

HIDROLOŠKO MODELIRANJE: VPLIV HISTOGRAMA PADAVIN NA HIDROGRAM POVRŠINSKEGA ODTOKA

HYDROLOGICAL MODELLING: THE INFLUENCE OF PRECIPITATION HYETOGRAPH ON RUNOFF HYDROGRAPH

Luka Dirnbek, univ. dipl. inž. grad.

KOSTAK, Komunalno-stavbno podjetje, d. d.,
Leskovškova cesta 2 a, Krško

doc. dr. Mojca Šraj, univ. dipl. inž. grad.

UL FGG, Jamova 2, Ljubljana, mojca.sraj@fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek

UDK: 556.12:556.16

Povzetek | V prikazani študiji smo z umerjenim modelom padavinskega območja Glinščice (HEC-HMS) ugotavljali vpliv histograma efektivnih padavin na hidrogram odtoka. Analizirali smo vpliv šestih različnih metod izračuna padavinskih izgub, vpliv razporeditve sintetičnega histograma padavin in položaja konice histograma padavin na hidrogram padavinskega odtoka. Rezultati so pokazali, da izbira metode izračuna izgub v našem primeru nima velikega vpliva na hidrogram odtoka, zato pa ima velik vpliv na konico in čas pojava konice izbira sintetičnega histograma padavin oz. časovna razporeditev vhodnega histograma z določeno povratno dobo pri daljših trajanjih padavin. Spreminjanje položaja konice histograma je pokazalo, da le-ta bistveno vpliva na čas pojava konice in tudi na samo višino konice.

Summary | The present research investigates the effect of the rainfall excess hyetograph on modeled hydrograph with the use of calibrated model (HEC-HMS) of the Glinščica watershed. The influence of six different models of rainfall loss, the temporal pattern of synthetic hyetograph and different positions of the maximum intensity were analysed. The results showed that all six models of rainfall loss in our study gave applicable and comparable results. The use of different temporal pattern of synthetic hyetograph showed that there was no significant influence on runoff hydrograph by short rainfall durations, but extending of the rainfall duration caused considerable increasing of the difference in peak discharge and time to peak. Changing the maximum rainfall position caused the essential differences in time to peak of resulted hydrographs and also differences in peak discharge were established.

1 • UVOD

Proces padavinskega odtoka je kompleksen pojav, ki ga je težko točno simulirati. V projektantski praksi se zahteva razumna točnost določitve osnovnih lastnosti hidrograma od-

toka, predvsem konice in volumna odtoka. Problem nastopi predvsem pri nemerjenih povodjih in pri določanju konic z določeno povratno dobo – projektnih pretokov. Pro-

jektalni pretoki se po navadi določajo s pomočjo sintetičnih histogramov padavin z določeno povratno dobo in trajanjem, dobljenih na podlagi natančne statistične analize padavinskih dogodkov za čim daljše obdobje meritev. Na ta način dobimo odvisnost med intenziteto, trajanjem in povratno dobo. Pravilna predstavitev sintetičnih padavin je bistvenega pomena za

modele padavinskega odtoka ((Ball, 1994), (El-Jabi, 1991), (Lambourne, 1987)). V prikazani študiji smo poskušali z umerjenim modelom padavinskega odtoka (HEC-HMS)

ugotoviti vpliv histograma učinkovitih padavin na hidrogram odtoka. Model je bil narejen za merjeno padavinsko območje Glinščice. Ugotavljali smo vpliv izbire metode izračuna pa-

davinskih izgub, vpliv porazdelitve sintetičnega histograma padavin in vpliv položaja konice sintetičnega histograma padavin za različna trajanja in povratne dobe.

