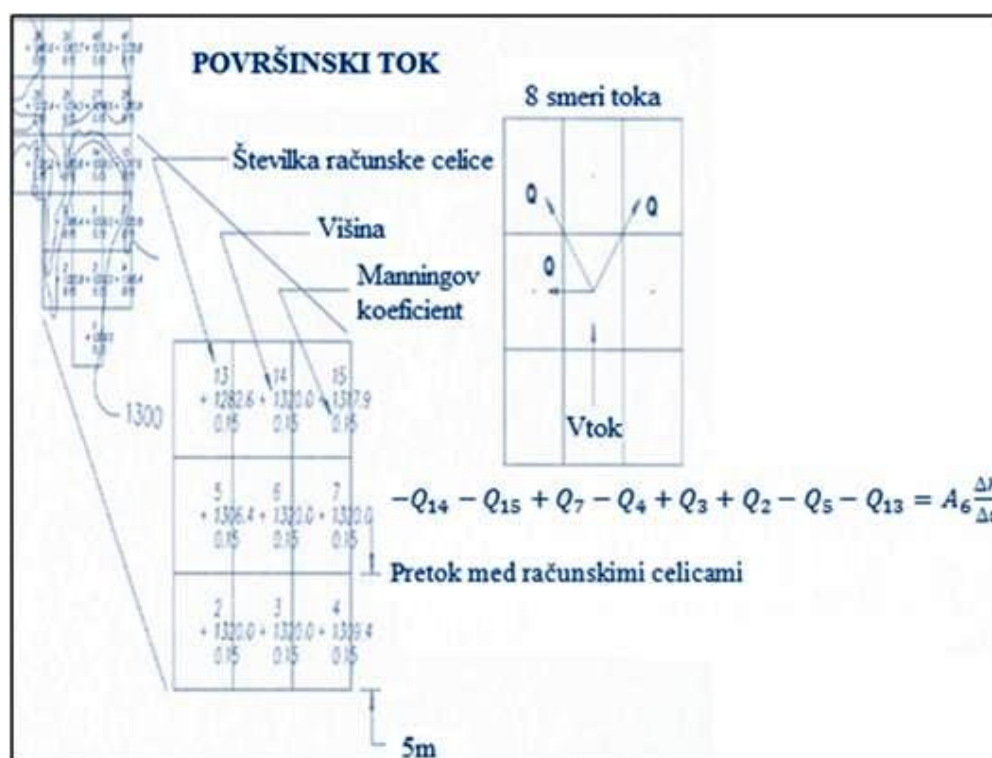
$$\text{---}, \quad (5)$$

kjer je ΔQ_x neto sprememba pretoka na poplavnem območju v osmih smereh za mrežni element v časovnem koraku Δt med trenutkom i in $i + 1$.

- Nato se pred izračunom globine v naslednji celici preveri kriterij numerične stabilnosti. Če je katerikoli kriterij 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 ni presežen eden od stabilnostnih kriterijev.

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 uspelih stabilnosti. Nato se račun ponovno zažene. Ko so vsi kriteriji numerične stabilnosti uspešno izpolnjeni, se časovni korak poveča za nadaljnji račun

napredovanja vala po mrežnem sistemu. Med napredovanjem po mrežnem sistemu v časovnem koraku se vtočnim elementom prišteje pritek, izračunajo se hitrosti toka in pretoki med mrežnimi elementi ter določene so 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 se račun ohranitve volumna. Rezultati so zapisani v izhodnih datotekah ali na zaslonu v uporabniško določenih časovnih intervalih.



Slika 2: Pretok čez robove računskih celic (Prirejeno po: O'Brien, 2009d).

2.4 Modeliranje hidrološkega sistema - opis posameznih komponent

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 (prikaz hidrograma).

Za hidrološko analizo s programom Flo-2D so pomembni podatki o geometriji modeliranega območja, padavinah in infiltraciji vode ter nastavitve kontrolnih parametrov modela.

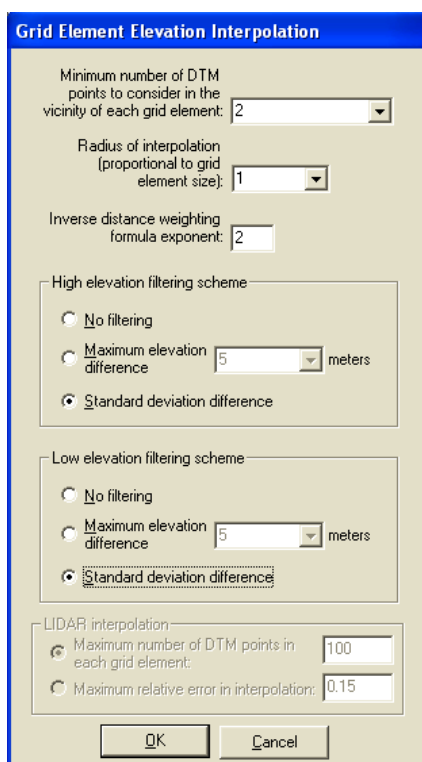
2.4.1 Geometrija

Program omogoča izdelavo modela na podlagi več vrst geometrije, za ozadje pa uporabo orto foto posnetkov. Podatke o terenu lahko prikažemo z digitalnimi modeli reliefa, datoteke v ASCII obliki (*.pts) ali direktorijem Shape (*.shp). Z digitalnimi modeli višin (DMV) je predstavljena oblikovanost zemeljskega površja, ki je opisana z zveznimi ploskvami določenih z množico višin, izmerjenih glede na srednji nivo morja. Digitalni modeli višin pokrivajo celotno Slovenijo in so dosegljivi na Geodetski upravi RS.

DMV 5 je bil izdelan z avtomatskim stereoizvrednotenjem aeroposnetkov iz leta 2006, tam kjer stereoizvrednotenje ni bilo možno pa s pomočjo korelacije in iz raznih geodetskih podatkov. Na zaraščenih območjih so bili uporabljeni starejši posnetki in DMV 12.5. DMV 12.5 in DMV 25 sta bila izdelana iz raznih geodetskih podatkov. Uporabljena je bila metoda utežnega seštevanja virov z geomorfološki popravki. Prednosti te metode so visoka ločljivost, vertikalna natančnost, geomorfološka kakovost (spletna stran GURS). DMV 12.5 ni nastal iz DMV 25, temveč je samostojen produkt različnih virov višinskih podatkov. Različni višinski modeli so različne kakovosti.

Podobnikar (2008) je primerjal kakovosti različnih DMV -jev in ugotovil, da je statistično (numerično) - če upoštevamo višinsko kakovost podatkov za vso Slovenijo boljši DMV 5, geomorfološko - če upoštevamo večja območja je DMV 5 slabši, še posebno od DMVja 25, in vsebuje več grobih napak, DMV 5 je v primerjavi z DMV 12.5 izrazito bolj nehomogen. Podatki DMVja 12.5 so primerni za lokalne analize na območjih, kjer je kakovost večja, npr. na območju Ljubljane, manj pa v hribovitih območjih. DMV 25 je primernejši za analize na ravni regij in za zahtevnejše analize za celotno državo. DMV 5 je neprimeren za večino prostorskih analiz in vizualizacij, uporaben je le v primerih, ko geomorfološke značilnosti niso pomembne.

Ko so točke višin vnesene v program, je potrebno podlogo prekriti z računsko mrežo poljubne velikosti. Vsaka celica ima določeno velikost, vrednosti (zaporedno številko, višino in Manningov koeficient) in druge fizične lastnosti (objekt, cesta, nasip, kanal, hidravlični objekt...). Na slednji čim natančneje določimo območje računa gibanja vode (razvodnice). Mrežo je potrebno tudi višinsko interpolirati, kar pomeni, da v pogovorno okno programa (Slika 3) vnesemo pogoje interpolacije naklonov celic mreže (obseg upoštevanih višinskih točk, filtriranje višin - brez filtriranja, upoštevanje največje razlike med višinskimi točkami ali standardna deviacija vseh višinskih točk).



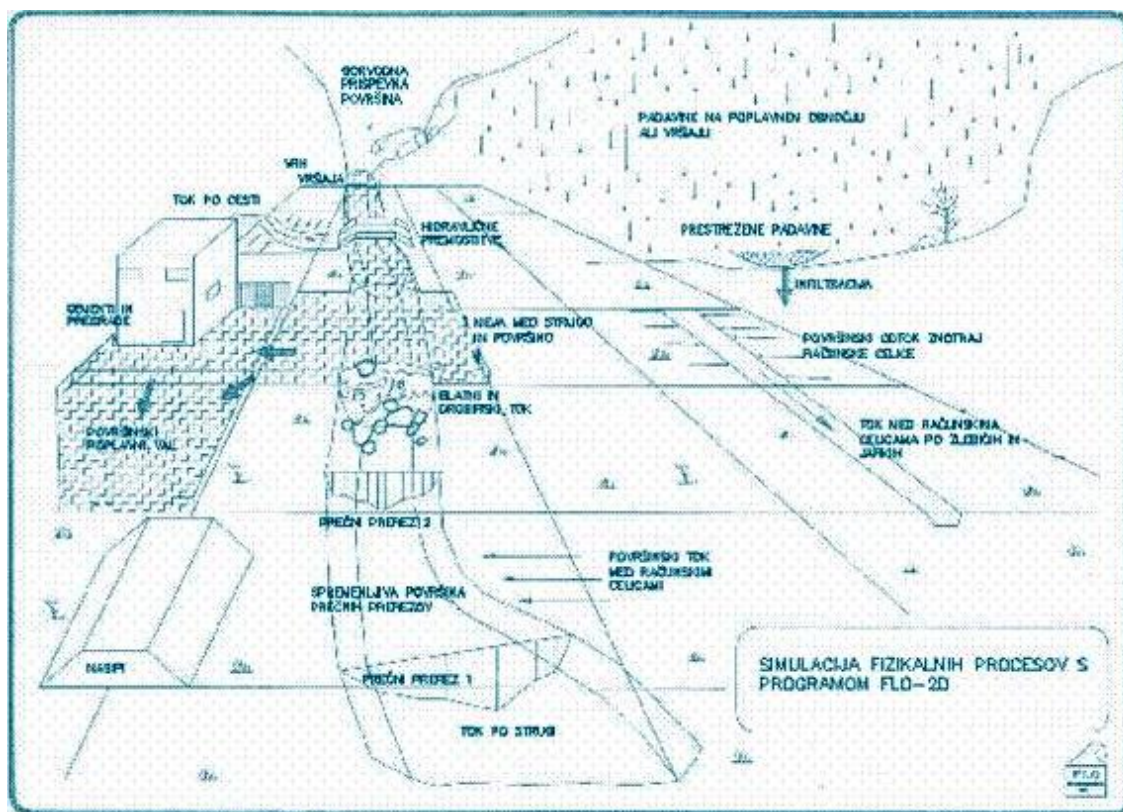
Slika 3: Pogovorno okno programa GDS za določitev pogojev interpolacije in filtriranja višinskih točk.

Za pomoč pri izbiri velikosti mrežnega elementa nam je lahko v pomoč naslednji kriterij: Q_{peak} - ocenjeni vršni pretok visokih voda, deljen s površino mrežnega elementa A_{surf} , je v mejah:

Bližje kot je razmerje $Q_{\text{peak}} / A_{\text{surf}}$ $0.03 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$, hitrejši bo izračun. Če je razmerje $Q_{\text{peak}} / A_{\text{surf}}$ večje od $0.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$, model računa počasneje (O'Brien, 2009c).

Ko je teren pripravljen, vnesemo vhodni hidrogram in / ali padavine, spodnji robni pogoj, ki prepreči razliv toka izven računskega območja in prostorsko umestimo druge fizične komponente, ki vplivajo na napredovanje poplavnega vala po prispevni površini. V simulacijo lahko vključimo potek strug, komponente za tok čez pragove, zmanjšanje poplavnega vala, vpliv zadrževanja in vdora tujih vod. Ima možnost, da v urbanih območjih v račun dodamo objekte, ki zmanjšajo zadrževanje in povzročajo motnje v toku. Komponenta za nasipe je uporabna za načrtovanje vpliva na poplavno varnost (Slika 4).

Tok po strugi je enodimenzionalen z naravno, pravokotno ali trapezno obliko korita. Modeliranje površinskih tokov po prispevni površini je dvodimenzionalno, kot ploskovni tok in kot tudi tok po več kanalčkih (žlebičih in jarkih). Tok po poplavni ravnici se izračuna, ko rečni tok preseže prepustnost osnovne struge. Kombiniran račun omogoča izračun izmenjave toka med poplavno ravnico in strugo (O'Brien in Fullerton, 1999). Pri simulacije 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.



Slika 4: Prikaz nekaterih fizikalnih procesov simuliranih s Flo-2D modelom (Prirejeno po: Flo-2D, 2009d).

2.4.2 Manningov koeficient hrapavosti

Vpliv trenja in izgube energije toka zajema Manningov koeficient hrapavosti. Vrednosti koeficienta vplivajo na globine toka, hitrosti toka in na velikost preplavljene površine. Manjši koeficienti pomenijo večje hitrosti in manjše globine toka in obratno. V preglednicah 1 in 2 so podane predlagane vrednosti koeficienta hrapavosti za različne površine.

Preglednica 1: Vrednosti Manningovih koeficientov n_g na prispevni površini (Flo-2D, 2009d).

Površina	Vrednost [$\text{ms}^{-1/3}$]
Gosta ruša	0.17 - 0.08
Gosta trava	0.17 - 0.48
Grmovje in gozdna podrast	0.30 - 0.40
Povprečna travnata površina	0.20 - 0.40

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 1

Slabo zaraščena travnata površina	0.20 - 0.30
Kratka trava	0.10 - 0.20
Redka vegetacija	0.05 - 0.13
Površine prekrите z ostanki drobirja	
0% pokritost	0.09 - 0.34
20% pokritost	0.05 - 0.25
Polja (odvisno od vrste posevka)	0.008 - 0.47
Odrpte površine z drobirjem	0.10 - 0.20
Neobdelana polja	0.08 - 0.12
Odrpte površine brez ostankov drobirja	0.04 - 0.10
Asfalt in beton	0.02 - 0.05

Preglednica 2: Vrednosti Manningovega koeficienta n_g za različne površine (Julien, 2002).

Površina	Vrednost [$\text{ms}^{-1/3}$]
Beton, asfalt	0.01 - 0.013
Pesek	0.01 - 0.016
Prod	0.12 - 0.03
Redka vegetacija	0.053 - 0.13
Nizka travnata vegetacija	0.10 - 0.20
Okrasna zelenica	0.17 - 0.48
Cesta	0.013 - 0.02
Gozd	0.15 - 0.25
Njiva	0.42 - 0.58
Travnik	0.03 - 0.035
Urbane površine	0.05
Naravna vegetacija	0.10

Hrapavost prispevne površine umerjamo z določitvijo koeficienta hrapavosti prispevne površine. Določimo jo 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 0.0 in 0.4. Namen te funkcije je izboljšati čas potovanja vala po mrežnem sistemu (O'Brien, J. S., 2009a). Za preplavljene celice z globino toka večjo od 0.6 m veljajo uporabniško določeni koeficienti hrapavosti.

Za izboljšanje 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:

$$\text{—————} \tag{7}$$

kjer je:

n_b - hrapavost pri plitvem toku,

globina - globina toka,

d_{max} - globina toka pri poplavljeni hrapavosti elementov in vegetacije (privzeta vrednost v programu, enaka 1 m).

Z enačbo (7) 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 je 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 večja za 1.31, napram uporabniško določeni hrapavosti pri globini toka 1 m. S funkcijo ROUGHADJ lahko znižamo morebitne visoke vrednosti Froudovega števila.

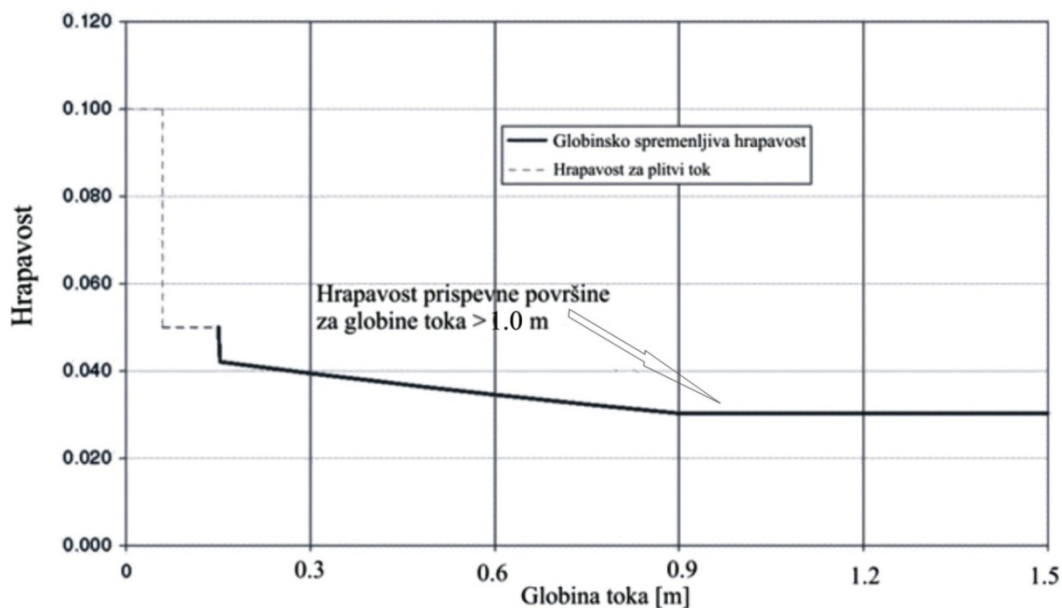
S sočasno uporabo funkcij za uravnavanje hrapavosti, tj. za plitvi tok in za globinsko spremenljivo hrapavost se račun za vsako računsko celico izvaja na način, ki je prikazan v preglednici 3.

Preglednica 3: Kriterij in pravila za določanje hrapavosti celice (O'Brien, 2009a).

$0 < \text{globina toka [m]} < 0.06$	$n = \text{SHALLOWN}$ (vrednost hrapavosti za plitvi tok)
$0.06 < \text{globina toka [m]} < 0.15$	$n = \text{SHALLOWN} / 2$
$0.15 < \text{globina toka [m]} < 1$	$n = n_b * 1.5 * e^{-(0.4 \cdot \text{globina} / d_{\text{max}})}$
$\text{globina toka [m]} > 1$	$n = n$ (vrednost hrapavosti določene v FPLAIN.DAT)

Na sliki 5 je grafična predstavitev na kakšen način Flo-2D definira hrapavost na prispevni površini. Za izbran primer veljajo naslednje nastavitve parametrov (Sharp, 2008):

- globalna vrednost hrapavosti za plitvi tok - SHALLOWN je 0.10;
- funkcija za račun globinsko spremenljive hrapavosti je vključena;
- uporabniško določena hrapavost prispevne površine je 0.030.



Slika 5: Prikaz globinsko spremenljive hrapavosti na prispevni površini (prirejeno po: Sharp, 2008).

Posledica pravil za račun globinsko povprečne hrapavosti navedenih v preglednici 3 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 5) (Sharp, 2008).

Hrapavost struge umerjamo z določitvijo koeficienta n_d za vsako celice struge posebej v datoteki CHAN.DAT, z omejevanjem Froudovega števila in / ali s spreminjanje 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:

$$\text{—————} \tag{8}$$

kjer je:

n_b - hrapavost struge pri strugotvorni globini,

globina - globina toka,

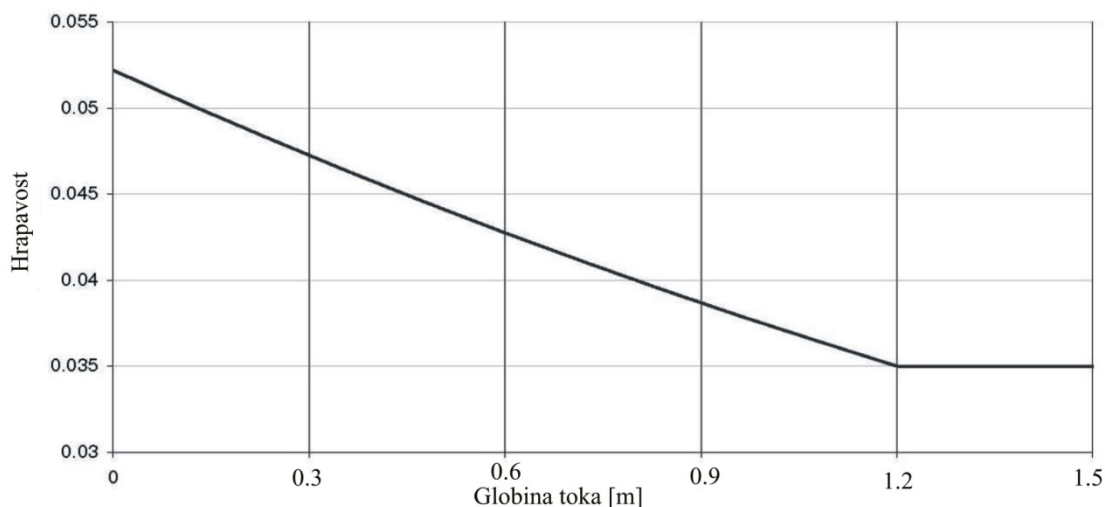
d_{max} - globina polne struge (strugotvorna globina),

b - uporabniško določene spremembe koeficienta hrapavosti [0 - 1.2].

(9)

Z enačbo (8) 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 hrapavost 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 v primeru ko je globina toka v strugi 20 % zapoljenosti korita in je vrednost koeficienta b nastavljena na 0.44, bo hidravlični Manningov koeficient hrapavosti 1.4-krat višji od predpisanega za strugotvorni tok. Z določitvijo vrednosti ROUGHADJ lahko vplivamo na zmanjšanje Froudovega števila.

Slika 6 prikazuje, na kakšen način je z enačbo (8) v programu Flo-2D definirano razmerje hrapavosti struge pri nastavitvah uporabniško določene hrapavosti 0.035 in strugotvorni globini 1.2 m (Sharp, 2008).