2 • OBRAVNAVANO OBMOČJE

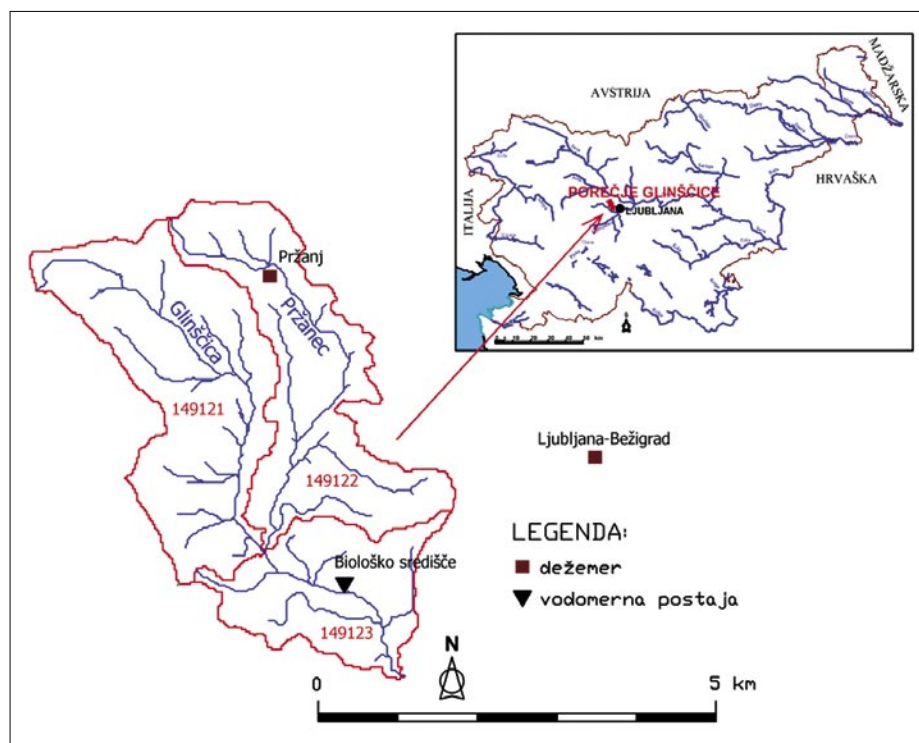
Padavinsko območje Glinščice (slika 1) je eno od treh eksperimentalnih porečij v Sloveniji. Eksperimentalna porečja rek Dragonje, Reke in Gradaščice z Glinščico so danes eksperimentalna osnova razvoja hidrologije, tudi v mednarodnem pomenu ((Brilly, 2006a), (Globevnik, 2004), (Petan, 2008), (Petkovšek, 2004), (Rusjan, 2008), (Šraj, 2008a), (Šraj, 2008b)). Omenjena porečja so opremljena s sodobno opremo za merjenje padavin, pretokov vode, erozijskih pojavov in kakovosti vode. Oprema in meritve omogočajo testiranje novih instrumentov in razvoj metod za izvajanje terenskih hidroloških meritev.

Vodotok Glinščica izvira pod severovzhodnimi obronki Toškega čela in pri Podutiku preide v ravninski del Ljubljanske kotline. Topografsko je porečje sestavljeno iz gričevnatega dela na vzhodu in zahodu ter ravninskega dela, ki se razširi v južnem delu. Relief porečja Glinščice je precej raznolik od strmih povirnih območij do ravnice. Ravninski del porečja je slabo prepusten. Povirje Glinščice sega na severni strani v pobočje Toškega čela in Črnega Vrha, razvodnica na vzhodu sega v urbano območje mesta Ljubljana (Dravlje, Šiška) preko Šišenskega hriba in Rožnika do izliva v Gradaščico, ki predstavlja najjužnejšo točko porečja. Padavinsko prispevno območje Glinščice obsega 16,85 km². Položaj odvodnice znotraj urbanega območja določa odvodnja meteornih voda s kanalizacijskim sistemom, zato orografska razvodnica ne sovпада vedno s prispevnim območjem

Glinščice. Večji pritok Glinščice je Pržanec, ki odvaja vodo s pretežno ravninskega dela vzhodno od Glinščice. Porečje Glinščice je razdeljeno na tri prispevna območja na 6. nivoju šifranta padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije (Šraj, 2001). Večji del porečja Glinščice pokriva gozd (48,6 %),

sledijo kmetijske površine (22 %), ostalo pa so urbanizirane površine (10,6 %) (Brilly, 2006a). Zemljine porečja so po klasifikaciji SCS (U.S. Army Corps of Engineers, 2000) pretežno tipa C in D z nizko stopnjo infiltracije.

Porečje Glinščice je opremljeno z avtomatskim dežemerom (Onset RG2-M) v Pržanju, z Dopplerjevim merilcem hitrosti in gladin vode (Starflow Unidata 6526 model) pri Biološkem središču ter sondo za terensko merjenje kvalitete vode (Hydrolab DataSonder 4).