Slika 6: Prikaz globinsko spremenljive hrapavosti struge (prirejeno po: 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 toka in odpor toku vode (O'Brien, 2009c). Froudovo število je določeno z enačbo:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}, \quad (10)$$

kjer je:

F_r - Froudovo število [-],

v - ocenjena hitrost [m/s],

g - težni pospešek [m/s^2],

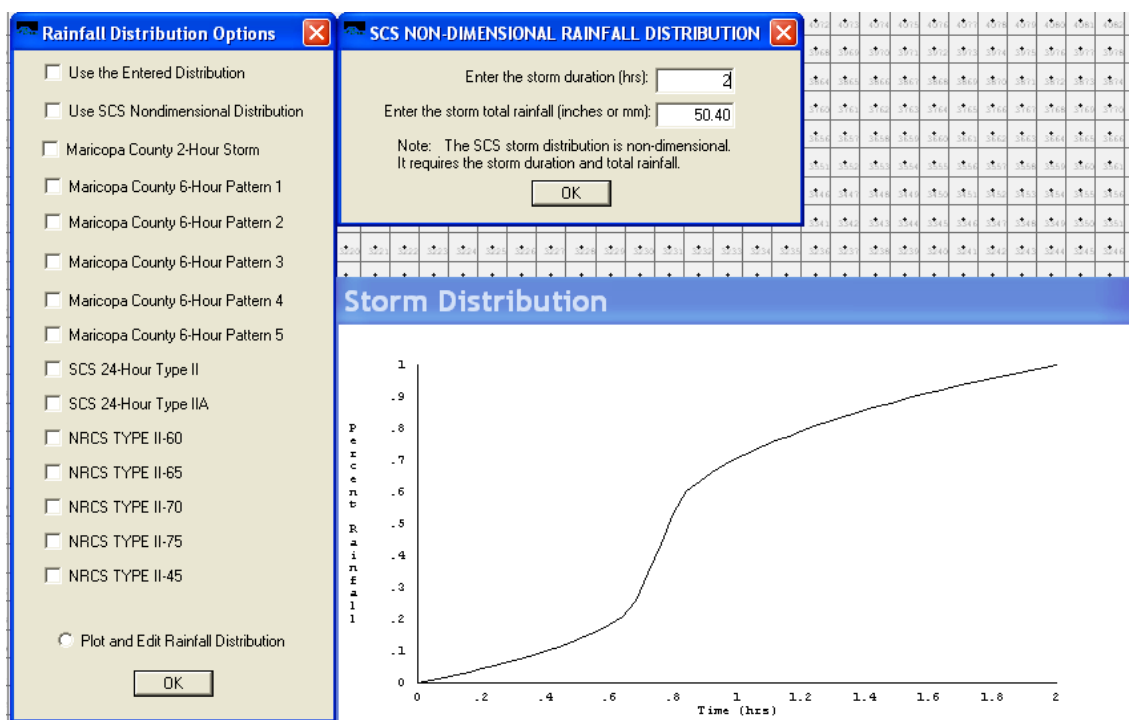
h - gladina vode pri strugotvorni gladini [m].

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 *fpplain.rgh*. Po končani simulaciji te končne vrednosti koeficientov lahko nadomestimo s predpostavljenimi in ponovno zaženemo račun, vse dokler ne dosežemo zadovoljivega ujemanja vrhov merjenega in izračunanega hidrograma odtoka.

2.4.3 Padavine

Histogrami padavin so lahko posneti po izmerjenem dogodku ali pa so sintetični. Sintetični histogrami padavin so dobljeni na podlagi statistične analize padavinskih dogodkov za čim daljše obdobje meritev. Uporabljamo jih za izračun projektnih nalivov določene povratne dobe, analizo poplav, načrtovanje, določanje poplavnih linij ipd. (Dirnberk in Šraj, 2010), ko nimamo na voljo meritev padavin ali pa so le-te prekratke. Sintetični histogrami padavin določene povratne dobe so časovno porazdeljeni po vzorcu, ki ga ponavadi določimo na podlagi krivulj intenziteta - trajanje - pogostost (ang. *intensity - duration - frequency curves*).

V program Flo-2D (Slika 7) je kodiranih osem razporeditev padavin, vključno z obstoječo razporeditvijo vnesenih padavin iz datoteke RAIN.DAT. Ostale razporeditve so SCS brezdimezijska razporeditev, SCS 24-urna porazdelitev tipa II in II A, FCDMC 2 (ang. *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.



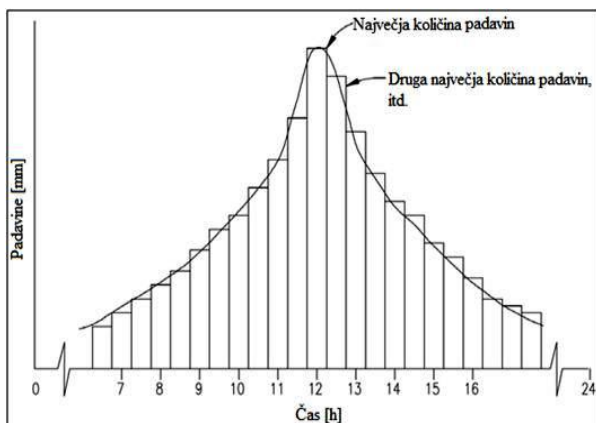
Slika 7: Osem izbir razporeditve padavin.

V nalogi sem uporabila izbiro SCS razporeditev padavin, ki je v nadaljevanju podrobneje opisana.

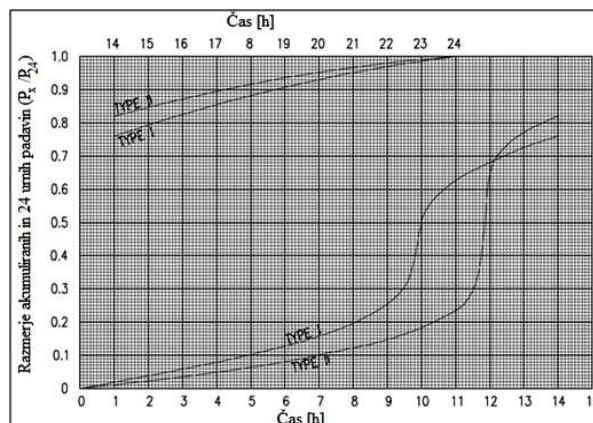
Agencija ameriškega ministrstva za kmetijstvo (SCS) je izdelala SCS 24-urne sintetične razporeditve neviht z uporabo podatkov o padavinah iz krivulj intenziteta - trajanje - pogostost, na osnovi zgodovinskih podatkov o padavinah objavljenih v državnih padavinskih atlasih Meteorološkega zavoda ZDA. V atlasih so izdelani opisi za območja manjša od 1036 km², za nevihte ki trajajo do 24 ur in s povratno dobo od 1 do 100 let (Chow in sod., 1988). Z analizo podatkov so izdelali štiri razrede regionalnih razporeditev padavin. Tipa I in IA se uporabljata na naslednjih območjih - Havaji, Aljaska, obala Sierra Nevade in Cascada Mountains v Kaliforniji, Washingtona ter Oregon. Razporeditev Tip-a III se uporablja za Mehiški zaliv in obalni del Atlantika, kjer tropske nevihte lahko povzročijo 24 urne nalive in Tip II za preostali del ZDA. SCS 24-urne razporeditve so izdelali na osnovi padavin dolgih od 30 minut do 24 ur. Na podlagi podatkov in s pomočjo linearne interpolacije logaritemskih vrednosti debelin vodne plasti ter trajanja tvori histogram tako, da je njegova največja vrednost na sredini trajanja naliva, naslednja vrednost je pred največjo, tretja sledi največji, četrta je pred drugo največjo itd. v 30 minutnih časovnih intervalih dokler najmanjši prirastek zapolni začetka in konca 24 urnih padavin (Hydrology, 2009) (Slika 8). V metodi so zajete vse mejne intenzitete znotraj 24 ur. Razporeditve so zato primerne za modeliranje padavin in odtokov iz majhnih in velikih povodij pri poljubni količini padavin. Slika 9 prikazuje SCS 24 urno porazdelitev, ki je diagram razmerja akumuliranih in 24-urnih padavin v odvisnosti od časa v urah. Največja intenziteta za razporeditev padavin Tipa II je dosežena med časom $t = 11.5$ in $t = 12.5$ h.

Agencija ameriškega ministrstva za kmetijstvo - SCS je prav tako razvila 6-urno brezdimenzijsko razporeditev padavin. Konica 6-urne razporeditve ni tako strmo naraščajoča kot pri 24-urnih razporeditvah. Tip II so kasneje razširili v družino krivulj Tip II-x, kjer x predstavlja delež 24 urnih padavin, ki pade v uri z največjo intenziteto (Design event, 2010). Tip II-60 pomeni, da je 60 % deleža akumuliranih in 24-urnih padavin (P/P-24) bilo doseženih v 6-ih urah.

Za regije znotraj ZDA so te porazdelitve določili različni avtorji, za regije izven ZDA, pa je potrebno določiti, kateri tip porazdelitve padavin najbolj ustreza določeni regiji, količino padavin pa odčitamo iz lokalnih padavinskih kart.

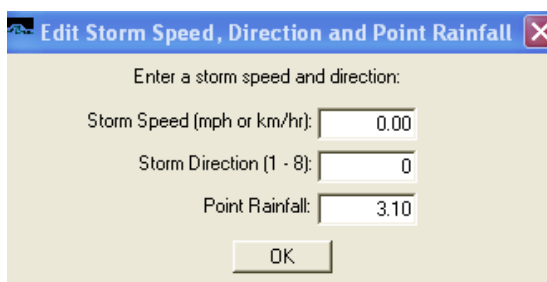


Slika 8: Tipična 24-urna razporeditev (USDA SCS, 1956).



Slika 9: SCS 24-urna razporeditev (USDA SCS, 1956).

Program Flo-2D omogoča tudi vnos poplavnih hidrogramov na različne lokacije. Vstopni hidrogram lahko pozicioniramo kjerkoli na prispevnem območju ali v strugo. Simuliramo lahko tudi premikajoče se nevihte (Slika 10), tako da določimo hitrost, smer in količino padavin.



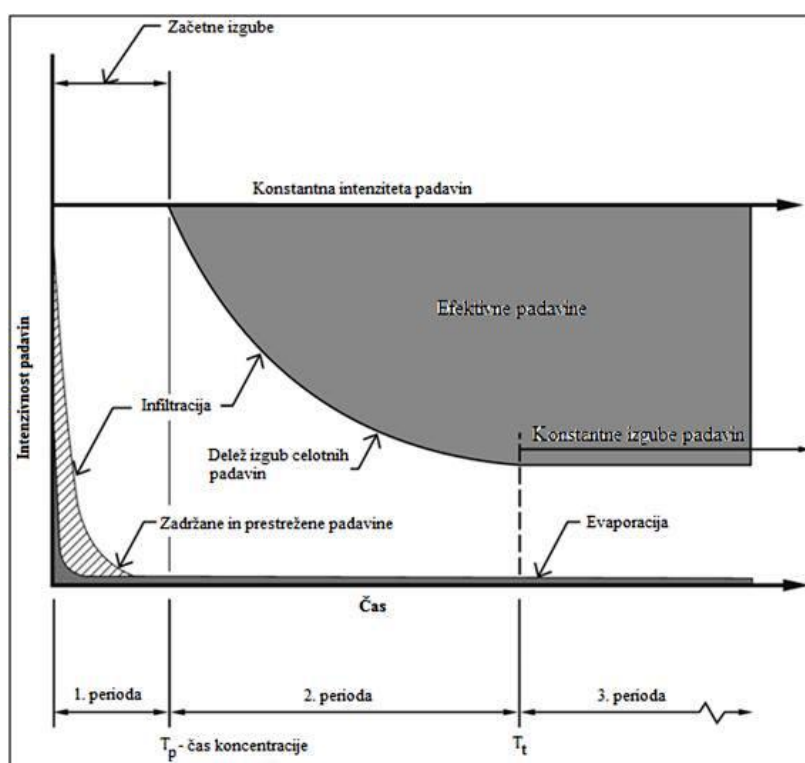
Slika 10: Pogovorno okno za simulacijo premikajoče se nevihte (Prirejeno po: Flo-2D, 2009d).

2.4.4 Izgube

Efektivne padavine predstavljajo tisti del celotne količine padavin, ki odteče neposredno s prispevne površine kot površinski odtok. Celotna količina padavin je enaka vsoti efektivnih

padavin, infiltriranih padavin, začetnih izgub zaradi topografije, prestreženih padavin, ki jih zadrži rastlinski pokrov in izhlapelih padavin iz zemeljskega površja. Rezultat integracije učinkovitih padavin po celotni prispevni površini je volumen odtoka. Časovna porazdelitev učinkovitih padavin in hidravlika odtoka pa določata vršni pretok.

Na sliki 11 je shematski prikaz padavinskih izgub pri konstantni intenziteti padavin. V odvisnosti od temperature zemljine je na začetku evaporacija zelo intenzivna in se hitro zmanjša na nizko konstantno stopnjo, ki ima zanemarljiv vpliv na poplavni odtok s povodja. Količina prestreženih padavin se spreminja v odvisnosti od vrste vegetacije, gostote vegetacije in kapacitete krošenj. Največji delež izgub predstavljajo padavine zadržane v kotanjah in infiltracija padavin.



Slika 11: Prikaz padavinskih izgub pri konstantni intenziteti padavin (Prirejeno po: Hydrology, 2009).

V prvi periodi imamo t.i. začetne izgube, ko še ni odtoka, te so odvisne od skladiščenja padavin v depresijah, prestrežanja, stopnje evaparacije ter začetne infiltracijske sposobnosti tal. Te padavine ne prispevajo k površinskemu odtoku in jih imenujemo začetne izgube. Čas

med začetkom padavin in koncem prve periode, ko se začne površinski odtok imenujemo čas koncentracije - T_p . Za drugo periodo je značilna manjša stopnja infiltracije, izgube zaradi ostalih dejavnikov so zanemarljive. V tretji periodi, ko padavine trajajo dovolj časa in je zemljina že nasičena, se vzpostavi ravnovesno stanje (f_c). V tej periodi se upoštevajo samo izgube, ki so posledica infiltracije in so zelo majhne (Slika 11). V splošnem infiltracija praviloma predstavlja največji delež izgub (Chow in sod., 1988).

Flo-2D model omogoča simulacijo padavinskih izgub - začetnih izgub zaradi topografije, infiltracije in izhlapevanja.

Depresijske akumulacije predstavljajo začetne izgube padavin, ki so upoštevane na začetku odtoka in jih ocenimo s pomočjo preglednice 4. Pretežen del začetnih izgub predstavljajo izgube zaradi topografije - skladiščenje vode v depresijah, poleg tega je za nastanek površinskega toka potrebna neka minimalna debelina padavin. Preden se začne odtok, je potrebna neka višina zadržane vode na prispevni površini, ki je manjša ali enaka maksimalnemu potencialnemu zadrževanju. Ta del padavin imenujemo začetne izgube pred zadrževanjem in ne prispevajo k površinskemu odtoku (Chow in sod., 1988).

Preglednica 4: Začetne izgube - prestrežene padavine (Prirejeno po: Flo-2D, 2009d).

Začetne izgube	
Zemljina	Izgube [mm]
Naravna območja ¹	
Puščave	8.89
Hribovite puščave (hillslopes sonoran desert)	3.81
Gore z vegetacijo	6.35
Urbana območja ¹	
Trate	5.08
Puščavska krajina	2.54
Pločniki	1.27
Kmetijska zemljišča in pašniki	12.70
Iglavci ²	0.25 - 9.14

... se nadaljuje

¹ Maricopa County Drainage Design Manual, 1992

² W.T. Fullerton, Masters Thesis, CSU, 1983

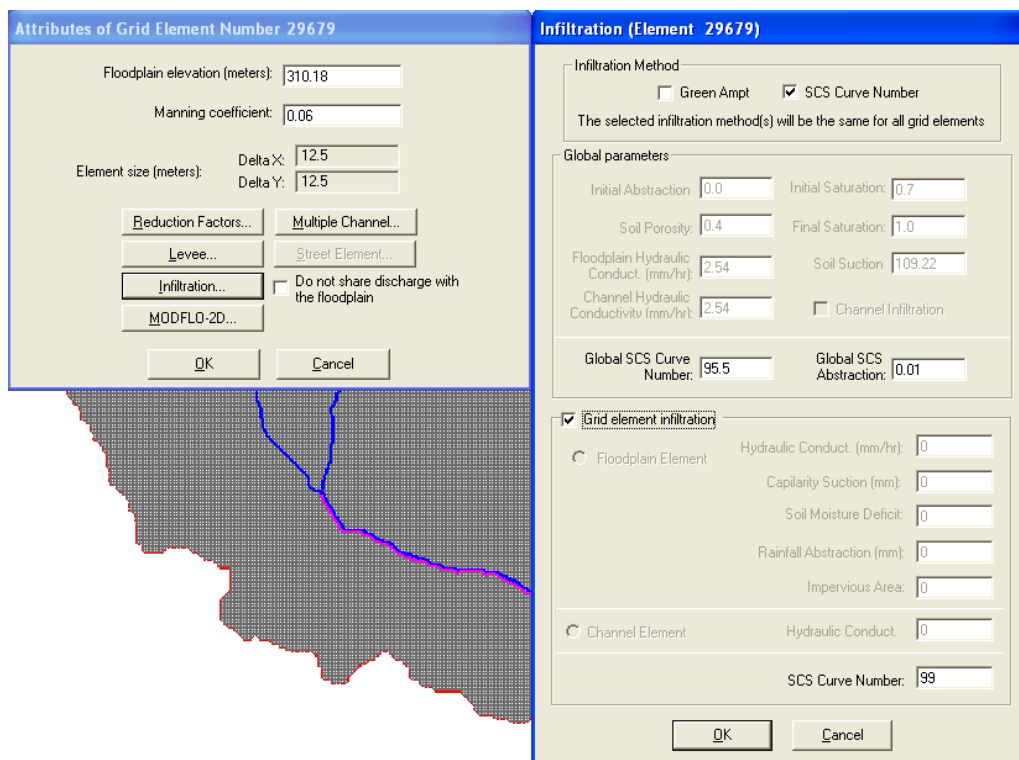
... nadaljevanje Preglednice 4

Listavci ²	0.03 - 2.03
Grmičevje ²	0.25 - 2.03
Travniki ²	1.02 - 1.52
Gozdna tla ²	0.51 - 11.18

Nato se izračunajo infiltracijske izgube. Za izračun padavinskih izgub ima Flo-2D možnost uporabe SCS modela padavinskih izgub, modela Greena in Ampta ali kombinacijo obeh (Slika 12). Odvečne padavine so v vsaki računski celici transformirane v odtok s pomočjo osnovnih enačb (kontinuitetna in dinamična enačba) in z ohranjanjem prostornine tekočine. Za reševanje sistema dveh enačb je uporabljena centralna numerična shema končnih razlik. Za izračun toka po strugi in toka po ulicah se uporablja poenostavljena verzija kinematičnih enačb toka.

Infiltracija je proces toka vode iz površine tal v zemljino. Količina infiltriranih padavin je odvisna od profila zemljine, pokritosti oziroma rabe tal, tipa zemljine, odvisna od poroznosti in hidravlične prevodnosti, trenutne vsebnosti vlage v zemljini in nagiba. Infiltracija je zelo kompleksen proces, zaradi velike prostorske in časovne spremenljivosti in že na manjših površinah ga lahko samo približno opišemo z matematičnimi enačbami.

Enačba modela Greena in Ampta zahteva oceno hidravlične prevodnosti, efektivne poroznosti (celotna poroznost minus rezidualna zasičenost), začetne vlažnosti zemljišča in začetnega gradienta kapilarnega potenciala. Vsi parametri imajo ustrezne fizikalne osnove. Infiltracija se izračuna za vsak časovni korak, v katerem pada dež. SCS model padavinskih izgub oceni presežek padavin kot funkcijo celotnih padavin, pokrovnosti tal, rabe tal in vlažnosti tal.



Slika 12: Pogovorno okno modela Flo-2D za določitev parametrov infiltracije.

2.4.5 SCS metoda padavinskih izgub

SCS metoda je preprosta metoda za izračun infiltracijskih izgub. Je funkcija celotne količine padavin in empiričnega koeficienta CN. Vrednost koeficienta CN sega med 1 in 100. Padavinske izgube so odvisne od hidrološkega tipa zemljine, rabe in obdelave tal, pokrovnosti tal in predhodne vlažnosti zemljine. Metoda je bila razvita na podatkih o 24-urnih hidrogrameh, dobljenih na blagih pobočjih kmetijskih povodjih na vzhodu ZDA. Koeficient CN je bil določen na obsežnih območjih urbanih površin, kmetijskih površin in polsušnih območjih. SCS metoda v računu ne upošteva sprememb intenzitete padavin v prostoru. Razvita je bila za napoved odtoka padavin iz prispevnih območij, za katere ni na voljo meritev o padavinah ali pa so meritve pomanjkljive (O'Brien, 2009d). Vhodne parametre lahko vnesemo s pomočjo komponente GDS grafično, če želimo upoštevati prostorsko spremenljivost padavin in odtoka. Grafične podatke z atributnimi tabelami o pokrovnosti tal in lastnostih zemljine lahko uporabimo za interpolacijo koeficienta CN med mrežnimi elementi.

Model izračuna infiltracijo padavin v času t po enačbi:

$$\text{---} \quad (11)$$

kjer je:

$i(t)$ - porast padavin v času t (razlika med akumuliranimi padavinami na koncu in na začetku časovnega intervala t) [mm/h],

$F(t)$ - kumulativna infiltracija [mm] za mrežni element,

S - primanjkljaj vlage [mm].

Primanjkljaj vlage ali maksimalno potencialno zadrževanje se izračuna po enačbi:

$$\text{---}, \quad (12)$$

kjer je CN brezdimenzijski koeficient CN.

Začetne izgube (I_a) so podane z izrazom:

$$=0.2*S \quad (13)$$

Pri tem je potrebno omeniti, da je izračun začetnih izgub pri možnosti določanja prostorsko spremenljive infiltracije z uporabo različnih koeficientov CN, določenih s poligoni glede na rabo tal, vgrajen v program oz. 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 0.0 mm, pa se te izračunajo samodejno po enačbi (13) (Slika 12).

Skupni, povprečni koeficient CN se izračuna po enačbi:

$$\text{---} \quad (14)$$

kjer je:

- CN - skupni, povprečni koeficient CN,

CN_i - vrednost koeficienta CN za posamezno območje rabe,

A_i - pripadajoča površina enotnega koeficienta CN_i.

Koeficiente CN je tabelirala agencija ameriškega ministrstva za kmetijstvo SCS na osnovi pedologije in rabe tal (Chow in sod., 1988). Definirali so štiri skupine zemljin:

- Skupina A: pesek, globoke rečne naplavine, dobro drenirane zemljine;
- Skupina B: plitve rečne naplavine, peščena ilovica;
- Skupina C: glinena ilovica, plitva peščena ilovica, zemljine z nizko vsebnostjo organskih snovi in zemljine z običajno visoko vsebnostjo gline;
- Skupina D: zemljine z visoko gladino podzemne vode, z glinastim slojem ali neprepustnim slojem na površini ali tik pod površino in zaslanjena zemljišča.

Vrednosti CN za različne rabe tal in vrste tal so podane v Preglednica 5.

Preglednica 5: Koeficienti CN za izbrane kmetijske, primestne in urbane površine (Prirejeno po: Chow in sod., 1988).

Opis rabe tal	Hidrološka razvrstitev zemljin			
	A	B	C	D
Obdelovalna zemljišča ³ : naravna negovana	72	81	88	91
	62	71	78	81
Pašnik ali prerija: slabi pogoji dobri pogoji	68	79	86	89
	39	61	74	80
Travniki: dobri pogoji (košen)	30	58	71	78
Gozd: tanko debelna drevesa, slaba pokritost, brez podrasti dobra pokritost ⁴	45	66	77	83
	25	55	70	77
Odrpte površine, trate, parki, golf igrišča, pokopališča, itd. dobri pogoji: najmanj 75 % površine pokrite s travo povprečni pogoji: med 50 % in 75 % pokritost s travo	39	61	74	80
	49	69	79	84

se nadaljuje ...

¹Podrobnejši opis uporabe koeficienta CN na kmetijskih zemljiščih v SoilConservationService, 1972, pogl. 10

⁴Dobra pokritost ščiti odejo prsti z zarastjo, listjem, grmičevjem.

... nadaljevanje Preglednice 5

Komerzialna in poslovna območja (85 % neprepustnih površin)		89	92	94	95
Industrijska območja (72 % neprepustnih površin)		81	88	91	93
Stanovanjske površine ⁵					
Povprečna velikost parcele	Povp. % neprep. površin ⁶				
do 500 m ²	65	77	85	90	92
1000 m ²	38	61	75	83	87
1300 m ²	30	57	72	81	86
2000 m ²	25	54	70	80	85
4000 m ²	20	51	68	79	84
Tlakovana parkirišča, strehe, dovozne poti, itd. ⁷		98	98	98	98
Ulice in ceste:					
tlakovane z robniki in kanaliziranimi odtoki		98	98	98	98
makadamske		76	85	89	91
neobdelane		72	82	87	89

Program Flo-2D začne račun poplavnega vala ko so depresije zapolnjene z vodo in je debelina vodne plasti večja od TOL. Vrednost TOL je določena v datoteki TOLER.DAT. Začetne izgube I_a največkrat (program HEC-HMS) zajemajo vodo, ki se nabere v depresijah, preden se začne površinski odtok, pri programu Flo-2D pa so te začetne izgube vključene v komponenti TOL, katere vrednost se giblje med 0.01 m in 0.03 ter z digitalnim modelom višin. Pri ocenjevanju izgub je potrebno upoštevati vrednost parametra površinskega zadrževanja TOL (najmanjša globina, ki jo model še modelira oz. debelina vodne plasti, ki je potrebna za račun poplavnega vala).

2.4.6 Nastavitve kontrolnih parametrov modela Flo-2D

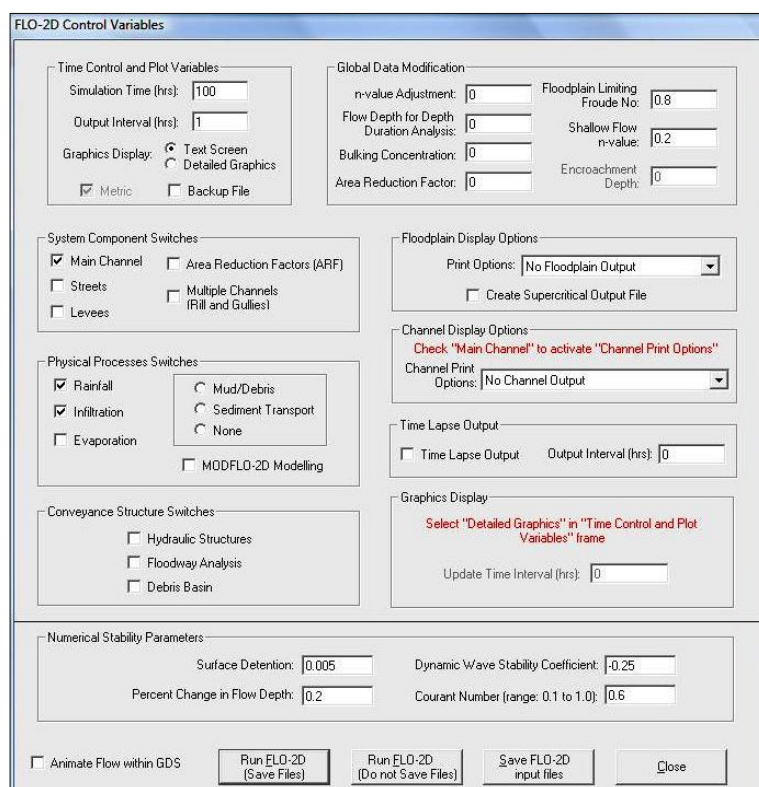
Pred zagonom simulacije je potrebno v pogovornem oknu za zagon (Slika 13) nastaviti naslednje kontrolne in numerične stabilnostne parametre:

⁵ Koeficienti CN so določeni na predpostavki, da je odtok iz hiše in dovozne poti usmerjen proti bližnji cesti z minimalno količino strešne vode usmerjene na trate, kjer lahko pride do infiltracije.

⁶ Za ostale prepustne površine (trate) je predpostavljeno, da imajo dobre pogoje.

⁷ Za območja s toplejšo klimo se uporabi koeficient CN enak 95.

- *n - value Adjustment (AMANN)* - spreminjanje koeficienta n_g z globino [0 - 0.4; - 99; > 1]
- *Floodplain Limiting Froude No.* - omejevanje Froudeovega 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 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 [0.015 - 0.3 m]. Privzeta vrednost je nastavljena na 0.03 m. To pomeni da je debelina vodne plasti preden se začne odtok enaka 0.03 m, volumen te plasti pa je del začetnih izgub. V priročniku modela Flo-2D je priporočena vrednost za modeliranje manjših poplavnih dogodkov padavine - odtok enaka 0.015 m;
- *Percent Change in Flow Depth (DEPTOL)* - nastavitve za tolerance sprememb v globini sosednjih računskih celicah v časovnem koraku [0; 0.1 - 0.5];
- *Dynamic Wave Stability Coefficient* - nastavitev koeficienta stabilnosti računa [<0 ; 0.01 - 2; >100] in
- *Courant Number* - pogoj za kontrolo računskega koraka [0.1 - 1.0].



Slika 13: Pogovorno okno programa Flo-2D za nastavitve kontrolnih in numeričnih stabilnostnih parametrov.

Izračuni trajajo dolgo, sorazmerno z velikostjo računske celice (Preglednica 6). Program za zagotavljanje stabilnosti in zaradi pogoja ohranjanja volumna, skrajšuje časovni korak, dokler ni dosežena zahtevana stabilnost.

Preglednica 6: Hitrost simulacije v odvisnosti od velikosti mrežnega sistema (O'Brien, J. S. 2009c).

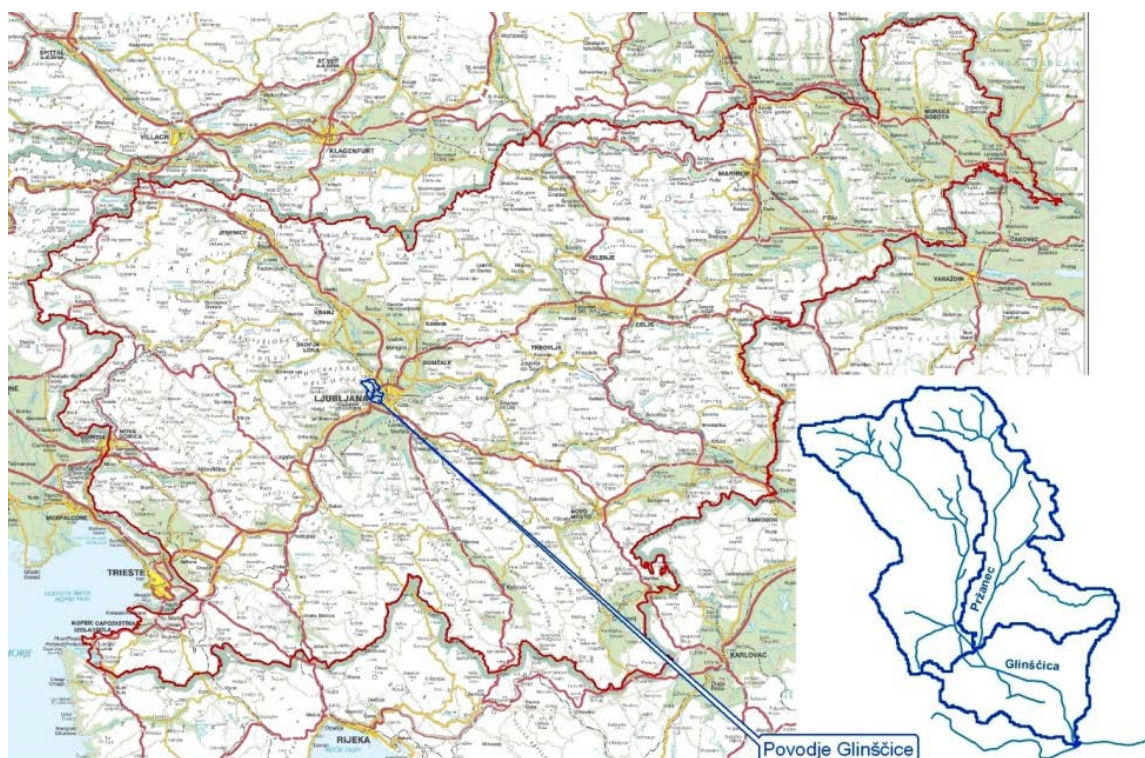
Velikost mrežnega sistema	
Število mrežnih celic	Hitrost simulacije
1000 - 15000	Zelo hitro (minute)
15000 - 30000	Hitro (~ure)
30000 - 60000	Zmerno (ure)
60000 - 150000	Počasi (do en dan)
> 150000	Zelo počasi (dan ali več)

3 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA

3.1 Uvod

Porečje vodotoka Glinščica leži v centralnem delu Slovenije (Slika 14) in obsega severozahodno obrobje Ljubljane (Šentvid, Dravlje, Šiška, Rožnik in Rožna dolina). Glinščica je levi pritok Gradaščice.

Glinščica izvira pod severovzhodnimi obronki Toškega čela in pri Podutiku preide v ravninski del Ljubljanske kotline. Topografska slika porečja je sestavljena iz gričevnatega dela na vzhodu in razširjenega ravninskega dela na jugu. Relief porečja Glinščice je precej raznolik, od strmih povirnih območij do ravníc. Porečje Glinščice sega na severni strani v pobočje Toškega čela in Črnega vrha, razvodnica na vzhodu sega v urbano območje mesta Ljubljane (Dravlje, 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. Padavinsko prispevno območje obsega 17.4 km². Skupno prispevno območje Glinščice je nekoliko večje in zajema 19.3 km² površine (Rusjan in sod., 2003). Študijsko območje je prikazano na sliki 14.



Slika 14: Položaj obravnavanega območja.

Zgornji del porečja je strm in gozdnat. Odtok iz zgornjega porečja se zbira v več manjših pritokih, ki napajajo vodotoka Glinščico in Pržanec. Odtok iz zgornjega porečja se skoncentrira v dokaj kratkem času zaradi majhne površine in strmega terena. Večino zemeljske površine je prekrte z gozdom. Glede na ekomorfološko kategorizacijo vodotokov, s katero se opisuje stopnjo naravne ohranjenosti vodotokov, je zgornji del Glinščice in Pržanca klasificiran kot naravni do sonaravno urejeni vodotok (Slika 17). Podatki o kategorizaciji vodotokov so na voljo na spletno dostopnem naravovarstvenem atlasu na spletni strani Agencije RS za okolje.

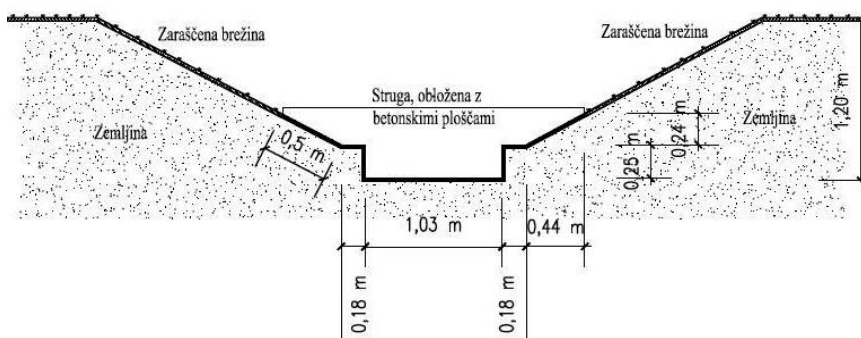
Osrednji del porečja je precej urbaniziran (Glinca, Dolince, Kamna Gorica, Pržan, Podgora, Dravlje, Koseze in Podutik). Vodotoka sta v tem delu sonaravno do tehnično urejena. Z izjemo dveh krajših odsekov Glinščice (720 m) in enega odseka Pržanca (280 m) med Podutikom in Kosezami, kjer je del vodotoka togo urejen (Slika 17). 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. Ta del Glinščice je togo urejen (Slika 17).

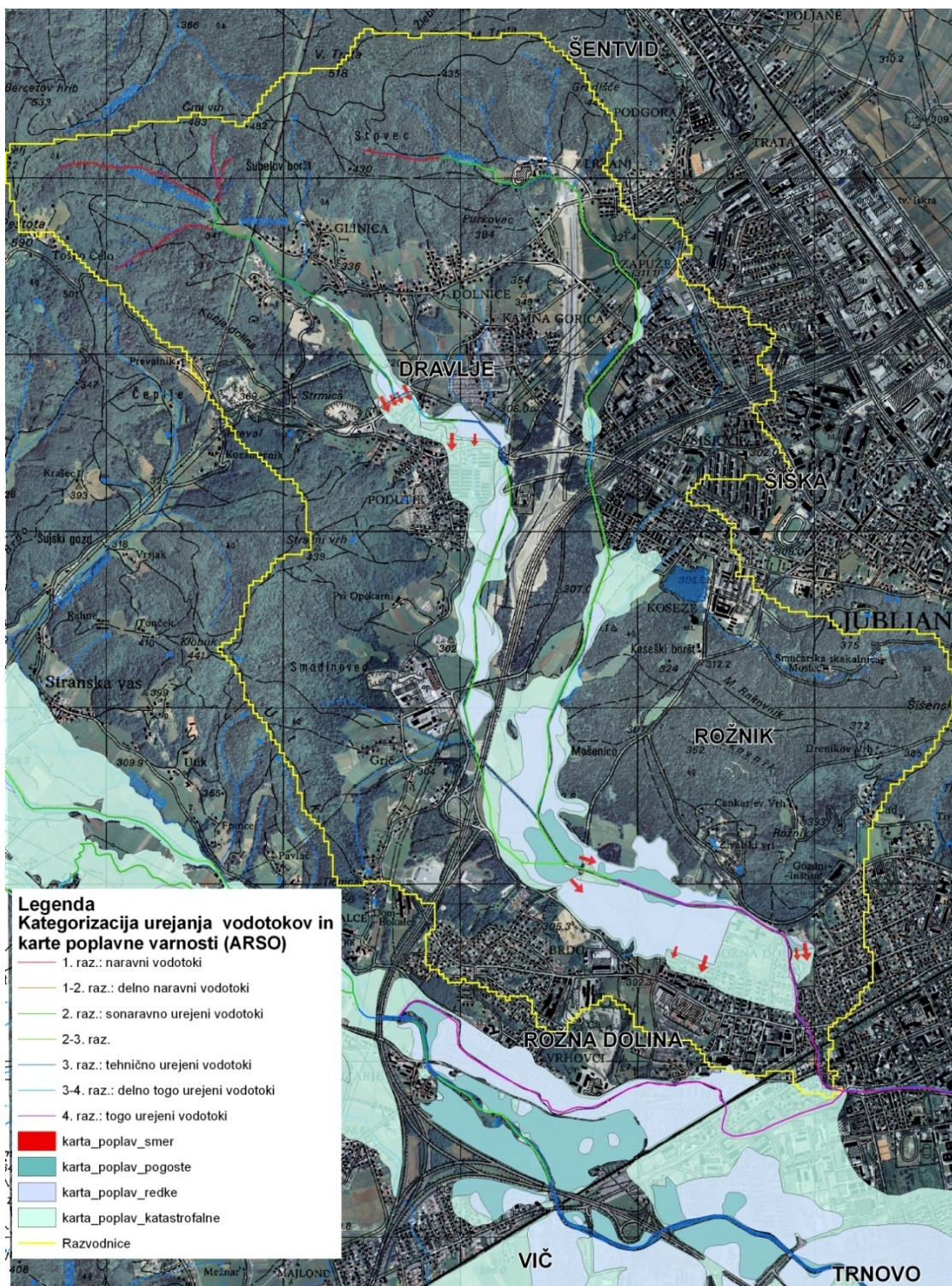
Dno struge od Brdnikove ceste pa do iztoka v Gradaščico je tlakovano. Globina betonskega korita je 25 cm, širina pa 103 cm. Struga je nato razširjena v trapezno obliko, katere prečni prežez ima dimenzije do 50 cm višine in 255 cm širine. Brežine struge so pokrite z betonskimi bloki (Slika 15, Slika 16). Korito Pržanca je naravno, podlaga je sestavljena iz glinovcev in preperelega površinskega sloja.



Slika 15: Reguliran del struge Glinščice, od Biološkega središča navzgor.



Slika 16: Prečni prežez struge Glinščice pri Biološkem središču (Škrbec, 2005).



Slika 17: Razvrstitev vodnih teles na območju porečja Glinščice glede na stanje hidromorfoloških elementov in prikaz poplavne varnosti (katastrofalne poplave - povratna doba Q50 in več, redke poplave - Q10 do Q20, pogoste poplave - Q2 do Q5) in smeri poplavljanja. Vir: spletna stran MOP, <http://www.sigov.si/mop/>, junij 2006.

Kumulativni razvoj na poplavnem območju in posegi v strugi so izvedeni neustrezno. Prevodnost struge ni zadostna in ustvarja možnosti za poplave. Visoke vode Glinščice ogrožajo predvsem zahodni del obravnavanega območja med Podutikom in Rožno dolino. Pržanec ogroža del Kosez in zahodni del Draveljske gmajne (Slika 17). Zaradi relativno majhnega porečja so kritične predvsem visoke vode krajših, nekaj urnih intenzivnih padavin.

3.2 Topografija, vegetacija in raba tal

Gospodarjenje z zemljišči vodnega in obvodnega prostora ima vpliv na spremenjene vzorce odtoka s porečja. Naravna struga Glinščice je bila izravnana in delno kanalizirana, povečal se je delež urbanih površin (Podutik, Dravlje, Koseze in Brdo) na račun izgube poplavnih ravnic (Slika 17).

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

3.3 Pedologija

Rezultati pedološke študije Laboratorijskega polja (1982), ki zajema okoli 12.5 hektarjev velik kompleks zemljišč in se razprostira med potokom Glinščica in južnim odvodnim kanalom, z vzhodne strani pa ga omejuje Jamnikarjeva ulica 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 prod, gornji, površinski del pa sestavlja meljasto glinasto ilovnat material. Tla raziskovalnega območja so prilično enotno grajena. 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 morfologijo tal gradijo tla glejev, ki so dodatno površinsko oglejena A-g-Go-Gr horizonti. Horizont g označuje cono, v kateri se zadržuje padavinska (površinska) voda, horizonta Go in Gr pa označujeta dominacijo talne vode (Stepančič in sod., 1982).

Opis in shematski prikaz značilnega profila tal (Stepančič in sod., 1982):

Ap	Meljasta ilovica	0 - 28 cm, temno rjava meljasta ilovica, debelo grudičasta, težje drobljiva, vsebuje do 5 % drobnega skeleta
g	Meljasto glinasta ilovica	28 - 63 cm, rjavo siva meljasto glinasta ilovica, debelo oreškasta struktura, težko drobljiva, drobne konkrecije, epiglejno oglejevanje
B (Go)	Meljasto glinasta ilovica	63 - 110 cm, rumeno rjava meljasto glinasta ilovica, slabo izražene poliedrične strukture, nedrobljiva, slabotno hipoglejno oglejevanje, vsebuje okoli 20 % skeleta
BCGo	Glinasta ilovica	110 - 130 cm, skeletna glinasta ilovica, brezstrukturna in nedrobljiva, mokra
CG	Pesek, prod	130 - 150 cm, pesek pomešan s prodom

Po mehničnem sestavu 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 prilično visok. Takšen teksturni sestav vpliva, 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 in sod., 1982).

Potok Glinščica in njen levi pritok Pržanec tečeta večinoma po plasteh melja, gline in šotnih preperinenaki kamninski podlagi. Zgornji tok Glinščice in potoka Pržanca sta geološko bolj razgibana, saj tam najdemo tudi plasti lapornatega apnenca, laporja, skrilavega glinovca, skladove dachsteinskega apnenca s prehodi v dolomit, dolomit, sljudast apnenec, lapor, glinavec, oolitni apnenec...(Kuzma, 2003).

Na celotnem prispevnem območju Glinščice se v glavnem pojavljajo isti talni tipi. Obrečna tla ob sami Glinščici, glej v osrednjem delu doline in psevdoglej na obrobjih (Prus, A., osebna komunikacija, 31. 3. 2011).

3.4 Geologija in podnebje

3.4.1 Peščeno prodati zasipi Draveljske doline

Kadunja Draveljske doline je po do sedaj znanih podatkih zapolnjena z več 10 m debelim peščeno prodatim zasipom z lečami konglomerata. Debelina sedimentov v osrednjem delu doline presega 70 pa tudi 80 m. V zasipu nastopa medzrnska poroznost dobre vodoprevodnosti s koeficientom prepustnosti (k) $> 10^{-4}$ m/s. Na območju Kosez nastopa nivo podzemne vode na globinah < 25 m. Vodonosni horizont v peščeno prodatem zasipu je naravno dobro zaščiten z več m debelim, za vodo zelo slabo prepustnim do neprepustnim glinastim pokrovom. Debelina pokrova dosega 14 do 20 m. Na območju med Pržanom, Kamno Gorico in Podutikom so krovne plasti za vodo slabo do neprepustne. Koeficient prepustnosti je manjši od 1×10^{-8} m/s. Nekoliko prepustnejše so plasti zaglinjega grušča in proda, ki ležijo pod glinastimi sedimenti. Med Trato, mimo Zapuž, Draveljske gmajne in zahodnega roba Koseškega Boršta nastopa hitro menjavanje za vodo neprepustnih in slabo prepustnih plasti. Ocenjuje se, da je koeficient hidravlične prepustnosti teh plasti manjši od 1×10^{-8} m/s. Iz podatkov vrtin je razvidno, da sta v teh plasteh dva horizonta podzemne vode. Zgornji horizont je v globini okoli 3 m, spodnji pa v globini od 6 do 9 m. Podzemna voda v vodonosniku prodatno konglomeratnega zasipa je v večji globini. Od Draveljske gmajne do Rožne doline nastopajo v krovlini prodatno konglomeratnega zasipa glina in meljna glina ter leče peska in melja, ki so za vodo zelo slabo prepustne do neprepustne. Ocenjuje se, da je koeficient prepustnosti manjši od 1×10^{-8} m/s. V dolini Glinščice je podzemna voda v teh plasteh blizu površine, na globini od 0.5 do 1.5 m. Pod glinastimi plastmi je nivo podzemne vode v vodonosniku prodatno konglomeratnega zasipa v globini od 17 do 25 m. Koeficient prepustnosti zaglinjenih peščeno prodatih zasipov brdske terase meri okoli 1.7×10^{-4} m/s. Nivo podzemne vode je na globini okoli 17 m (Okoljsko poročilo za občinski podrobni prostorski načrt za območje zadrževalnika Brdnikova, 2010).