Slika 1 • Porečje Glinščice

3 • METODE

3.1 Hidrološki model

Programski paket HEC-HMS je razvil Hidrološki inženirski center (HEC) ameriške vojske (US Army Corps of Engineers, 2000) in je v bistvu spremenjena različica programa HEC-1, ki je bil razvit za okolje DOS in so ga predstavili že leta 1968. Program HEC-1 je eden najstarejših in najbolj znanih programov za

simulacijo padavinskega odtoka s povodja. Nova različica programa HEC-HMS je prilagojena novi računalniški opremi in delu z okni (HEC-HMS, 2009). Program je v osnovi namenjen modeliranju padavinskega odtoka s povodij. Vključuje tako naravni in umetni odtok s povodij kot zaloge vode na velikih rečnih povodjih ter poplave. Izračunane hidrograme

v programu lahko uporabimo neposredno ali v povezavi z drugo programsko opremo za različne študije, kot so napovedovanje poplav in vodnih zalog, določanje projektnih pretokov in visokovodnih konic, ugotavljanje odtoka s povodij, modeliranje pregrad in propustov, študije vpliva bodoče urbanizacije in podobno (Brilly, 2006b).

V HEC-HMS je vključenih več modelov za izračun padavinskih izgub, s katerimi program izračuna histogram učinkovitih padavin. Efektivne padavine pa transformiramo v odtok z

empiričnimi modeli hidrograma enote ali s konceptualno metodo kinematičnih valov. Za transformacijo je bila v modelu Glinščice uporabljena metoda hidrograma enote, dobljenega iz meritev. Model je bil predhodno umerjen in nato primerjan z izbranim merjenim hidrogramom (november, 2003). Pripadajoče padavine so trajale 40 ur z največjo intenziteto 6 mm/h. Celotna količina padavin je bila 50,4 mm.

3.2 Modeli padavinskih izgub

Padavinske izgube so del padavin, ki so prestrežene, infiltrirane ali akumulirane na površini in ne prispevajo k površinskemu odtoku. Preostale padavine so učinkovite padavine, ki so enakomerno porazdeljene po povodju in predstavljajo površinski odtok (Brilly, 2006b).

Za račun padavinskih izgub program HEC-HMS uporablja naslednje metode:

1. model začetnih in enakomernih izgub,
2. model deficita in enakomernih izgub,
3. model SCS,
4. eksponentno metodo,
5. Green-Amptov model,
6. Smith-Parlangeov model,
7. model stalnega računa vlažnosti zemljine (SMA),
8. mrežasti model SCS,
9. mrežasti model deficita in enakomernih izgub,
10. mrežasti model stalnega računa vlažnosti zemljine (SMA).

Z zgoraj naštetimi metodami izračunamo izgube padavin za vsak računski interval. Izgube se nanašajo na višino padavin v določenem časovnem obdobju. Izbira metode za izračun izgub in ocena parametrov sta lahko kritična koraka pri modeliranju.

V nadaljevanju je predstavljenih šest najpogostejše uporabljenih metod za izračun padavinskih izgub, ki smo jih aplicirali na povodju Glinščice. Za metode, ki niso vgrajene v program HEC-HMS, so bile izgube izračunane ročno s programom MS Excel.

3.2.1 Model infiltracijskega indeksa Φ

Je najpreprostejša metoda računanja padavinskih izgub. Infiltracijo obravnavamo kot konstantno skozi celoten padavinski dogodek. Količina infiltracije je odvisna le od infiltracijskega indeksa Φ (Brilly, 2006b). Program HEC-HMS nima možnosti uporabe metode infiltracijskega indeksa. Ker metoda predvideva enakomerne izgube skozi celoten padavinski dogodek, je bila v programu uporabljena metoda začetnih in enakomernih izgub, z

enakimi začetnimi izgubami kot v vseh ostalih časovnih intervalih. Vrednost Φ -indeksa v naši študiji je bila določena kot razlika med izmerjenim volumnom padavin in izmerjenim volumnom odtoka s prispevne površine Glinščice. Dobljena vrednost Φ -indeksa je 0,778 mm/h (Dirnbek, 2009). Razmerje med padavinami in izgubami je prikazano na sliki 2.