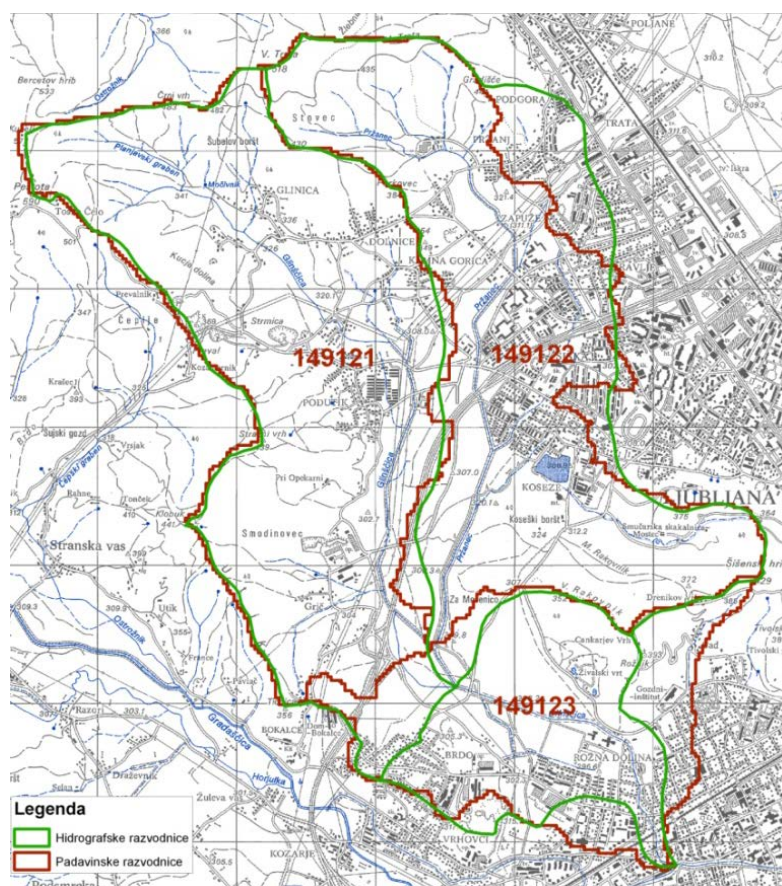
3.4.2 Podnebje

Območje Ljubljane ima zmerno celinsko podnebje osrednje Slovenije. Srednja letna temperatura v Ljubljani je 10.3 °C (obdobje meritev 1961–2008). Značilen je celinski

padavinski režim, povprečna letna količina padavin je 1374 mm (obdobje meritev 1961–2008) (Urad za meteorologijo, ARSO, 2009).

3.5 Vodni viri in hidrologija

Porečje Glinščice je po šifrantu padavinskih območij R Slovenije padavinsko območje petega reda porečja Save s šifro 14912. Slednje sestavljajo tri podpovodja, in sicer prispevno območje glavnega toka (149121), prispevno območje Pržanca (149122) in prispevno območje od sotočja Glinščice in Pržanca do izliva v Mestno Gradaščico (149123). Prikaz strukture modela povodja Glinščice je podan na sliki 18, shema pa v preglednici 7.



Slika 18: Šifrant padavinskih območij (Šraj, 2000) in linije hidrografskih razvodnic na osnovi reliefnih karakteristik (ARSO).

Linije hidrografskih razvodnic na osnovi reliefnih karakteristik, katere omejujejo prispevna

oz. vodozbirna območja vodotokov posameznega reda nekoliko odstopajo od linij padavinskih območij (Slika 18).

Preglednica 7: Šifrant podpovodij na 6. ravni (Šraj, 2000).

Šifra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	Padavinsko območje	Površina (km ²)
1	Porečje Save						Porečje Save R Slovenije	10656.26
14	Ljubljana						Porečje Ljubljanice vključno s kraškim zaledjem	1883.78
149	Mestna Ljubljana						Porečje Ljubljanice od sotočja s Šuljico do vtoka v Ljubljano	159.45
1491	Ljubljana - Trnovo						Mestna Ljubljana	195.45
14912	Glinščica						Glinščica	16.85
149121							prispevno območje glavnega toka	7.2
149122							prispevno območje Pržanca	5.99
149123							prispevno območje od sotočja Glinščice in Pržanca do izliva v Mestno Gradaščico	3.66

Na povodju Glinščice deluje 5 merskih postaj, na katerih se merijo padavine. V neposredni bližini pa še padavinska postaja Agencije RS za okolje Ljubljana - Bežigrad ter padavinski postaji Livada in Kozarje (Preglednica 8, Slika 21).

Preglednica 8: Merske postaje.

Merska postaja	Tip inštrumenta	X	Y
Lj - Bežigrad	Meteorološka postaja	462612.68	102581.03
FGG - Hajdrihova	Helmannov dežemer	461013.91	99870.13
Koseze	Helmannov dežemer	459292.85	102965.74
Podutik	Helmannov dežemer	458117.45	103094.49
Livada	Helmannov dežemer	462618.68	98995.74
Kozarje	Helmannov dežemer	457355.98	99099.81
Pržanec	ONSET RG2-M	458471.68	104859.36
Biološko središče	Startflow	459428.23	100881.64
FGG - Hajdrihova	Startflow	461000.99	99802.34
Mali Graben - Pri Kovaču	Startflow	457781.54	100184.32

V hidroloških študijah, ki jih objavlja Agencija za okolje in prostor RS, so podane ekstremne količine padavin za različna trajanja in različne povratne dobe. Preglednici 9 in 10 prikazujeta padavine pri povratnih dobah ekstremnih padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad, dobljene na podlagi statistične analize (Gumbelova porazdelitev) padavinskih dogodkov od leta 1948 do leta 2007.

Preglednica 9: Višine padavin za različne povratne dobe in trajanje padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad (1948 – 2007) (ARSO, 2009).

trajanje padavin	POVRATNA DOBA								
	1 leto	2 leti	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let	250 let	
5 min	6	9	12	14	17	19	21	23	mm
10 min	9	13	18	21	25	28	31	34	mm
15 min	12	16	23	27	32	36	40	45	mm
20 min	14	19	26	31	36	41	45	51	mm
30 min	16	22	31	37	44	49	54	61	mm
45 min	18	25	35	42	50	57	63	71	mm
60 min	20	28	38	45	54	61	67	76	mm
90 min	23	31	44	51	62	69	76	86	mm
120 min	25	34	47	56	66	74	82	93	mm
180 min	28	38	52	61	72	80	89	100	mm
240 min	32	42	56	65	76	85	94	105	mm
300 min	35	45	59	68	80	89	98	109	mm
360 min	37	48	62	71	83	92	100	112	mm
540 min	44	54	68	78	90	99	108	119	mm
720 min	48	59	75	85	98	107	117	129	mm
900 min	52	64	79	90	103	112	122	134	mm
1080 min	55	67	84	95	109	119	129	143	mm
1440 min	62	76	94	107	122	134	145	160	mm

Preglednica 10: Količine padavin za različne povratne dobe in trajanje padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad (1948 – 2007) (ARSO, 2009).

trajanje padavin	POVRATNA DOBA								l/sec/ha
	1 leto	2 leti	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let	250 let	
5 min	209	287	395	466	556	623	689	776	l/sec/ha
10 min	156	214	293	346	412	461	510	574	l/sec/ha
15 min	130	181	252	298	357	401	445	502	l/sec/ha
20 min	116	158	216	254	303	339	374	422	l/sec/ha
30 min	89	124	171	203	243	273	302	341	l/sec/ha
45 min	66	94	131	155	186	210	232	263	l/sec/ha
60 min	55	77	106	126	151	169	187	211	l/sec/ha
90 min	42	58	81	95	114	128	142	160	l/sec/ha
120 min	34	47	65	77	92	103	114	129	l/sec/ha
180 min	26	35	48	56	67	74	82	92	l/sec/ha
240 min	22	29	39	45	53	59	65	73	l/sec/ha
300 min	19	25	33	38	45	49	54	61	l/sec/ha
360 min	17	22	29	33	38	42	46	52	l/sec/ha
540 min	14	17	21	24	28	30	33	37	l/sec/ha
720 min	11	14	17	20	23	25	27	30	l/sec/ha
900 min	10	12	15	17	19	21	23	25	l/sec/ha
1080 min	9	10	13	15	17	18	20	22	l/sec/ha
1440 min	7	9	11	12	14	15	17	19	l/sec/ha

3.5.1 Koseški bajer

Koseški bajer se nahaja na prehodu Pržanca iz dolinskega v ravninski del (pri naselju Mostec). Površina bajerja je 3.8 ha, globina do 2 m. V bajer se stekajo površinske vode in na jugozahodnem delu manjši potoček. Voda nato gravitira proti zahodnemu delu v potok Pržanec.

Prispevna površina Koseškega bajerja je 1.01 km². Minimalne in srednje letne dotoke v Koseški bajer so, z upoštevanjem velikosti prispevnega območja, določili z merjenjem pretokov Glinščice na Vodometri postaji Hidrometeorološkega zavoda (HMZ) Rožna dolina. Srednji letni pretok je 0.023 m³/s, srednji nizki pretok je 0.001 m³/s, minimalni pretok pa 0.000 m³/s (Krivograd Klemenčič, 2002).

4 IZDELAVA MODELA POVRŠINSKEGA ODTOKA S PROGRAMOM Flo-2D

V nadaljevanju je opisan postopek izdelave modela padavine - odtok, ki sem ga kasneje primerjala z enodimenzijskim modelom HEC-HMS. Za primer Glinščice je Dirnberk (2009) v diplomski nalogi z naslovom Vpliv histograma efektivnih padavin na hidrogram odtoka izdelal model porečja. Uporabljen je bil hidrološki model HEC-HMS, s katerim je bil na podlagi podatkov o padavinah na bližnji dežemerni postaji in podatkih o merjenih pretokih izdelan hidrološki model porečja Glinščice. Rezultat omenjenega dela je bil umerjen model in hidrogrami za posamezna podpovodja.

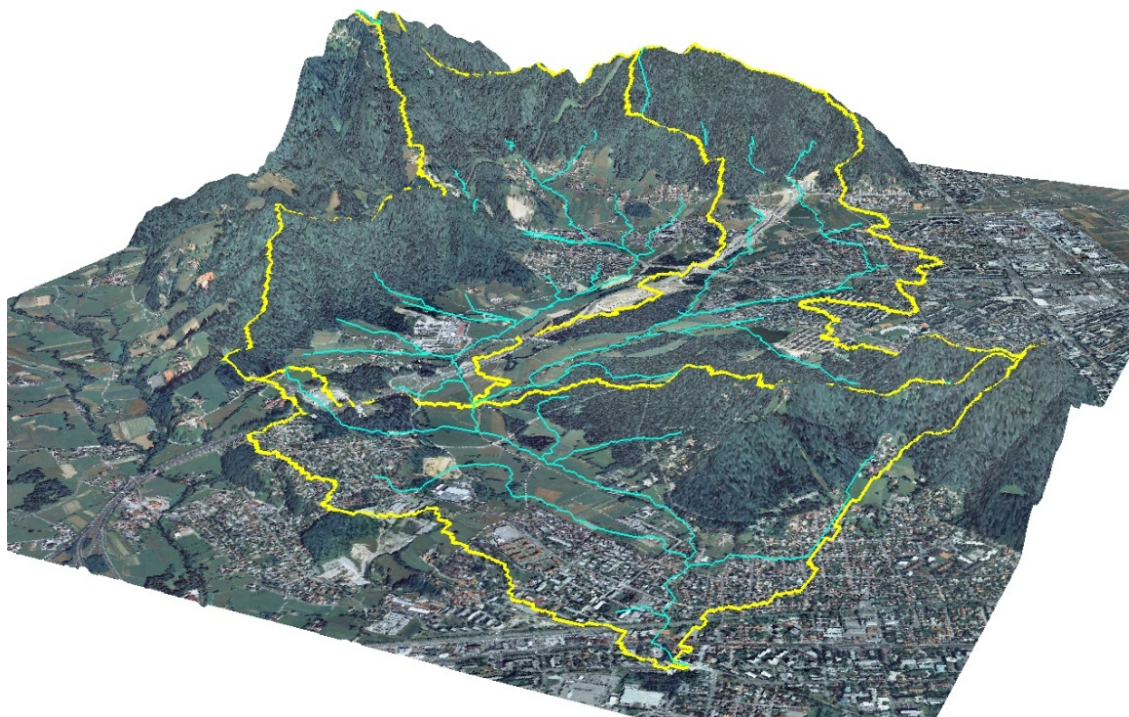
Za modeliranje hidrološkega sistema Glinščice s programom Flo-2D sta uporabljena računalnika z zmogljivostmi:

- procesor Intel Core2Duo 2.0 GHz, 3 Gb RAM (v nadaljevanju R2.0) in
- procesor Intel Corei7 950, 3.07 GHz (v nadaljevanju R3.0).

4.1 Geometrija

Za namen naloge sem imela na voljo digitalne modele višin različnih resolucij (DMV 5, DMV 10 generiran iz DMV 5, DMV 12.5 in DMV 25) (Slika 19).

Digitalni model višin je potrebno projecirati na mrežo končnih elementov. Ta je bila za prve simulacije zasnovana s kvadratnimi elementi velikosti 50 x 50 m in 25 x 25 m. Izbira velikosti mrežnega elementa, pogojuje hitrost in natančnost izračuna. Izbira majhnega elementa lahko povzroči dolg čas simulacije poplave, po drugi strani pa omogoča boljši zajem geometrije struge in druge detajle toka.



Slika 19: Digitalni model reliefa študijskega območja.

Naklon celice je bil izračunan z interpolacijo višinskih točk s polmerom 50 m oz. 25 m in s središčem v sredini celice. Pri mreži 50 m x 50 m je izračun višin posameznih celic manj natančen, saj ima samo eno višino, vendar hitrejši. Pri modelu ni bila izbrana možnost filtriranja višin.

Velikost mrežne celice in vrsta terena zelo vplivata na natančnost interpolacije višin. Če je teren dokaj raven in gladek, so celice lahko večje in natančnost zadovoljiva. In obratno, če je teren zelo razgiban z mrežo višinskih točk ne moremo doseči želene natančnosti in je potrebna nadgradnja z dodatnimi informacijami (kote, strukturne linije, robne linije).

Po interpolaciji točk sem primerjala izračunane višine celic v iztočnem delu obravnavanega območja z dejanskimi kotami. V odvisnosti od gostote mreže, so različne tudi višine računskih celic na kontrolni točki. Z uporabo DMV 5 in gostejše mreže (5 m) bi z gotovostjo dobila bolj natančne lokalne rezultate, predvsem v okolici struge. Računska mreža 25 m x 25 m in 50 m x 50 m, ki jo program generira na osnovi DMV 5 za izračun hidrologije ni ustrežna. Odstopanja v nadmorski višini na iztočnem delu povodja med dejanskimi in

izračunanimi vrednostmi so reda velikosti 100 m.n.v. Pri računu toka prihaja do velikih nestabilnosti in izredno kratkih časovnih korakov računa in posledično dolgih časov računa simulacije. Računska mreža 50 m x 50 m, formirana na osnovi podatkov o terenu DMV 25 da v grobem zadovoljive podatke o topografiji. Računi z mrežo 25 m x 25 m, formirane na osnovi podatkov o terenu DMV 25, DMV 12.5 in DMV 10 so bili stabilni. Edino težavo predstavlja problem lokalnih depresij. Model poroča ogromen delež vode kot "*floodplain storage*" - trenutne prostornine vode. Te začetne izgube se ne zmanjšajo oz. ta voda ne odteče, če tudi podaljšam čas računa za 7.5 krat toliko kot trajajo padavine. V nadaljevanju se je po grobi primerjavi rezultatov vodne bilance (prostornina padavin je enaka vsoti prostornini izgub zaradi infiltracije, prestreženih padavin, trenutna prostornina vode in odtok s povodja) med modeli, kot najbolj ustrezen se je izkazal DMV 12.5.

Za končne izračune sem uporabila mrežo s 12.5 metriskimi celicami generiranimi iz DMV 12.5. Izbira te velikosti zadostuje pogoju enačbe (6). Če vzamemo, da je vršni pretok enak $9.7 \text{ m}^3/\text{s}$ in ga delimo s površino celice, ki je enaka 156.25 m^2 , dobimo razmerje 0.06, ki je na spodnji meji pogoja.

Mreža 12.5 x 12.5 m je bila narejena v programu GDS z uporabo vgrajenih možnosti za interpolacijo naklonov celic mreže. Naklon celice mreže je bil izračunan z interpolacijo vseh točk DMV 12.5 in s filtriranjem višinskih točk po metodi standardne deviacije, s katerim je bila dosežena določena stopnja glajenja (polnjenje večjih lukenj in ustvarjanje ravnih ploskev) (Slika 3).

4.1.1 Določanje mej porečja

Pomembno je tudi, da čim bolj natančno določimo računsko območje, ki pokriva celotno področje gibanja vode. Velikost računskega območja pogojuje število računskih celic in čas računa.

Za namen vzpostavitve hidrološkega modela Glinščice sem za meje porečja upoštevala razvodnice, ki so na sliki 18 označene z rdečo barvo, 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 povodju. Poleg tega je Dirnberk (2009) za vzpostavitev hidrološkega modela Glinščice z enodimenzijskim programom HEC-HMS uporabil slednje in ker je eden od ciljev te diplomske naloge primerjava teh rezultatov z rezultati dvodimenzijskega modela Flo-2D je smiselno vzeti enako prispevno območje Glinščice, ki je v tem primeru tako nekoliko večje.

4.1.2 Struga Glinščice in Pržanca

V računsko mrežo je bilo potrebno umestiti potek in dimenzije strug. Na osnovi orto posnetka in temeljnega topografskega načrta merila 5000 (TTN5) sem v računsko mrežo umestila potek vodotokov (Glinščice in Pržanca). Skupna dolžina modeliranih vodotokov znaša 10663 km (738 celic). Geometrijo struge Glinščice in Pržanca sem poenostavljeno opisala s pravokotnim koritom. Dimenzije korita sem grobo ocenila na širino 3.0 m in globino 1.5 m.

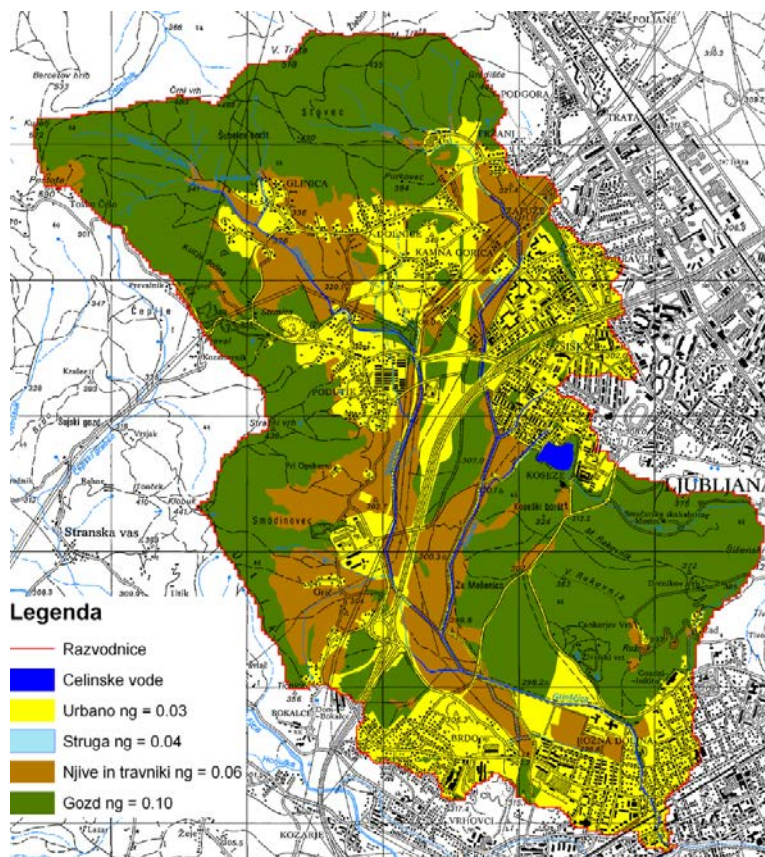
Interpolacija padcev prečnih profilov med računskimi celicami struge je bila izvedena v programu PROFILES. Rezultat te interpolacije je enakomeren padec dna struge osnovnega korita.

4.1.3 Koseški bajer

Koseški bajer je z modelom reliefa predstavljen kot večja depresija, kamor se stekajo večje količine vode in v njem tudi zadržijo. V modelu sem izločila vpliv bajerja tako, da sem topografijo (višine) na tem območju ročno zgladila. Pri tem sem upoštevala, da voda gravitira proti zahodnemu delu v potok Pržanec.

4.1.4 Manningov koeficient hrapavosti

Koeficiente hrapavosti sem določila na osnovi obstoječe literature (Julien, 2002; Flo-2D, 2009). Za povodje Glinščice sem uporabila naslednje Manningove koeficiente hrapavosti, kot jih je priporočil Hojnik (osebna komunikacija, 29.4.2011): 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) = $0.04 \text{ sm}^{-1/3}$ kot je prikazano na sliki 20.



Slika 20: Prikaz določitve Manningovih koeficientov hrapavosti.

4.1.5 Iztok iz območja

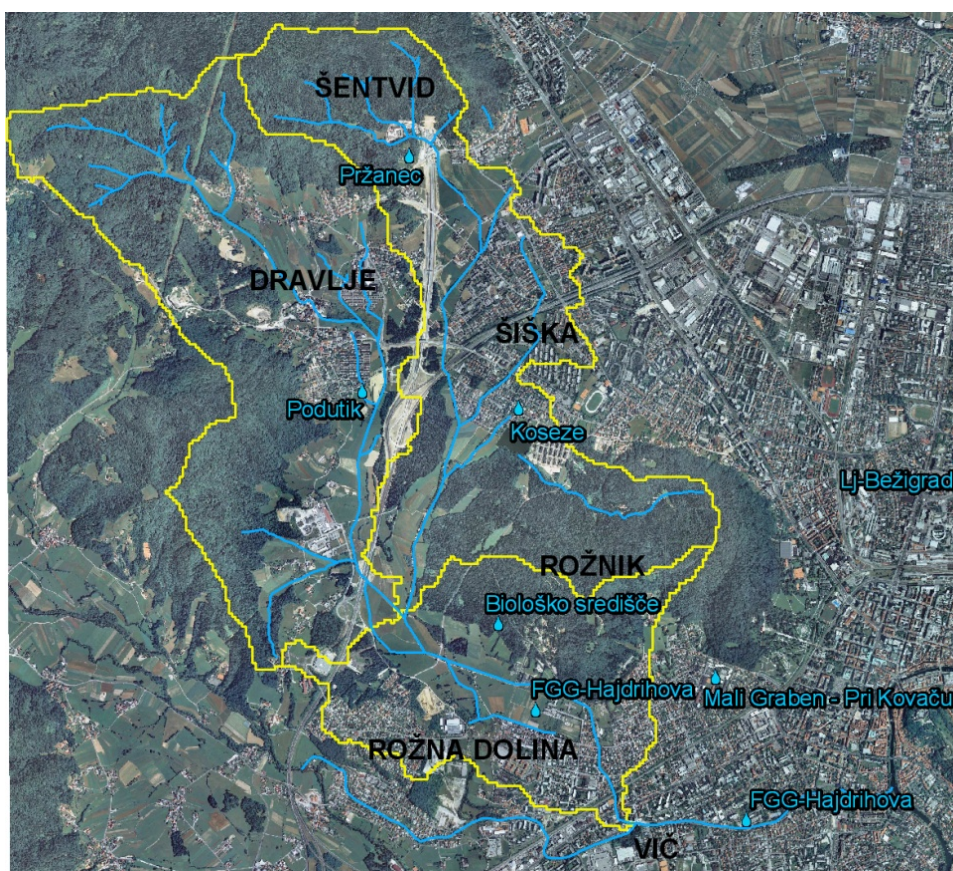
Da bi preprečili razliv toka izven računskega območja je potrebno določiti spodnji robni pogoj. Glavni iztok iz povodja predstavlja končni element struge. Ker je širina struge manjša od širine mrežnega elementa ta iztočna celica predstavlja kombiniran iztok iz struge in iz prispevne površine. Meja računskega območja in linije hidrografskih razvodnic na osnovi reliefnih karakteristik (Slika 18) se ne skladajo v celoti, zato so bili segmenti ki odstopajo oz. visijo ven iz topografske razvodnice določeni kot iztočne celice iz prispevne površine.

Ko je teren pripravljen, vnesemo padavine.

4.2 Hidrologija

Za hidrološko analiza so pomembni zgodovinski podatki o padavinah in pretokih ter podatki o lastnostih tal.

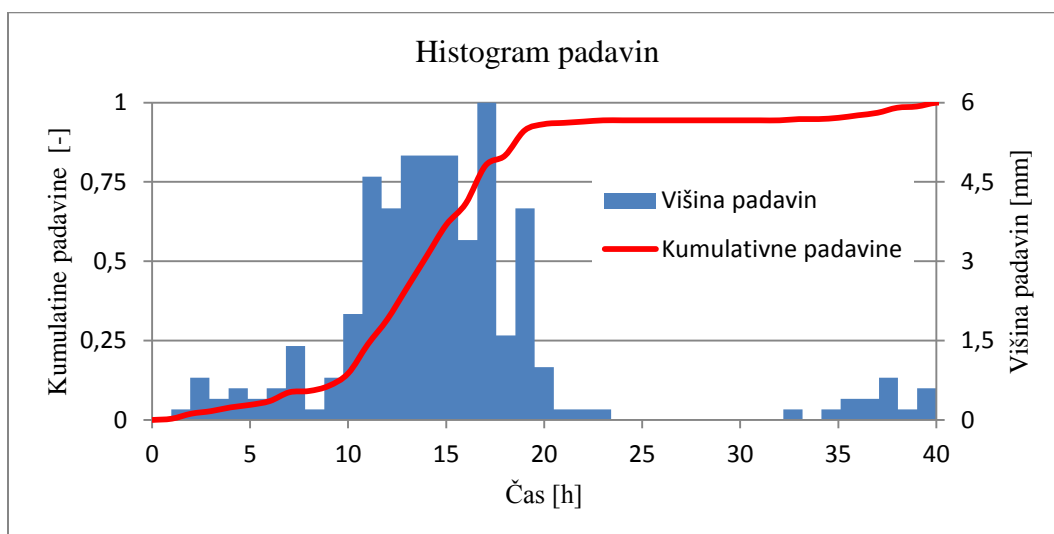
Za namen naloge sta bili izbrani meteorološka postaja Bežigrad in vodomerna postaja Pržanec (Slika 21).



Slika 21: Položaj merskih postaj.

Meteorološka postaja Ljubljana - Bežigrad se nahaja 2 km vzhodno od zunanje meje obravnavanega območja. Opazovalni prostor meteorološke postaje velikosti 50 m × 70 m je sredi mesta, na travniku, na nadmorski višini 299 m. Okoli tega prostora rastejo drevesa, oddaljena približno 30 do 50 m v smereh sever, jug in zahod. Zaradi svoje posebne lege na dnu kotline in v središču mesta je postaja reprezentativna za mesto in bližnjo okolico (spletna stran ARSO).

Vodomerna postaja Pržanec leži ob gozdni meji na zgornjem delu povirja potoka Pržanec. Podatki iz avtomatske postaje za padavinski dogodek, 17.1.2003, so prikazani na sliki 22. Omenjeni dogodek se je začel 17. januarja ob 0:00 in je trajal do 18. januarja 2004 do 16:00. Skupno je padlo 50.4 mm padavin. Najbolj intenzivne padavine so bile 17. januarja med 10:00 in 17:00 uro. Maksimalna intenziteta je bila med 16:00 in 17:00 uro, ko je padlo 6 mm padavin.



Slika 22: Prikaz razporeditve padavin za postajo Pržanec za dogodek v januarju 2004.

Štajdohar (2005) je s primerjavo dnevnik količin padavin ugotovila, da je koeficient korelacije med postajama Pržanec in Ljubljana - Bežigrad odvisen od prostorske razporeditve padavin in ne od časovne. Dobljeni korelacijski koeficient - 0.87, kaže na zadovoljive rezultate padavin.

Padavine vnesemo v datoteko RAIN.DAT. Osnovna zahtevana podatka sta količina skupnih padavin v milimetrih in časovna razporeditev padavin - vnesemo čas, ki je odvisen od časa med posameznimi meritvami ter pripadajoče procenete skupnih padavin (Slika 22).

V nalogi sem uporabila izbiro SCS razporeditev padavin, ki je podrobneje opisana v poglavju 2.4.3.

Na merskem mestu v Rožni dolini (v neposredni bližini Biološkega središča) so v obdobjih 1954–1969 in 1975–1982 potekale meritve višine gladin. Z verjetnostno analizo so na podlagi

teh meritev ugotovili, da je povprečni pretok za to obdobje znašal $0.383 \text{ m}^3/\text{s}$ (Štajdohar, 2005).

Vodnogospodarski inštitut je s programom HEC-2 izdelal hidrološki model Glinščice za izračun pretokov pri različnih povratnih dobah (Rusjan, 2003). Rezultati modela za posamezen prečni prerez in za posamezno povratno dobo so podani v preglednici 11.

Preglednica 11: Visoke vode na različnih odsekih Glinščice pri različnih povratnih dobah (Rusjan, 2003).

Prečni prerez	F	Q ₁₀₀	Q ₅₀	Q ₂₀	Q ₁₀	Q ₅
	km ²	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Glinščica (sotočje z levim pritokom nad ul. A. Bitenca)	1.59	13.1	11.0	7.9	5.8	3.7
Glinščica do Kozakove ulice	2.17	14.6	11.8	8.44	6.1	3.8
Glinščica do suhega zadrževalnika (Podutiška c.)	3.10	17.7	14.3	10.1	6.6	4.0
Glinščica dolvodno od zadrževalnika (Podutiška c.)	3.10	13.7	7.1	5.6	4.7	3.5
Glinščica do AC obroča	5.76	16.9	14.3	10.8	8.3	5.8
Glinščica do Pržanca	6.92	19.3	16.2	12.1	9.1	6.3
Glinščica dolvodno od Pržanca	15.12	37	30	20.9	15.6	11.2
Glinščica do Brdnikova ulice	15.97	38	30	20.9	15.5	11.5
Glinščica do BS v Rožni dolini	17.79	38	30	21.0	16.5	12.8
Glinščica do iztoka	19.23	39	31	22.2	18.5	14.2

4.2.1 Izgube

Flo-2D model omogoča simulacijo padavinskih izgub - začetnih izgub, infiltracije in izhlapevanja. Za določanje izgub je bil uporabljen SCS CN model izgub.

Vrednost koeficientov, ki jih zahteva SCS CN metoda je za model Glinščice ocenil Dirnberk (2009) v diplomski nalogi. Za umerjen model s programom HEC-HMS je uporabil vrednosti, ki so prikazane v preglednici 12.

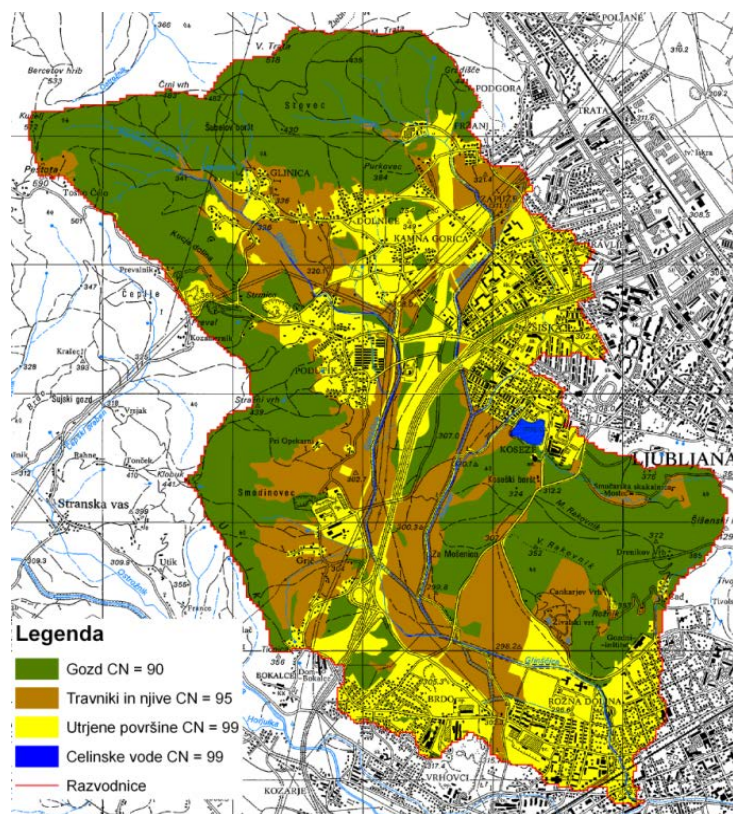
Preglednica 12: Vhodni podatki v HEC-HMS model - SCS metoda.

	podpovodje	149121	149122	149123
HEC - HMS	začetne izgube (I _a)	1.2	2.4	2.4
	CN	88	89	89
	% neprepustnih površin	12.6	22.4	22.4

V programu Flo-2D je zaradi topografije velik del začetnih izgub avtomatsko pokrit, delež neprepustnih površin lahko zajamemo le s koeficientom CN, saj pogovorno okno modela Flo-2D ne dopušča dodatne možnosti vnosa. Koeficienti SCS CN, kot jih je določil Dimberk (2009) so se posledično izkazali kot podcenjeni in neprimerni za primerjavo modelov Flo-2D in HEC-HMS.

Za model Flo-2D sem pripravila poligone z atributnimi tabelami vrednosti koeficientov CN, ki sem jih ocenila glede na rabo tal s pomočjo ortofoto posnetka in preglednice 5, kot je prikazano na sliki 23.

Pri ocenjevanju izgub sem upoštevala vrednost komponente TOL. Zato sem izbrala možnost določitve skupnega, povprečnega koeficienta CN (Slika 12 - Global SCS Curve Number), ki znaša 94.18 ter omogoča poljubno nastavitve začetnih izgub (Slika 12 - Global SCS Abstraction). Ker so te začetne izgube že upoštevane v komponenti TOL, sem vrednost začetnih izgub I_a nastavila na 0.01 mm. Skupni, povprečni koeficient CN sem izračunala po enačbi (14). Več o tem v poglavju 4.4.2, kjer je podan opis umerjanja modela.



Slika 23: Določitev koeficientov SCS CN.

4.3 Nastavitve kontrolnih parametrov modela Flo-2D

Pred zagonom simulacije sem v pogovornem oknu nastavila naslednje kontrolne in numerične stabilnostne parametre (Slika 13):

- *n - value Adjustment* - spreminjanje koeficienta n_g z globino - nastavljeno na 0.
- *Floodplain Limiting Froude No.* - omejevanje Froudeovega števila, nastajanja deročega toka - za prispevno površino nastavljeno na 0.8 in za tok v strugi na 0.6.
- *Shallow Flow n - value* - vrednost koeficienta n za plitve tokove - privzeta vrednost je nastavljena na 0.2 m.
- *Area Reduction Factor* - možnost za zmanjšanje površine posamezne celice ali blokiranje računskih celic (suhe celice) - te možnosti v simulaciji nisem uporabila.
- *Surface Detention* - najmanjša globina, ki jo model še modelira. Z namenom zmanjšanja začetnih izgub, sem ta parameter nastavila na vrednost 0.005 m. To je najmanjša vrednost, ki nima neugodnega vpliva na ohranitev volumna.

- *Percent Change in Flow Depth* - nastavitve za tolerance sprememb v globini sosednjih računskih celicah v časovnem koraku, nastavljena na 0.2 m
- *Dynamic Wave Stability Coefficient* - nastavitev koeficienta stabilnosti računa, nastavljena na -0.25.
- *Courant Number (v mejah: 0.1 do 1.0)* - pogoj za kontrolo računskega koraka, vrednost je nastavljena 0.6.

Iskanje najprimernejše nastavitve je potekalo s poskusi različnih kombinacij kontrolnih parametrov.

4.4 Umerjanje modela

Pri modeliranju je zelo pomembno umerjanje modela. Za pravilno simulacijo je najpomembnejša (konzervacija) skladiščenje volumna. V tem poglavju je opisan postopek umerjanja Flo-2D modela povodja Glinščice.

Za umerjanje modela sem imela na razpolago izmerjen pretok in volumen odtoka v času poplavnega dogodka v enem prerezu struge (merilno mesto pri Biološkem središču). Maksimalen pretok ob tem poplavnem dogodku je znašal $9.74 \text{ m}^3/\text{s}$, volumen odtoka pa 555290 m^3 .

Flo-2D izračuna izgube zaradi infiltracije in površinski odtok na osnovi podatkov o padavinah in infiltraciji (koeficient CN), z uporabo vgrajenega algoritma se nato izračuna število vtočnih sosednjih celic in volumen vode. Smer toka vode je določena glede na največji nagib celice. Enačbe s katerimi so določene posamezne komponente odtoka vsebujejo parametre, ki temeljijo na fizikalnih zakonitostih in spremenljivke, ki so empirične narave in jih lahko določimo samo s postopkom umerjanja oziroma optimizacije. Flo-2D je fizični model z eno empirično enačbo - Manningovo enačbo.

Umerjanje modela je potekalo s primerjanjem rezultatov simulacije z izmerjenimi vrednostmi - primerjava prostornine odtoka ter izračunanega hidrograma odtoka z opazovanim

hidrogramom za izbran padavinski dogodek, vse dokler odstopanje med izračunanimi in merjenimi vrednostmi ni sprejemljivo. Glavni parametri, potrebni za umerjanje modela so Manningov koeficient hrapavosti n_g , koeficient izgub SCS CN, topografija in kontrolni parameter TOL.

4.4.1 Manningov koeficient hrapavosti

Hrapavost vpliva na hitrost stekanja vode s prispevne površine in hitrost toka v strugi. Manningov koeficient hrapavosti je bil za prispevno površino določen, glede na rabo tal ob upoštevanju literature, kot je opisano v poglavju 4.1.4. Za strugo pa 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 Froudovega števila. Največje Froudovo število je bilo za tok v strugi približno ocenjeno na 0.6 in za tok po prispevni površini na 0.8 po enačbi (10).

4.4.2 Koeficient izgub SCS CN

Koeficiente izgub SCS CN, ki sem jih uporabila pri modelu, sem najprej izbrala enako kot Dirnberk (2009). Ti so se posledično izkazali kot podcenjeni in neprimerni za primerjavo modelov Flo-2D in HEC-HMS.

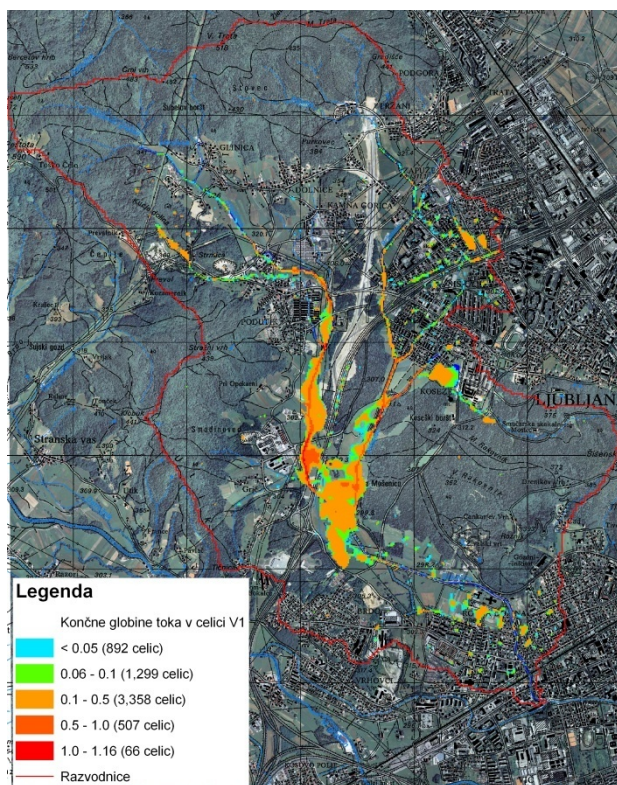
Glede na rezultate pedološke študije Laboratorijskega polja (1982), teksturni sestav obravnavanega območja pomeni, da so tla slabo strukturirana in slabo prepustna (Stepančič in sod., 1982). To pomeni, da je infiltracija na tem območju izrazito nizka.

V prid temu kaže tudi študija izdelave hidrološkega modela porečja Glinščice, ki so jo izdelali Brilly in sodelavci leta 2006, kjer se je izkazalo, da poplavna ogroženost dolvodnih urbanih območij ni neposreden rezultat povečanja odtočnih koeficientov z gorvodnega prispevnega območja (povečana stopnja urbanizacije), ampak predvsem neprimernih regulacijskih ureditev rečne struge z nezadostno hidravlično prevodnostjo.

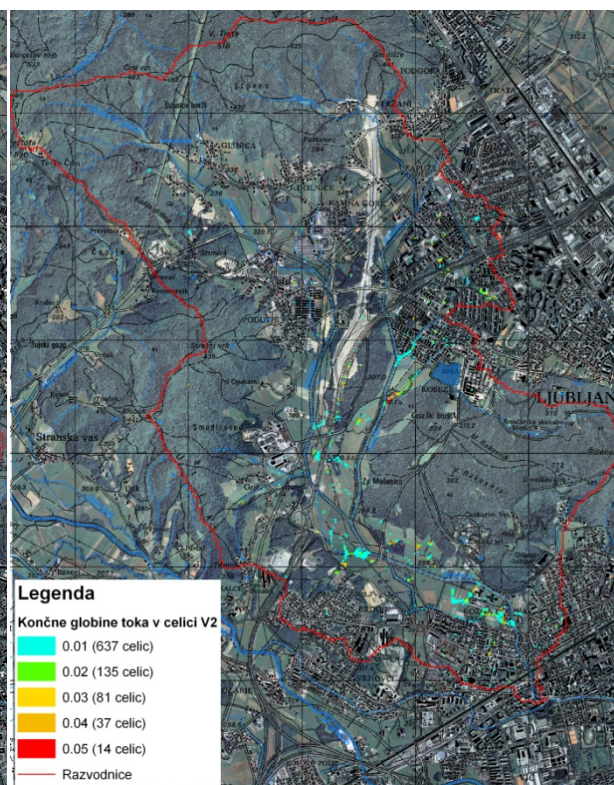
Iz obstoječe literature in preglednic, kot je opisano v poglavju 4.2.1 ter iz navodil za uporabo programa Flo-2D (FLO, 2006a) in z zahtevo, da gre za vodo zelo slabo prepusten do neprepusten pokrov, sem izbrala tipične vrednosti za dane terenske razmere. Vrednost skupnega, povprečnega koeficienta CN je bila določena na 94.18 ter vrednost začetnih izgub na 0.01.

4.4.3 Urejanje topografije

Interpolacija DTM točk za določitev višin posameznih računskih celic s programom GDS ni popolnoma točna. Zato je bilo potrebno nekaterim celicam prispevnega območja po pregledu rezultatov prilagoditi višine. Za ta namen sem uporabila komponento za pregledovanje rezultatov - Mapper, ki omogoča hitro določitev lege elementov ki imajo čezmerne globine toka in tvorijo neumestne depresije. Popravki so bili izvedeni z ozirom na obstoječe topografske podlage TTN5 (potek plastnic) in ortofoto posnetka. Slika 24 prikazuje rezultate prve simulacije pred urejanjem topografije, kjer so vidni lokalni elementi v katerih se zadrži tudi več kot 1 m vode. Problematična so predvsem območja kjer prevladuje pokritost z gozdom. Slika 25 prikazuje končno stanje gladin vode po ureditvi topografije.



Slika 24: Končne gladine toka [m] na prispevnem območju.



Slika 25: Končne gladine toka [m] na prispevnem območju po urejanju topografije.