3.2.2 Hortonov model

Hortonov empirični model infiltracijskih izgub je eden najstarejših in najpogostejše uporabljenih infiltracijskih modelov. Horton je model razvil v zgodnjih tridesetih letih prejšnjega stoletja (Horton, 1939). Ugotovil je, da se sposobnost infiltracije zmanjšuje skoraj eksponentno od neke začetne vrednosti f_0 do končne konstantne vrednosti f_c :

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

kjer f predstavlja infiltracijo v času t in k konstanto, ki predstavlja zmanjšanje infiltracijske kapacitete. Hortonov model je postal osnova za razvoj drugih modelov. Program HEC-HMS nima možnosti izbire Hortonove metode, zato je bil izračun izgub in odtoka izveden ročno s programom MS Excel. Uporabljeni parametri so prikazani v preglednici 1 in rezultati izračuna na sliki 2.

Vodobirna površina	149121	149122	149123
Površina (km ²)	7,20	5,99	3,66
f_0 (mm/h)	7,60	7,60	7,60
f_c (mm/h)	0,65	1,3	0,65
k (1/h)	2,00	2,00	2,00

Preglednica 1 • Uporabljeni parametri Hortonovega infiltracijskega modela za prispevne površine Glinščice (Dirnbek, 2009)

3.2.3 Model začetnih in enakomernih izgub

Pogosto uporabljen model, ki se po navadi uporablja pri porečjih, za katera nam primanjkuje podatkov o lastnostih zemljin. Potrebujemo majhno število podatkov, in sicer začetne izgube, konstantno infiltracijo in delež neprepustnega površja. Začetne izgube predstavljajo prestrežene padavine in zadrževanje vode v depresijah. Konstantno infiltracijo pa lahko ob pomanjkanju meritev določimo s pomočjo klasifikacije zemljin SCS (SCS, 1986). V preglednici 2 so podane izgube našega modela, rezultati izračuna pa na sliki 2.

Vodobirna površina	149121	149122	149123
Začetne izgube (mm)	14,10	10,17	5,62
Konstantne izgube (mm/h)	0,65	1,3	0,65

Preglednica 2 • Uporabljeni parametri modela začetnih in enakomernih izgub za prispevne površine Glinščice (Dirnbek, 2009)

3.2.4 Model padavinskih izgub SCS

Model padavinskih izgub SCS je empirični model, ki izvira iz teorije hidrograma enote. Je enostaven in stabilen model, ki se uporablja povsod po svetu, saj nam omogoča izračun izgub na nemerjenih porečjih (US Army Corps of Engineers, 2000). Parametri modela se določijo na podlagi značilnosti porečja. Agencija ameriškega ministrstva za kmetijstvo je izdelala klasifikacijo zemljin glede na njihovo prepustnost in je lastnosti zemljine opisala s koeficientom CN , ki zajema vplive pedologije, rabe tal in predhodne vlažnosti zemljine (Brilly, 2006b). Efektivne padavine izračunamo s pomočjo enačbe:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2)$$

kjer je P kumulativna količina padavin v času t , parameter I_a predstavlja začetne izgube, S pa maksimalno potencialno zadrževanje (retenzija). Maksimalno potencialno zadrževanje S in značilnosti povodja so povezani s parametrom CN kot.

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (3)$$

Vrednosti parametra CN so med 30 in 98 ((SCS, 1971), (SCS, 1986)). Parameter je odvisen od hidrološke skupine zemljin, pokrivnosti tal, hidroloških pogojev in neprepustnih površin. Parametri naše študije so podani v preglednici 3, rezultati pa na sliki 2.

Vodobirna površina	149121	149122	149123
I_a (mm)	1,2	2,4	2,4
CN	88	89	89

Preglednica 3 • Uporabljeni parametri modela SCS za prispevne površine Glinščice (Dirnbek, 2009)

3.2.5 Model Greena in Ampta

Metoda Greena in Ampta predstavlja konceptualno metodo infiltracije padavin na porečju. Analitični model infiltracijskih izgub sta razvila znanstvenika Green in Ampt leta 1911 in temelji na Darcy'jevem zakonu. Pri tem modelu uporabimo za začetne pogoje primanjkljaj vlažnosti do zasičenosti. Ta deficit je ocenjen z razliko med poroznostjo zemljine in prostornino vode, ki je prisotna na začetku v zemljini. Za poroznost ne vzamemo celotne poroznosti zemljine, ampak moramo vzeti del poroznosti, ki je prisotna pri infiltraciji. Tako moramo v modelu določiti sposobnost vsrkavanja zemljine, ki je odvisna od strukture zemljine. Poznati moramo vse lastnosti hidravlične prevodnosti, ki jih lahko določimo iz geoloških raziskav terena in teksture zemljine (US Army Corps of Engineers, 2008). Pri modelu so vse enačbe dobljene na podlagi predpostavke, da se voda infiltrira v relativno suho zemljino pri nevihti z ostro konico maksimalnih padavin. Končne izgube padavin na prepustni površini se izračuna kot:

$$f = K \left[\frac{1 + (\Phi - \theta_i) \cdot S_f}{F_t} \right] \quad (4)$$

kjer je K zasičena hidravlična prevodnost, $(\Phi - \theta_i)$ je volumen deficita vlažnosti, S_f je sesanje vlažne fronte in F_t so kumulativne izgube v času t . Z naraščanjem časa infiltracija f pada. V programu HEC-HMS je Greenov in Amptov model konceptualni model, ki vključuje tudi začetne izgube, ki drugače niso vključene v osnovni model (US Army Corps of Engineers, 2000). Ocenjeni vhodni parametri za prispevno območje Glinščice so podani v preglednici 4 in rezultati na sliki 2.

Vodobirna površina	149121	149122	149123
Začetne izgube (mm)	14,10	10,17	5,62
Volumen deficita vlažnosti	0	0	0
Sesanje vlažne fronte (mm)	714	636	714
Hidravlična prevodnost (mm/h)	0,6	1,2	0,6

Preglednica 4 • Uporabljeni parametri Green-Amptovega modela za prispevne površine Glinščice (Dirnbek, 2009)

3.2.6 Smith-Parlangov model

Smith-Parlangov model temelji na Richardsovi enačbi infiltracije. Potencialna infiltracija f se računa po enačbi:

$$f = K_s \frac{\exp(f_{cum} / B)}{\exp(f_{cum} / B) - 1} \quad (5)$$

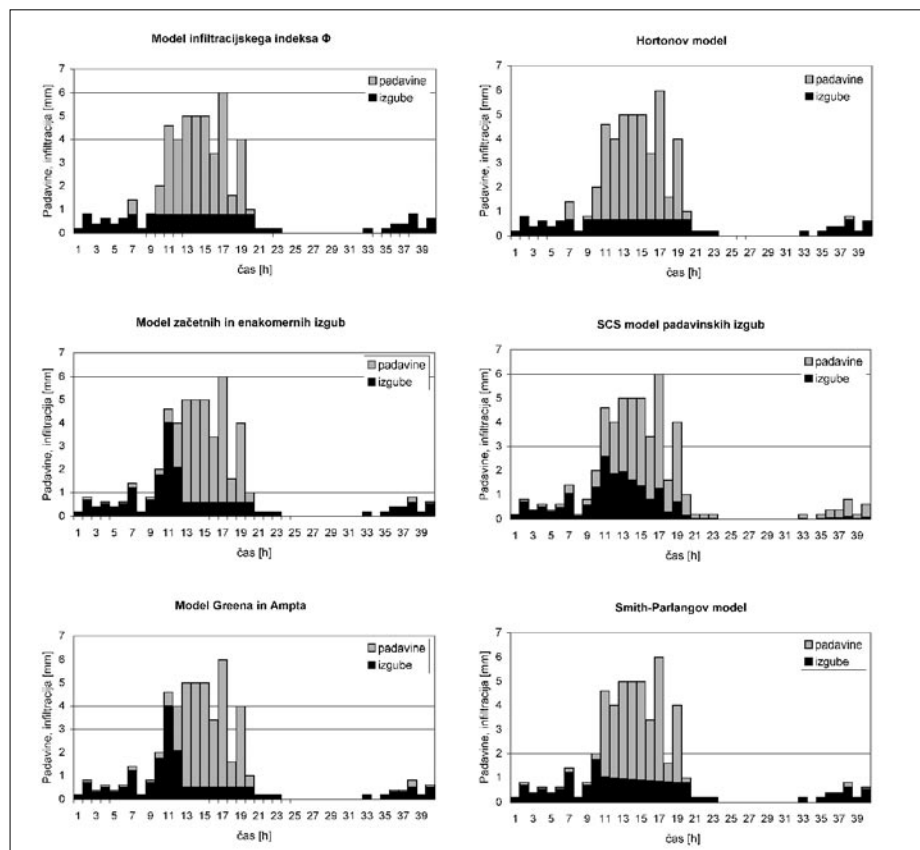
kjer je K_s efektivna zasičena hidravlična prevodnost v časovnem koraku, f_{cum} je kumulativna infiltracija od začetka padavin in B je parameter deficita zasičenosti, ki upošteva efektivni kapilarni dvig in deficit zasičenosti zemljine.