4.4.4 Kontrolni parameter TOL

Najmanjša globina, ki jo model še modelira - TOL ima pomemben vpliv na volumen odtoka. Večje vrednosti koeficienta TOL pomenijo večje izgube in manjši odtok, in obratno. V preglednici 13 je prikazana bilanca volumnov pri različnih nastavitvah komponente TOL in nespremenljivih ostalih pogojih.

Preglednica 13: Vpliv kontrolnega parametra TOL na volumen odtoka.

Model	TOL [m]	Izgube (zadrževanje in infiltracija) [m ³]	Odtok [m ³]
M1	0.015	496857	343595
M2	0.01	414383	426071
M3	0.005	332163	508294

Za končni račun je bila izbrana vrednost 0.005 m. Ta vrednost predstavlja spodnjo mejo, pri kateri je še zagotovljena stabilnost modela.

5 ANALIZA REZULTATOV

V tem poglavju so najprej predstavljeni rezultati enodimenzijskega modela HEC-HMS (Dirnberk, 2009) in modela Flo-2D z velikostjo računskih celic 12.5 m x 12.5 m (skupaj 106817 celic) in modelirano površino 16.69 km² povodja Glinščice. Nadalje je izvedena primerjalna statistična analiza in interpretacija rezultatov za izbran padavinski dogodek januar 2004 in za padavinske dogodke z 10- in 100- letno povratno dobo in nevihte dolge 120, 720 in 1440 minut.

Statistična primerjava pretokov - izmerjenih vrednosti in izračunanih vrednosti eno- in dwo-dimenzijskega modela na odseku Glinščice pri Biološkem središču ter volumnov odtoka iz povodja Glinščice je bila ovrednotena z metodo srednjega kvadratičnega pogreška RMSE (ang. *Root mean square error method*), po enačbi:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (dQ_{izr} - dQ_{izm})^2}{n}, \quad (15)$$

kjer je:

RMSE - srednji kvadratični pogrešek (koren srednje kvadratne napake);

(dQ_{izr} - dQ_{izm}) - razlika pretokov v določenem času;

n - število časovnih intervalov.

Manjši kot je koeficient RMSE boljše je ujemanje.

5.1 Rezultati modela HEC-HMS

Preglednici 14 in 15 ter slika 26 prikazujejo rezultate umerjenega enodimenzijskega modela HEC-HMS, ki ga je pripravil Dirnberk (2009). Odstopanje modela padavinskega odtoka s programom HEC-HMS od dejanskih meritev (RMSE) je znašalo 0.27 m³/s, razlika v ujemanju izračunanega vršnega pretoka in izmerjenega je znašala 7.6 %, izračunani volumen

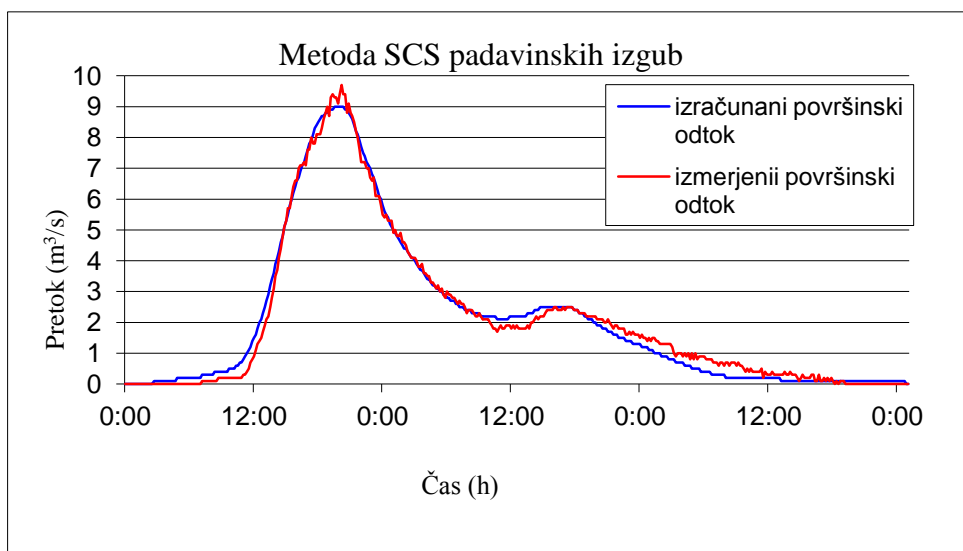
odtoka je bil za 0.3 % manjši od izmerjenega, čas izračunanega nastopa največjega odтока pa je nastopil 10 min pred izmerjenim. Ujemanje drugega vrha je zelo dobro.

Preglednica 14: Prikaz rezultatov modela HEC-HMS za posamezna podpovodja Glinščice (Dirnberk, 2009).

podpovodje	max odtok (m ³ /s)	padavinske izgube SCS CN (mm)	efektivne padavine (mm)	volumen odтока (m ³ /s)
149121	3.7	18.81	31.59	227300
149122	3.3	16.59	33.81	202400
149123	2	16.59	33.81	123700

Preglednica 15: Izračuni modela HEC-HMS in izmerjene vrednosti rezultatov končnega izтока ter koeficient RMSE (Dirnberk, 2009).

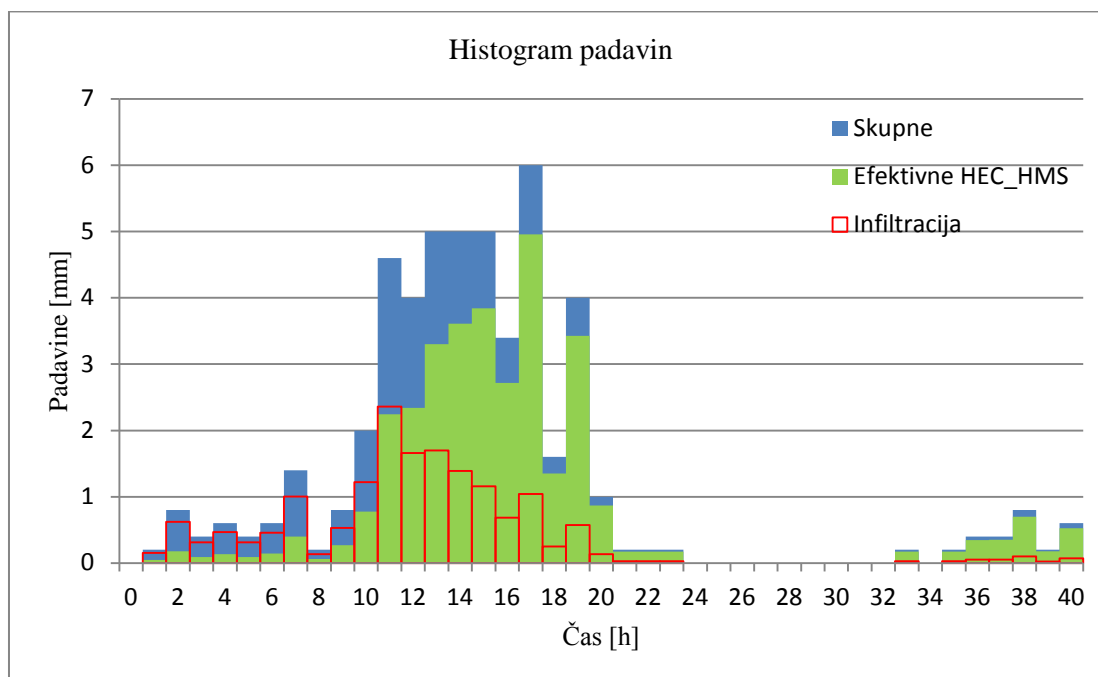
	max odtok (m ³ /s)	volumen odтока (m ³)	čas nastopa vrha odтока od pričetka nevihte	RMSE (m ³ /s)
HEC-HMS SCS metoda	9.0	553400	20:00	0.27
izmerjene vrednosti	9.74	555290	20:10	



Slika 26: Površinski odtok na iztoku iz povodja dobljen s SCS metodo padavinskih izgub (Dirnberk, 2009).

Izračunane padavinske izgube po metodi SCS CN so na začetku padavin visoke, večja kot je intenziteta padavin, večje so izgube. Po določenem času pa se izgube približujejo proti 0,

konstantnih izgub ni (Slika 27). Padavine, ki padejo 20 uri skoraj v celoti prispevajo k površinskemu odtoku.



Slika 27: Skupne padavine in izračunane izgube po SCS metodi in efektivne padavine.

Dirnberk (2009) je v svoji diplomski nalogi uporabil sintetične histograme na izbranih dogodkih z 10- in 100-letno povratno dobo za različna trajanja neviht (120, 720 in 1440 min). Za izračun padavinskih izgub je uporabil metodo začetnih in enakomernih izgub. Rezultati izračunanih vrednosti s konico na 50 % časa glede na celoten čas trajanja nevihte, so podani v preglednici 16 in slikah 29, 30, 31 in 34.

Preglednica 16: Prikaz izračunanih vrednosti za 10- in 100-letno povratno dobo (Dirnberk, 2009).

čas trajanja nevihte (min)	10 letna povratna doba			100 letna povratna doba		
	120	720	1440	120	720	1440
max odtok (m ³ /s)	22.4	30.3	32.0	35.0	44.5	46.5
volumen odtoka (m ³)	754300	1169600	1419900	1180200	1697300	2041700
čas nastopa vrha odtoka od pričetka nevihte	5:00	10:00	15:50	5:00	10:00	15:50

5.2 Rezultati modela Flo-2D

V nadaljevanju je podan podrobnejši opis modela (Preglednica 17) in rezultatov z razlago in komentarji. Najprej je analiziran zgodovinski padavinski dogodek, nadalje pa sintetične padavine z 10- in 100-letno povratno dobo.

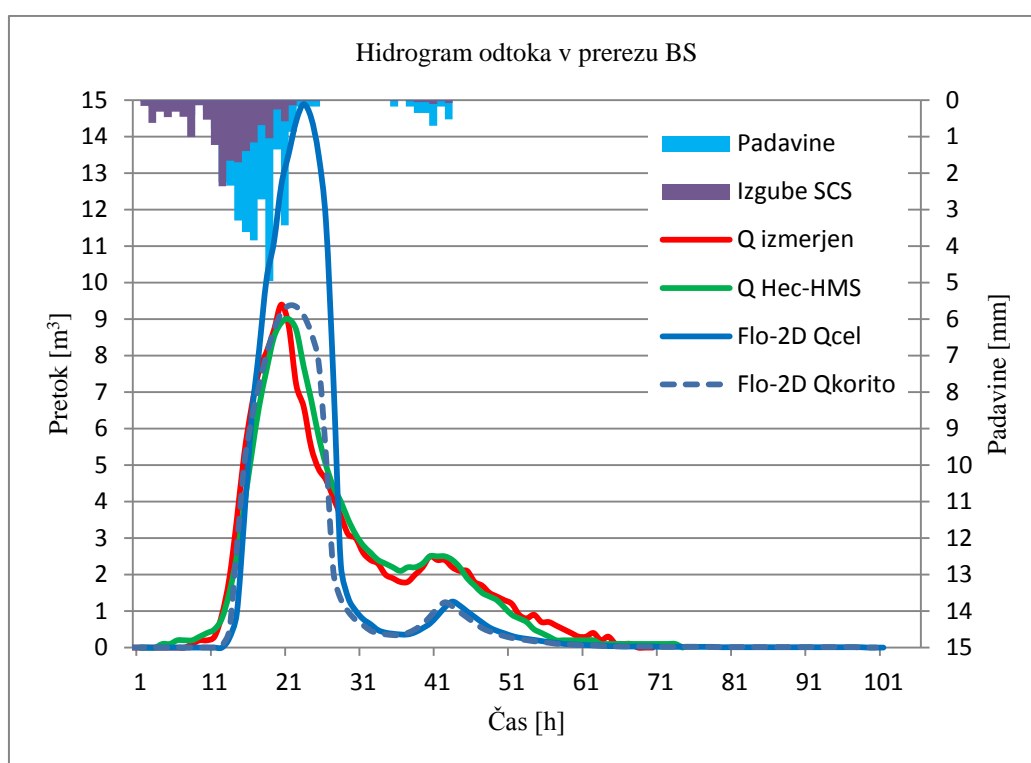
5.2.1 Opis modela in rezultatov za izmerjen dogodek

Preglednica 17: Opis in rezultati modela za zgodovinski padavinski dogodek.

Ime modela	Izmerjen padavinski dogodek
Geometrija	
Stranica računske celice (m)	12.5
Podatki o višini	GURS DMR 12.5
Število računskih celic - skupaj	106493
Število računskih celic - odtok	325
Število računskih celic - mreža	106818
Površina (m ²) mreže	16690312.5
Povprečni CN	94.18
Padavine in odtok (mm)	
a Količina padavin	50.4
b Infiltracija	11.99
c Odtok (a-b)	38.41
Volumen vtoka (m ³)	
d Padavine	838631.53
Volumen izgub (m ³)	
e Infiltracija	198840.22
f Zadrževanje	84261.16
g Skupne izgube (e+f)	283101.38
Volumen odtoka (m ³)	
h Odtok iz prispevne površine	177156.04
i Otok iz kanala struge	378374.14
j Skupni odtok	555530.18
Največji pretok (m ³ /s)	9.4
Trajanje simulacije (h)	100
Trajanje računa simulacije (h)	27.54 (R2.0)

Slika 28 prikazuje rezultate umerjenega dvodimenzijskega modela Flo-2D v primerjavi z rezultati enodimenzijskega modela HEC-HMS in rezultati meritev. Odstopanje modela padavinskega odtoka s programom Flo-2D od dejanskih meritev (RMSE) znaša $1.04 \text{ m}^3/\text{s}$, volumen odtoka je bil za 0.04 % večji od izmerjenega, čas izračunanega nastopa največjega odtoka pa je nastopil 50 min po izmerjenem.

Odstopanje modela (RMSE) padavinskega odtoka s programom Flo-2D od HEC-HMS znaša $1.03 \text{ m}^3/\text{s}$, volumen odtoka je bil za 0.38 % večji od izračuna modela HEC-HMS, čas nastopa največjega odtoka pa je nastopil 1 h po izračunanim z HEC-HMS jem.



Slika 28: Površinski odtok v prerezu pri Biološkem središču dobljen s SCS metodo padavinskih izgub.

Oblika naraščajočega dela hidrograma in vrh hidrograma se lepo ujemata z rezultati meritev in modela HEC-HMS. Zelo problematičen je padajoči del hidrograma. Voda v strugi in prispevni površini se 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 pa je nujno potrebna določena debelina padavin (konstantne izgube - TOL) za račun poplavnega vala. Zato je takšen rezultat najverjetneje posledica dejstva, da je v simulaciji dogodka padavine - odtok s programom Flo-2D upoštevano zadrževanje zaradi topografije in upoštevanje potrebne najmanjše debeline padavin, preden se začne račun pretoka med celicami. Slednje v programu HEC-HMS ni v celoti vključeno, manjši del je zajet v začetne izgube. V programu HEC-HMS je najbolj problematična ocena časa koncentracije nevihtnega odtoka vode s prispevne površine, v programu Flo2-D pa ocena Manningovih koeficientov hrapavosti.

V splošnem na obliko hidrograma poleg prostorske in časovne razporejenosti padavin vplivajo še fizične lastnosti povodja, kot so površina povodja, padec, hrapavost, skladiščne zmognosti, 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 povodja oz. razvodnice, padec terena, potek in skladiščne zmognosti znotraj vodotoka ter na poplavnem območju so določeni neposredno z digitalnim modelom višin na katere modeler nima bistvenega vpliva. Edina empirično enačba je Manningova enačba hrapavosti. V poglavju 6 je predstavljena analiza občutljivosti modela na vrednosti koeficientov hrapavosti. Rezultati te analize so pokazali, da koeficienti hrapavosti nimajo bistvenega vpliva na obliko hidrograma odtoka.

5.2.2 Sintetični histogrami

V tem delu naloge so predstavljeni rezultati modelov neviht s 100- in 10- letno povratno dobo, z uporabo sintetičnih histogramov o padavinah, vnešenih v datoteko RAIN.DAT in vgrajene možnosti za porazdelitev padavin s programom Flo-2D (Preglednica 18). Podatke o ekstremnih padavinah in povratnih dobah pripravlja Agencija za okolje in prostor (ARSO, 2009). Vhodni podatki so prikazani v preglednici 9. Povratne dobe za ekstremne padavine so izračunane po Pearson III porazdelitvi, na osnovi podatkov o intenzitetah padavin s trajanjem od 5 do 24 ur. V nalogi so uporabljeni podatki o višinah padavin v mm s trajanjem 120, 720 in 1440 minut za povratni dobi 10 in 100 let. Pri vseh primerih simulacij so se padavine

začele ob času 00:00, enako kot pri modelu HEC-HMS, ki ga je pripravil Dirnberk (2009). Geometrija, nastavitve kontrolnih in numeričnih stabilnostnih parametrov so ostale enake umirjenim na izmerjen dogodek. Rezultati vršnih pretokov in volumni odtoka so povzeti v spodnji preglednici.

Preglednica 18: Rezultati modelov neviht z 10- in 100- letno povratno dobo.

Ime modela	Sintetični histogrami					
	10-letne padavine			100-letne padavine		
Geometrija						
Stranica računske celice (m)	12.5					
Podatki o višini	GURS DMR 12.5					
Število računskih celic - skupaj	106493					
Število računskih celic - odtok	325					
Število računskih celic - mreža	106818					
Površina (m ²) mreže	16690312.5					
Povprečni CN	94.18					
	10-letne padavine			100-letne padavine		
Padavine in odtok (mm)	2 uri	12 ur	24 ur	2 uri	12 ur	24 ur
a Količina padavin	56	85	107	82	117	145
b Infiltracija	12.3	13.3	13.7	13.2	13.9	14.2
c Odtok (a-b)	43.7	71.7	93.3	68.8	103.1	130.8
Volumen vtoka (m³)						
d Padavine	931804	1414350	1780425	1364426	1946821	2412727
e Hidrogram vtoka	0	0	0	0	0	0
f Padavine in vtok (d+e)	931804	1414350	1780425	1364426	1946821	2412727
Volumen izgub (m³)						
g Infiltracija	203846	220089	227356	218931	229872	235231
h Zadrževanje	83633	84256	84296	84246	84269	84298
i Skupne izgube (g+h)	287478	304345	311652	303177	314141	319529
Volumen odtoka (m³)						
j Odtok iz prispevne površine	295270	575748	744614	628411	1011565	1242788
k Otok iz kanala struge	347934	534257	724159	432838	621116	850410
l Skupni odtok	643204	1110005	1468773	1061249	1632681	2093198
Največji pretok (m ³ /s)	24.16	33.29	36.4	41.47	51.69	53.56
Trajanje simulacije (h)	50	100	100	100	100	100
Trajanje računa simulacije (h)	6.6 (R2.0)	4.8 (R3.0)	6.3 (R3.0)	3.8 (R3.0)	5.3 (R3.0)	7.1 (R3.0)

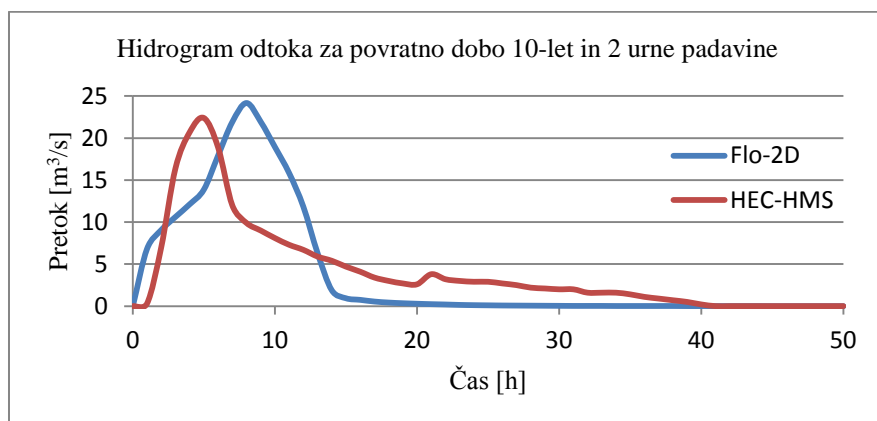
5.3 Primerjava in analiza rezultatov

Statistična primerjava pretokov - izmerjenih vrednosti in izračunanih vrednosti eno- in dvodimenzijskega modela na odseku Glinščice pri Biološkem središču ter volumnov odtoka iz povodja Glinščice je prikazana v preglednici 19.

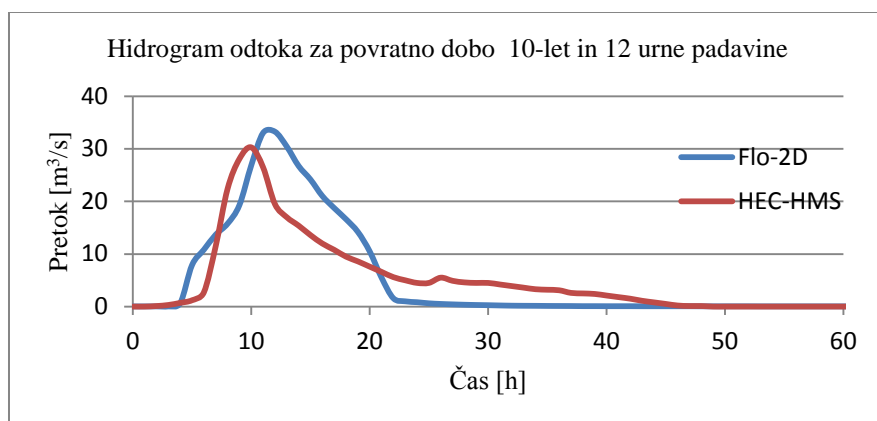
Preglednica 19: Prikaz primerjave izračunanih vrednosti dvodimenzijskega modela Flo-2D in enodimenzijskega modela HEC-HMS ter koeficientov ujemanja RMSE vršnih pretokov.

Povratna doba	Nevihta	Primerjava volumnov odtoka [m ³]		Čas nastopa vrha odtoka		RMSE pretokov [m ³ /s]
		Flo-2D	HEC-HMS	Flo-2D	HEC-HMS	Flo-2D / HEC-HMS
10-let	2-ur	643204	754300	8:00	5:00	4.61
	12-ur	1110005	1169600	12:00	10:00	4.35
	24-ur	1468773	1419900	16:00	15:50	3.69
100-let	2-ur	1061249	1180200	7:00	5:00	6.22
	12-ur	1632681	1697300	11:00	10:00	5.49
	24-ur	2093198	2041700	20:00	15:50	5.05

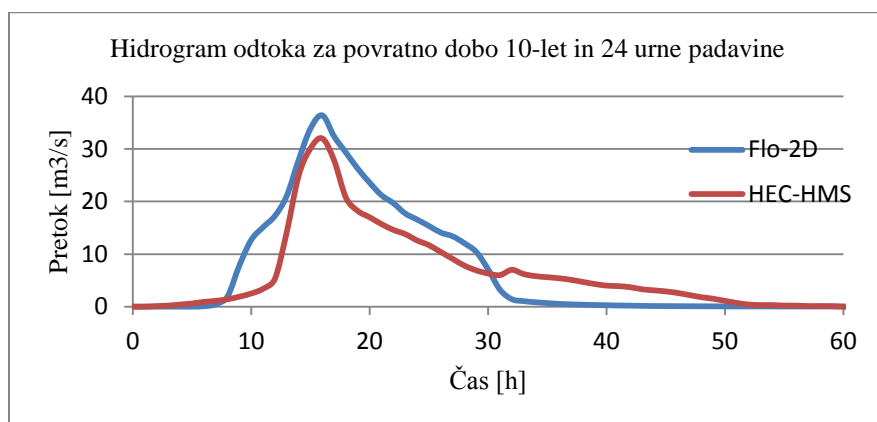
Slike 29, 30, 31, 32, 33 in 34 prikazujejo primerjavo Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za povratni dobi 10- in 100-let in različna trajanja padavin. Pretok izračunan s programom Flo-2D je v splošnem večji v povprečju za 5 m³/s, nasprotno pa velja za volumne odtoka, ki so v splošnem manjši. To ne velja v primerih, ko je trajanje padavin 24 ur. V teh dveh primerih je izračunani volumen programa Flo-2D večji od tistih, ki jih 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.



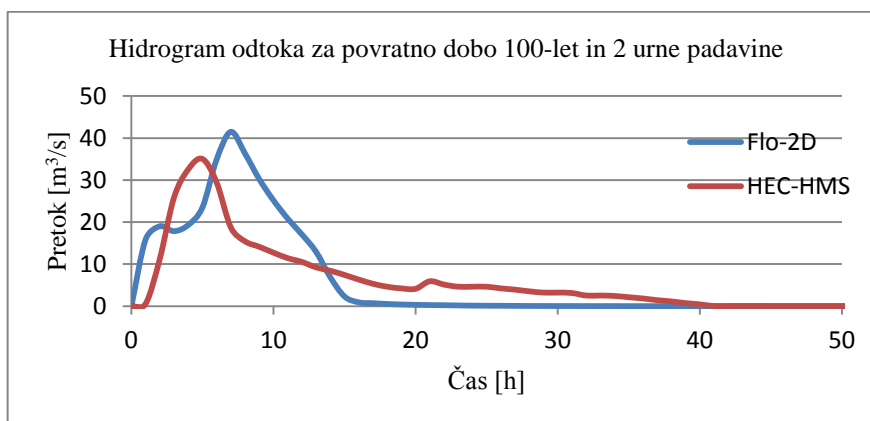
Slika 29: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine z 10-letno povratno dobo in 2-urnim trajanjem.



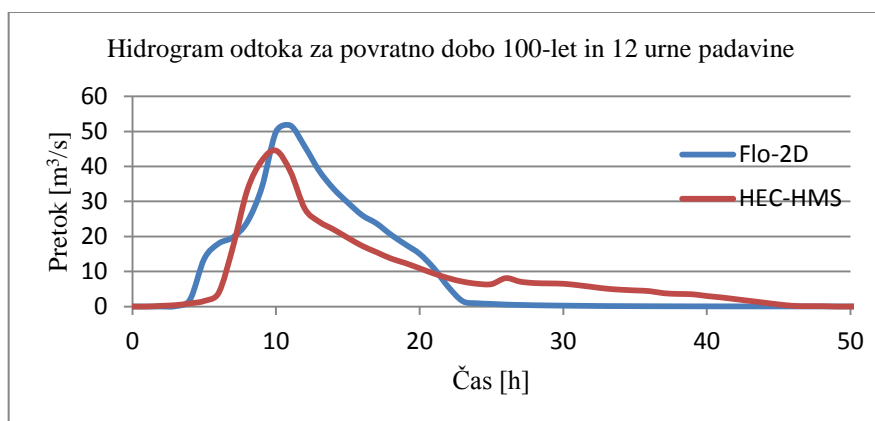
Slika 30: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine z 10-letno povratno dobo in 12-urnim trajanjem.



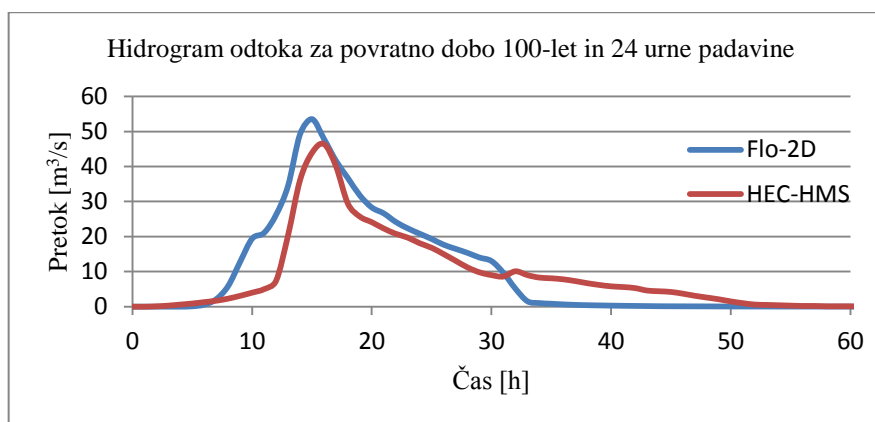
Slika 31: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine z 10-letno povratno dobo in 24-urnim trajanjem.



Slika 32: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine s 100-letno povratno dobo in 2-urnim trajanjem.



Slika 33: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine s 100-letno povratno dobo in 12-urnim trajanjem.



Slika 34: Primerjava rezultatov Flo-2D in HEC-HMS izračunanih površinskih odtokov za padavine s 100-letno povratno dobo in 24-urnim trajanjem.

6 OBČUTLJIVOST MODELA

Z namenom izboljšanja oblike hidrograma odtoka v kontrolnem prerezu in ugotovitve občutljivosti modela je bila izdelanih več modelov z različnimi nastavitvami. V tem poglavju so predstavljeni vplivi različnih nastavitvev podajanja padavin, vpliv različnih nastavitvev podajanja Manningovega koeficienta hrapavosti, vpliv nastavitvev Froudovega števila za tok v strugi, vpliv minimalne globine (TOL), ki jo program še modelira in vpliv velikosti mreže.

Pri vseh izračunih, razen za testiranje vpliva velikosti mreže, je bil uporabljen model z naslednjimi karakteristikami:

- računska mreža: 12.5 x 12.5 m (106493 računskih celic);
- geometrija struge: trapez z začetno širino dna 1.5 m in globino 1.5 m, ki se približno 500 m pred sotočjem Glinščice in Pržanca poglobi za 0.5 m in še za 0.5 m od sotočja do izliva v Gradaščico. Naklonom brežin je 1:2.5;
- padavine: padavinski dogodek , 17. 1. 2003.

6.1 Rezultati analize s komentarji

V nadaljevanju so opisani rezultati s komentarji za različne nastavitve in kombinacije parametrov podajanja padavin in koeficientov hrapavosti, nastavitve Froudovega števila za tok v strugi, komponente TOL in velikosti računske celice. Rezultati so prikazani v obliki preglednic in grafov.

6.1.1 Vpliv različnih nastavitvev za upoštevanje izgub

Vpliv različnih nastavitvev računa izgub po metodi SCS CN s programom Flo-2D je bil testiran na petih modelih.

Prvi model (MP1) je bil zagnan s celotnimi padavinami in brez računa izgub. Drugi model (MP2) je bil zagnan z efektivnimi padavinami, ki so bile rezultat HEC-HMS modela

(Dirnberk, 2009). Vhodni podatki v tretji model (MP3) so bili prostorsko spremenljivi koeficienti SCS CN, kot jih je določil Dirnberk (2009) 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). Celicam, ki so na ortofoto posnetku prepoznavne kot neprepustne površine so bile izbrane s poligoni in določene kot popolnoma blokirane (suhe) celice s funkcijo ARF. Delež blokiranih površin je bil enak deležu neprepustnih površin, ki ga je Dirnberk (2009) določil v modelu HEC-HMS.

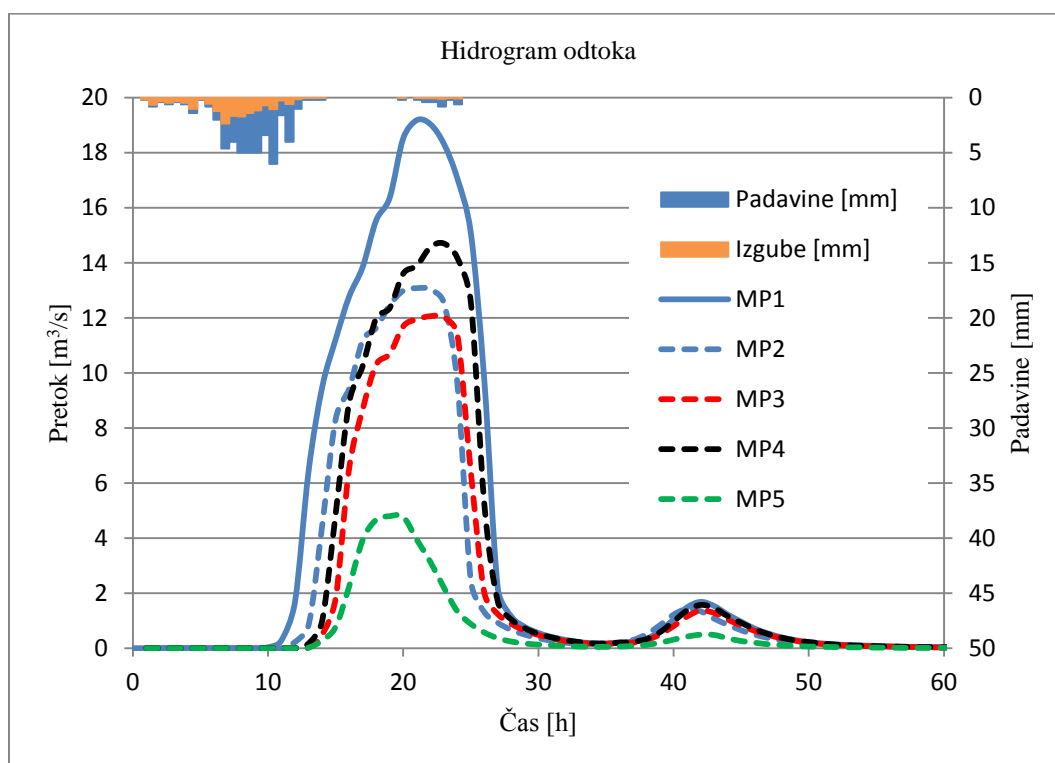
V preglednici 20 in na sliki 35 je prikazana primerjava rezultatov glede na različne nastavitve upoštevanja izgub.

Preglednica 20: Rezultati različnih nastavitvah računa izgub modela Flo-2D.

	Ime modela		MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
	Kontrolni prerez BS_87863	$Q_{koritoMAX}$	m ³ /s	8.46	8.42	8.31	8.48
Čas		h	15.33	19.36	19.98	18.1	17.65
$v_{koritoMAX}$		m/s	1.03	1.04	1.06	1.04	0.92
Čas		h	13	15	16	15	18
Skupne padavine		mm	50.40	33.81	50.40	50.40	50.40
Volumen padavin		m ³	838629	562579	838630	838632	625976
Izgube		mm	-	-	19.88	13.13	19.92
Prispevna površina		Izgube - inf	m ³	-	-	329854	217856
	Zadrževanje	m ³	85836	85833	85831	85836	232102
	Odtok	m ³	238410	96807	77466	126020	11979
Struga	Zadrževanje	m ³	480	479.20	479	480	435
	Odtok	m ³	513903	379460	345000	408440	134947
Volumen hidrograma odtoka		m ³	752313	476267	422466	534460	1469260
Čas računa		h	2.9 (R3.0)	2.9 (R3.0)	24.2 (R2.0)	25.6 (R2.0)	7.3 (R3.0)

Namen te primerjave je bilo 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 uporabo koeficienta CN enakega 94.2, se najbolj približamo izmerjenemu volumnu odtoka. Uporaba blokiranih celice 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, MP3 so v primerjavi z izmerjenim močno podcenjena. Komponente programa Flo-2D za izhodne prikaze ne omogočajo izpisa padavinskih izgub v odvisnosti od časa, zato ta primerjava ni bila izvedena. Na sliki 35 so prikazani hidrogrami odtoka za različne količine efektivnih padavin.



Slika 35: Primerjava maksimalnih pretokov v prerezu BS glede na različne možnosti upoštevanja izgub.

6.1.2 Vpliv različnih nastavitvev za določanje hrapavosti

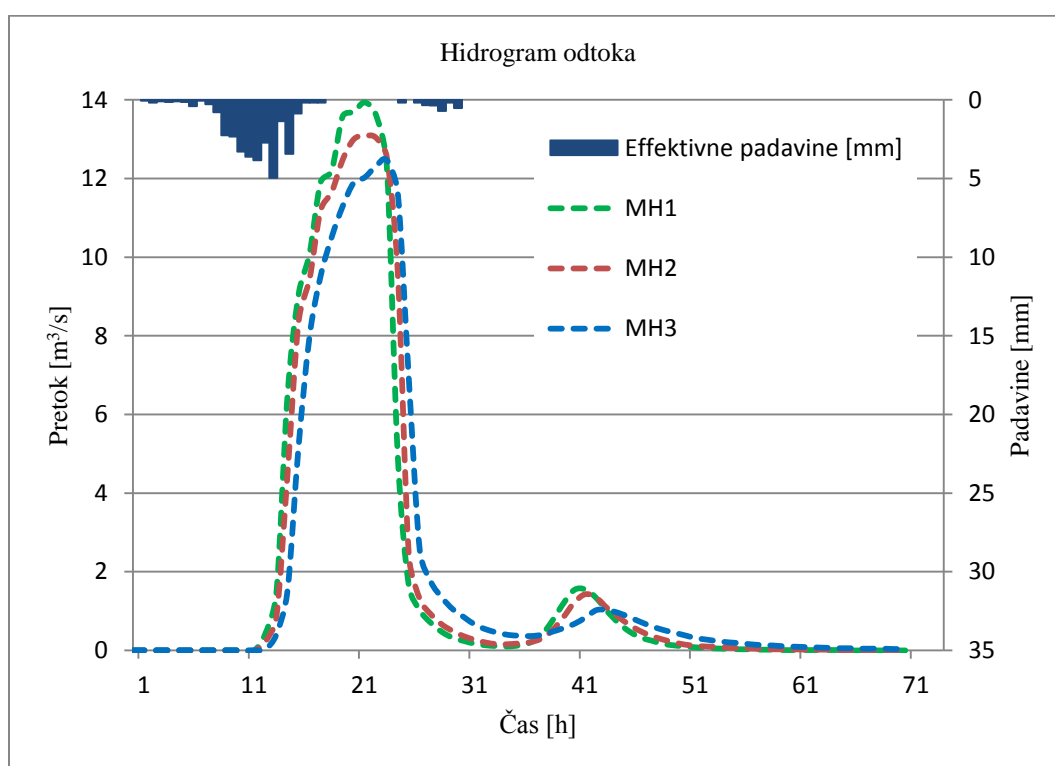
Vpliv Manningovega koeficienta hrapavosti je bil testiran na treh modelih. Pri prvem modelu (MH1) so bili določeni koeficienti hrapavosti za vsako celico posebej, glede na vrsto površine in na priporočene vrednosti koeficientov za modeliranje površinskih tokov iz literature (Preglednica 1). Uporabljene 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 in tretjem modelu so bili koeficienti hrapavosti določeni enotno, in sicer za prispevno površino na 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). V preglednici 21 je prikazana primerjava rezultatov glede na različne nastavitve računa hrapavosti.

Preglednica 21: Rezultati različnih nastavitvev računa hrapavosti modela Flo-2D.

	Ime modela		MH1	MH2	MH3
Kontrolni prerez BS_87863	$Q_{\text{koritoMAX}}$	m^3/s	8.42	8.37	8.40
	Čas	h	19.36	18.83	20.68
	$V_{\text{koritoMAX}}$	m^3/s	1.04	1.03	1.04
	Čas	h	15	15	16
	Efektivne padavine	mm	33.81	33.81	33.81
	Volumen padavin	m^3	562579	562581	562579
Prispevna površina	Zadrževanje	m^3	85833	85502	87470
	Odtok	m^3	96807	104398	85232
Struga	Zadrževanje	m^3	479	149	1097
	Odtok	m^3	379459	372531	388780
Volumen hidrograma odtoka		m^3	476268	476929	474012
Čas računa		h	4.2 (R3.0)	2.9 (R3.0)	26.9 (R2.0)

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. Zanimiva je primerjava volumnov hidrograma 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. Iz tega sledi, da imajo različne nastavitve računa hrapavosti vpliv na porazdelitev mas znotraj kontrolnega volumna in na volumen odtoka v določenem kontrolnem prerezu. Na obliko hidrograma te nastavitve nimajo pomembnega vpliva. Za boljšo predstavljenost rezultatov so na sliki 36 prikazani hidrogrami odtoka za kontrolni prerez.

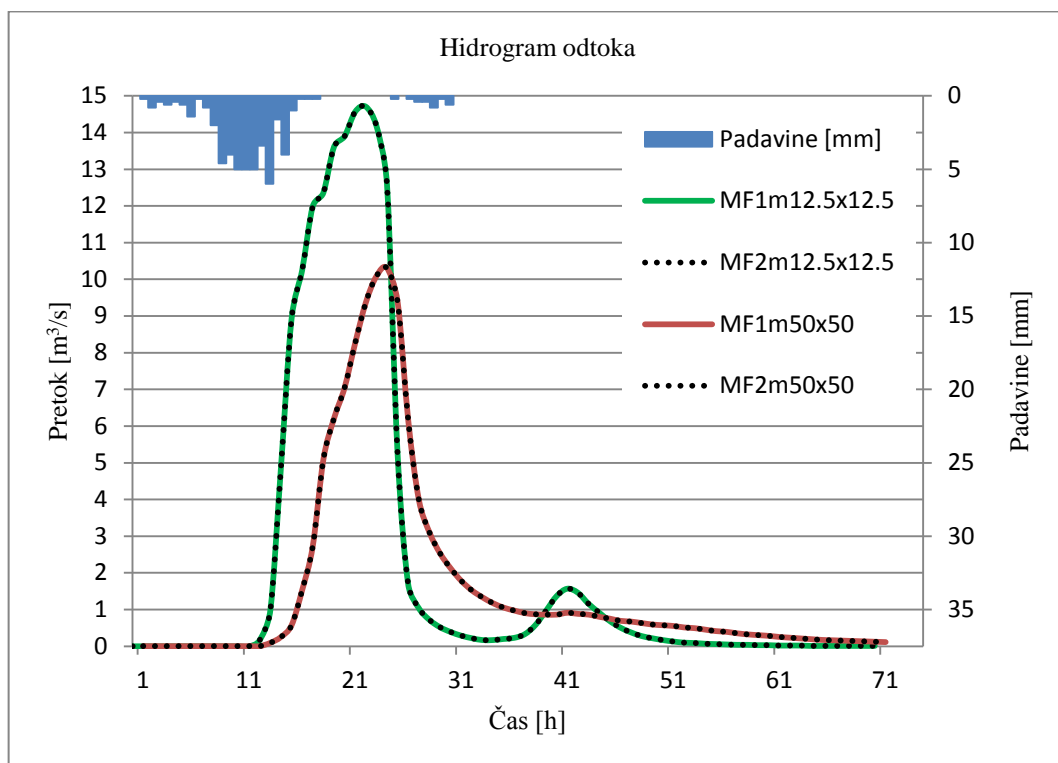


Slika 36: Primerjava vpliva koeficienta hrapavosti na maksimalne pretoke v prerezu BS.

6.1.3 Vpliv nastavitve Froudeovega števila za tok v strugi

Vpliv Froudeovega števila na vršni pretok je bil testiran na dveh modelih. Pri prvem modelu (MF1) je bilo Froudeovo število za strugo nastavljen na vrednost 0.6 (mirni tok), pri drugem modelu (MF2) pa na vrednost 1.0. Rezultati so bili pri obeh simulacijah popolnoma enaki

(Slika 37). Iz tega lahko sledi, da je nastavljen koeficient hrapavosti za strugo $n_g = 0.04$ realen. Pri mreži 50 x 50 m dobimo enako ujemanje rezultatov.



Slika 37: Primerjava vpliva Froudeovega števila na maksimalne pretoke v prerezu BS.

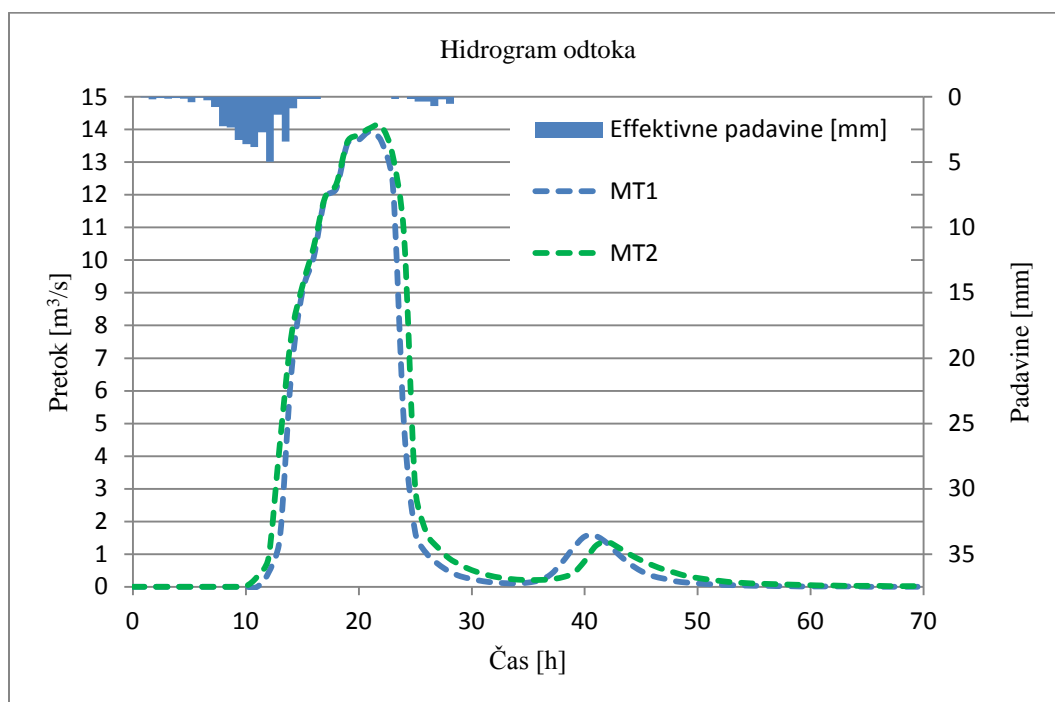
6.1.4 Vpliv parametra TOL

Vpliv parametra TOL za nastavitve minimalne globine, ki jo model še modelira je bil testiran na dveh modelih. Pri prvem modelu (MT1) je bila vrednost parametra TOL nastavljena na vrednost 5 mm, pri drugem modelu (MT2) pa na vrednost 1 mm. V preglednici Preglednica 22 Preglednica 22. Rezultati simulacije pri različnih nastavitvah parametra TOL modela Flo-2D. in na sliki Slika 38. Primerjava vpliva parametra TOL na obliko hidrograma odtoka v prerezu BS. je prikazana primerjava rezultatov glede na različne nastavitve parametra TOL.

Preglednica 22: Rezultati simulacije pri različnih nastavitvah parametra TOL modela Flo-2D.

Ime modela		MT1	MT2	
Kontrolni prez BS_87863	$Q_{koritoMAX}$	m^3/s	8.37	8.32
	Čas	h	18.83	17.91
	$V_{koritoMAX}$	m/s	1.03	1.03
	Čas	h	15	14
	Skupne padavine	mm	33.81	33.81
	Volumen padavin	m^3	562581	562579
	Izgube	mm	-	-
	Izgube - inf	m^3	-	-
Prispevna površina	Zadrževanje	m^3	85503	19390
	Odtok	m^3	104398	119439
Struga	Zadrževanje	m^3	149	694
	Odtok	m^3	372531	422686
Volumen hidrograma odtoka	m^3	476929	542126	
Čas računa	h	4.7 (R3.0)	6.3 (R3.0)	

Vpliv komponente TOL oziroma globine računa ima na volumen odtoka velik vpliv. Razlika volumnov med računi do 5 mm (MT1) in do 1 mm (MR2) znaša 12 %.

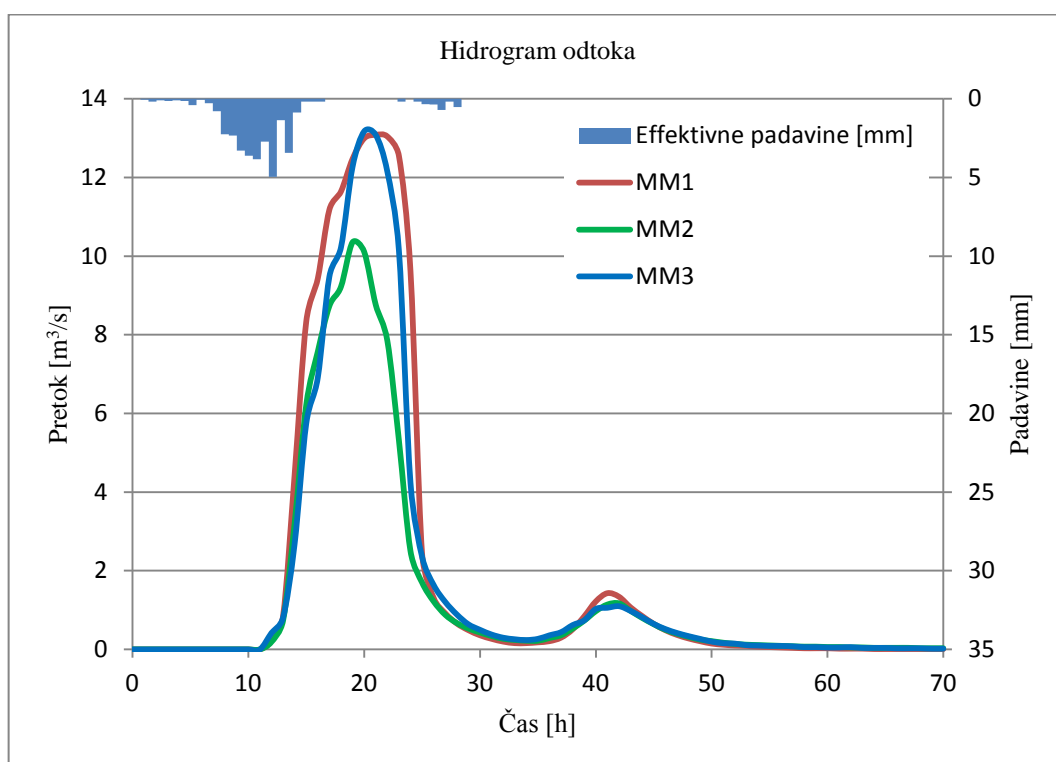


Slika 38: Primerjava vpliva parametra TOL na obliko hidrograma odtoka v prerezu BS.

6.1.5 Vpliv velikosti računske celice

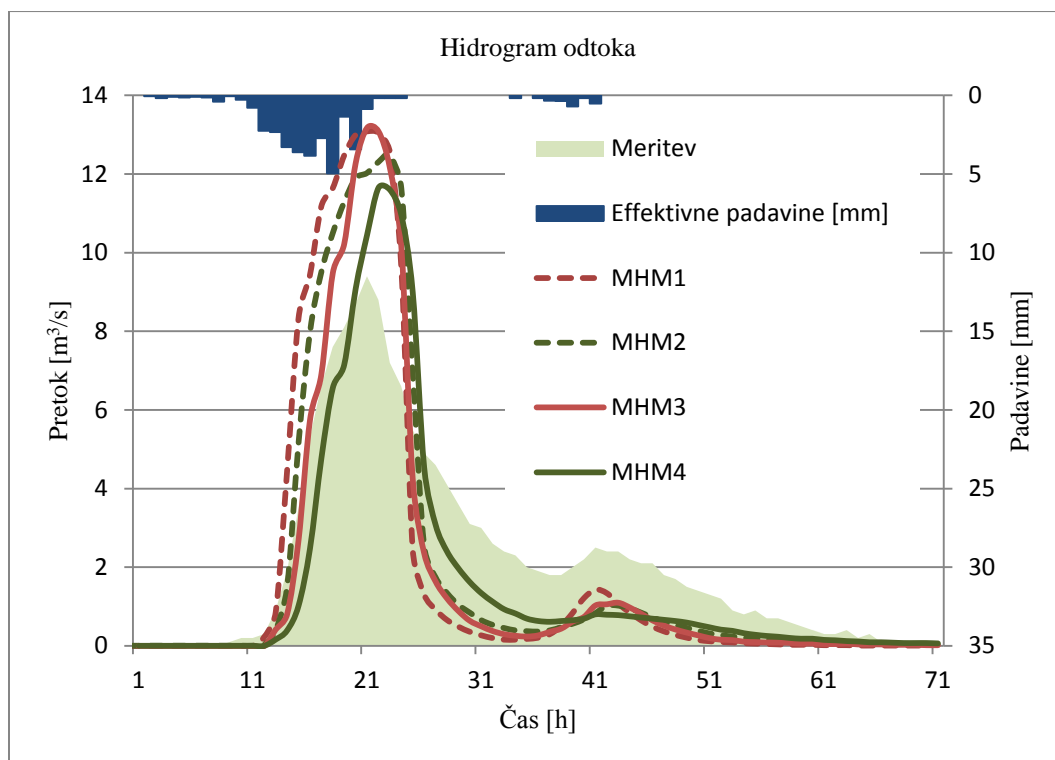
Vpliv velikosti računske celice je bil testiran na treh modelih. Pri prvem modelu (MM1) je bila velikost računske celice enaka 12.5 m, pri drugem modelu (MM2) 25 m in pri tretjem modelu (MM3) 50 m. Pri tem je potrebno omeniti, da pri mrežah s stranicama 25 m in 50 m, topografija razen zgladitve terena Koseškega bajerja ni bila dodatno ročno obdelana.

Slika 39 prikazuje rezultate vpliva velikosti računske celice na obliko hidrograma odtoka v kontrolnem prerezu. Iz slike je razvidno, da je volumen hidrograma odtoka največji pri modelu MM1 (476929 m^3), ki ima najbolj podrobno mrežo. Volumen modela MM2 je manjši za 22 % in volumen modela MM3 za 1 %. Glede oblike se mreža s stranico 50 m izkaže kot bolj ugodna v primerjavi s podrobnejšo 12.5 m, saj je konica hidrograma bolj špičasta. Glede na te rezultate je bila analizirana še odzivnost modela MM3 na spremembe koeficientov hrapavosti.



Slika 39: Vpliv velikosti računske celice na obliko hidrograma odtoka

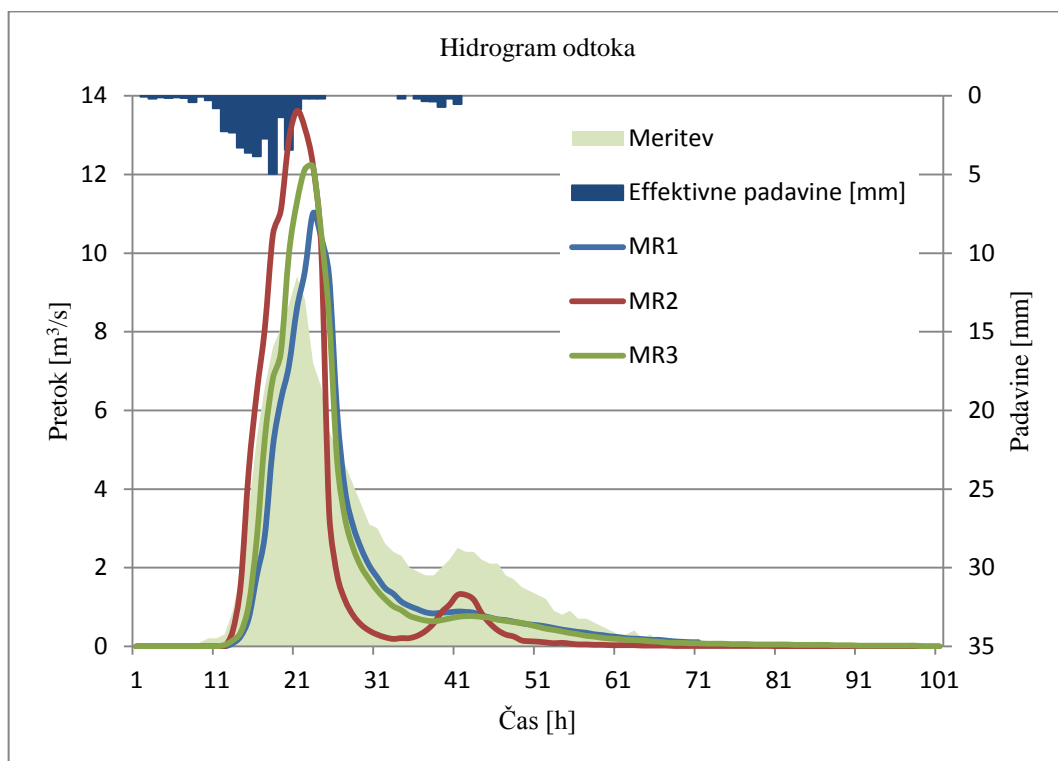
Na sliki 40 so prikazani rezultati odzivnosti modela z večjo računsko celico MHM3 in MHM4 (50 x 50 m) v primerjavi s podrobnejšo mrežo MHM1 in MHM2 (12.5 x 12.5 m) na različne koeficiente hrapavosti za plitvi tok. Pri modelih MHM1 in MH3 je bil uporabljen koeficient hrapavosti za plitvi tok 0.1, pri modelih MHM2 in MHM4 pa 0.25. Iz slike je razvidno, da je model z večjo računsko celico bolj odziven na spremembe kot model z manjšo.



Slika 40: Odzivnost modelov na spremembe koeficientov hrapavosti v odvisnosti od velikosti računske celice.

Slika 41 prikazuje rezultate modelov z mrežo 50 x 50 in različnih nastavitvev za upoštevanje hrapavosti. Pri modelu MR1 je uporabljena funkcija za račun globinsko spremenljive hrapavosti in je nastavljena na vrednost 0.4, pri modelu MR3 so poleg globinsko spremenljive hrapavosti dodatno upoštevane motnej v toku zaradi ovir s funkcijo ARF. Celicam, kjer je namenska raba tal gozd je bilo blokirane 40 % površine, celicam ki pokrivajo njive in travnike 20 % in urbanim površinam 0 %. Pri modelu MR3 je bila funkcija za račun globinsko spremenljive hrapavosti izključena, koeficienti hrapavosti pa so bili določeni prostorsko spremenljivo in enako kot je opisano v poglavju 4.1.4. Rezultati kažejo, da ima uporaba

funkcije za globinsko spremenljivo hrapavost vpliv na velikost vršnega pretoka, kot tudi na obliko padajočega dela hidrograma.



Slika 41: Odzivnost modela z mrežo 50 x 50 m na obliko hidrograma odtoka na padajočem delu.

7 ZAKLJUČKI

Odtok padavinskih vod iz naravnih in mestnih površin je odvisen predvsem od topografije terena, pokrovnosti tal oz. poraščenosti površin ter lege, položaja ulic, karakteristik izgrajenih odvodnih sistemov, meteoroloških značilnosti in številnih drugih značilnosti. Modeliranje teh odtokov poleg natančne analize lastnosti povodja, zahteva tudi ustrezne računske sheme, v katerih mora biti zajetih čimveč fizikalnih in fizičnih parametrov, ki imajo vpliv na padavinski odtok po površini. Tu pride na vrsto dvodimenzijsko matematično modeliranje in simulacija procesov, ki skokovito pridobivata na pomembnosti. Na osnovi matematičnega programa Flo-2D sem vzpostavila model povodja Glinščice, ki služi kot neka metoda za študij obnašanja sistema s pomočjo eksperimentiranja na modelu. Flo-2D je koristno orodje za analize stanja poplavne nevarnosti, pripravo kart poplavne nevarnosti območij ali načrtovanje protipoplavnih ukrepov.

Povodje je razdeljeno na elemente, za katere računamo hidrološko odvisnost v ustreznem časovnem in prostorskem zaporedju. Oblikovanost zemeljskega površja je opisana z modelom zveznih ploskev, ki so določene s končno množico višin, izmerjenih glede na srednji nivo morja - digitalni model višin (DMV). Digitalni model višin prekrijemo z mrežo kvadratnih celic. Za račun površinskega toka ima vsaka celica določene vrednosti (zaporedno številko, površino, višino in Manningov koeficient hrapavosti), z uporabo ustreznega algoritma se nato izračuna število vtočnih sosednjih celic in volumen vode. Smer toka vode je določena glede na največji nagib celice.

Največji vpliv na rezultate modela ima geometrija. Kot največja pomanjkljivost modela so se izkazali podatki o terenu. Model se je v splošnem izkazal kot zelo neobčutljiv, saj je oblika hidrograma bolj ali manj enaka.

Infiltracijo vode v posameznih celicah Flo-2D računa s pomočjo SCS model 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. Preostale (efektivne) padavine so v vsaki

računski celici transformirane v odtok s pomočjo osnovnih enačb (kontinuitetna in dinamična enačba) in z ohranjanjem prostornine tekočine. Za reševanje sistema dveh enačb je uporabljena centralna numerična shema končnih razlik. Za izračun toka po strugi in toka po ulicah se uporablja poenostavljena verzija kinematičnih enačb toka. Razlika med umerjenimi vrednostmi koeficienta izgub SCS SN za 1D (HEC-HMS) in 2D (Flo-2D) model je posledica različnega matematičnega opisa in numeričnega modela.

Izračunani volumen odtoka se dobro ujema z izmerjenim. Največje odstopanje se pojavi pri obliki poplavnega vala. To odstopanje je najverjetneje posledica geometrije, saj s spreminjanjem vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti n_g za strugo in prispevno območje nisem dosegla boljšega ujemanja. Slednje pomeni, da model padavinskega odtoka na spreminjanje parametrov hrapavosti ni bistveno občutljiv. Ima pa vpliv na povečanje vršnega pretoka. Izračunani pretok je nekoliko višji od rezultatov programa HEC-HMS, kar pomeni da smo na varni strani.

Za modeliranje dogodkov z 10- in 100-letno povratno dobo sem uporabila enako geometrijo, kontrolne in numerične stabilnostne parametre, kot za umerjen model. Izračunani vršni pretoki so v povprečju za $5 \text{ m}^3/\text{s}$ večji od tistih izračunanih s programom HEC-HMS.

Prednost Flo-2D modela je geometrijski opis študijskega območja in ustrezna matematično fizikalna izhodišča.

Za natančnejšo določitev ogroženosti bi morali v model vključiti natančnejšo geodetsko izmero struge Glinščice in Pržanca. Rezultati naloge se pokazali, da lahko na podlagi javno dostopnih podatkov o reliefu (digitalni model višin, Geodetska uprava Republike Slovenije) in podatkov o padavinah (Agencija Republike Slovenije za okolje) dobimo primerljive rezultate padavinskega odtoka v primerjavi z rezultati programa HEC-HMS. Naloga pa je pokazala, da je za hidrološko modeliranje z 2D modelom potrebnih precej več podatkov in vloženega truda v primerjavi z 1D modelom. Tudi umerjanje je dolgotrajnejše in težje. Pri čemer so ključnega pomena izkušnje modelerja.

Pri pripravi podatkov topografije za vhod v model ima pomembno vlogo GIS (geografski informacijski sistem) in LIDAR tehnologija. Ta omogoča dobro podlago za pripravo geometrije rečnega korita, poplavnih površin in določanje notranjih in robnih pogojev modeliranja. GIS pa predvsem izboljša natančnost in ločljivost izrisa poplavnih linij in razporeditev hitrosti vodnega toka v prostoru.

VIRI

ARSO. 2009. Povratne dobe za ekstremne padavine po Gumbelovi metodi. ARSO, Ljubljana: 67 str.

http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_variable/precip-return-periods_2008.pdf (pridobljeno 20. 7. 2011)

Brilly, M., Rusjan, S., Vidmar, A. 2006. Monitoring the impact of urbanisation on the Glinscica stream. *Physics and Chemistry of the Earth* 31, 17: 1089–1096.

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W. 1988. *Applied Hydrology*. Priročnik, McGraw - Hill, New York: 572 str.

Četina, M., Krzyk, M. 2003. Dvodimenzijsko modeliranje gibanja drobirskega toka v Logu pod Mangartom kot primer nenewtonske tekočine. *Strojniški vestnik* 49, 3: str. 161–172.

Design event. 2010.

http://www.hkh-friend.net.np/rhdc/training/lectures/HEGGEN/Event_2.pdf (pridobljeno 13. 8. 2010).

DHD modeliranje, projektiranje in meritve v hidrotehniko d.o.o. 2010.

<http://www.dhd.si/model.html> (pridobljeno 15. 8. 2010).

Dirnberk, L. 2009. Vpliv histograma padavin na hidrogram odtoka. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo : 86 str.

Dirnberk, L., Šraj, M. 2010. Hidrološko modeliranje: Vpliv histograma padavin na hidrogram površinskega odtoka. *Gradbeni vestnik* 59, 3: str. 48–56.

Hojnik, T. 2009. Karte poplavne in erozijske nevarnosti ter omilitveni ukrepi. V: 20. Mišičev vodarski dan 2009. Vodnogospodarski biro. Maribor: str. 131–137.

Hojnik, T. Določanje Manningovega koeficienta hrapavosti. Osebna komunikacija (29. 4. 2011).

Hydrology. 2009. Drainage Design Manual for Maricopa County. Fourth edition. Flood Control District of Maricopa County. Chapter 2, str. 1–19, Chapter 4, str. 1–22. <http://www.fcd.maricopa.gov/Pub/Manuals/downloads/HydrologyManual.pdf> (pridobljeno 10. 8. 2010).

Julien, P.Y. 2002. River Mechanics. Cambridge University Press. Cambridge.

Krivograd Klemenčič, A. 2002. Alge Koseškega bajerja in Sotelskega jezera, dveh evtrofnih jezer v Sloveniji. Natura Slovenije 4, 2: str. 5–19.

Kuzma, V. 2003. Analiza stanja površinskih voda v urbanem okolju. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 106 str.

O'Brien, J. S. 2009a. Flo-2D, Data input manual 2009, Flo-2D Software, Inc.: 162 str.

O'Brien, J. S. 2009b. Flo-2D, GDS Manual 2009, Flo-2D Software, Inc.: 152 str.

O'Brien, J. S. 2009c. Flo-2D, Handouts: Pocket Guide, Flo-2D Software, Inc.: 51 str.

O'Brien, J. S. 2009d. Flo-2D, Reference Manual, Version 2009, Flo-2D Software, Inc.: 63 str.

O'Brien J. S. in Fullerton, W. T., 1999. Simulation of Rio Grande Floodplain Inundation Using Flo-2D, USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-7: str. 52–60.

Okoljsko poročilo za občinski podrobni prostorski načrt za območje zadrževalnika Brdnikova. 2010. Ljubljana, E - net okolje, d.o.o., str. 35–57.

Podobnikar, T. 2008. Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki. Geodetski vestnik 52, 4: str. 834–853.

Prus, A. Pedološke značilnosti prispevnega območja Glinščice. Osebna komunikacija (31. 3. 2011).

Rothenberg, J., William, L. E., Loparo, K. A., Nelson, N.R. 1989. The Nature of Modeling in Artificial Intelligence, Simulation, and Modeling. New York, John Wileyand Sons, Inc.: str. 75–92.

Rusjan, S. 2003. Sonaravno urejanje vodotokov - primer ureditve odseka Glinščice na območju Viča, Ljubljana. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva: 83 str.

Sharp, P. I. 2008. Two - Dimensional Flow Analysis Report for the Lee Moore Wash Basin Management studyin Pima County Arizona. Arizona, JE Fuller Hydrology & Geomorphology Inc.: 101 str.

Sodnik, J. 2009. Matematično modeliranje drobirskih tokov in priprava podrobnih kart nevarnosti. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: str. 21–42.

Stepančič, D., Lobnik, F., Prus, T. 1982. Pedološke raziskave melioracijskega objekta Laboratorijsko polje. Biotehniška fakulteta v Ljubljani, VTOZD za agronomijo, Ljubljana: 8 str.

Škrbec, G. 2005. Hidrološki model Glinščice z Gradaščico. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva: 99 str.

Šraj, M. Količina padavin pri povratnih dobah ekstremnih padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad v obdobju 1948–2007. Sporočilo za: Pestotnik, S. januar 2011. Osebna komunikacija.

Šraj, M. 2000. Uporaba šifranta padavinskih območij vodotokov RS za pripravo hidroloških modelov. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 109 str.

Štajdohar, M. 2005. Analiza vpliva urbanizacije na režim odtoka Glinščice. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva: 92 str.