Kot vhodne podatke za model HEC-HMS potrebujemo začetno količino vode v zemljini, preostanek vode, zasičeno količino vode, pritisk vpijanja, porazdeljenost por v zemljini, prevodnost, delež neprepustnega površja, koeficient temperature in koeficient zemljine (preglednica 5). Začetno količino vode določimo kot volumensko razmerje glede na količino padavin. Poznati moramo tudi količino vode, ki se je zadržala v zemljini po končanem dreniranju. Njeno vrednost dobimo z laboratorijskimi raziskavami ali z oceno, ki jo določimo s pomočjo podatkov o teksturi zemljine. Maksimalna sposobnost zadrževanja vode se po

navadi privzame kot enaka poroznosti zemljine. Pritisk zaradi vpijanja se določi na podlagi teksture zemljine. Tekstura vpliva tudi na količino in porazdeljenost por v zemljini ter hidravlično prevodnost. Hidravlična prevodnost predstavlja efektivno zasičeno prevodnost, ki je posledica efektivnih padavin. Vhodni parametri modela HEC-HMS so podani v preglednici 5 in rezultati na sliki 2.

Vodobirna površina	149121	149122	149123
Začetna količina vode	0,415	0,415	0,415
Preostanek zasičenosti	0,09	0,109	0,09
Poroznost	0,475	0,43	0,475
Pritisk vpijanja (mm)	856	794,8	856
Porazdeljenost por	0,165	0,223	0,165
Hidravlična prevodnost (mm/h)	0,6	1,2	0,6

Preglednica 5 • Uporabljeni parametri Smith-Parlangovega modela za prispevne površine Glinščice (Dirnbek, 2009)



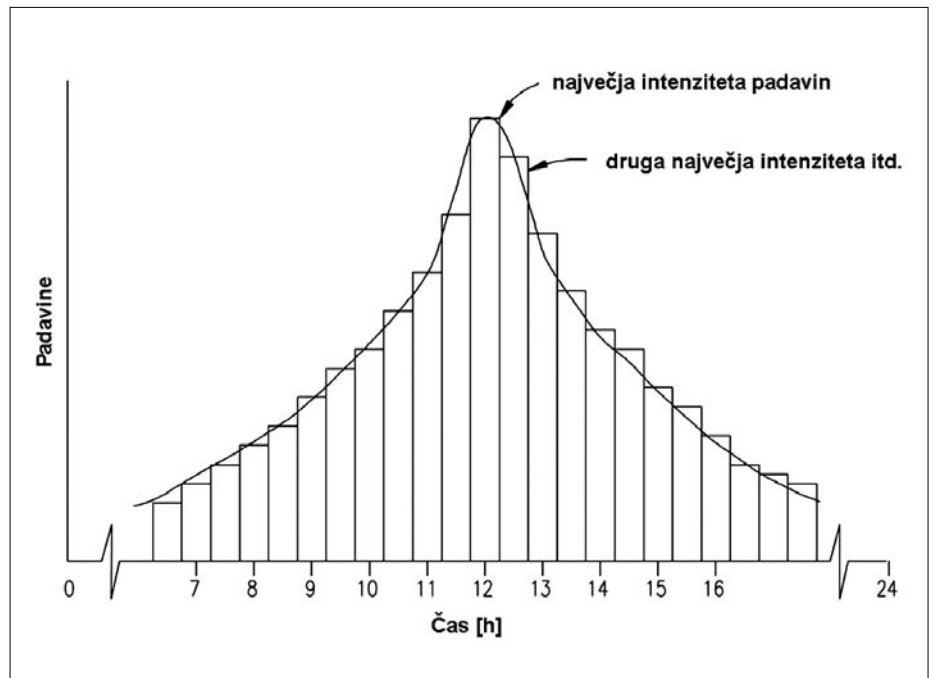
Slika 2 • Prikaz razmerja efektivnih padavin in padavinskih izgub pri uporabi različnih modelov

3.3 Sintetični histogrami padavin

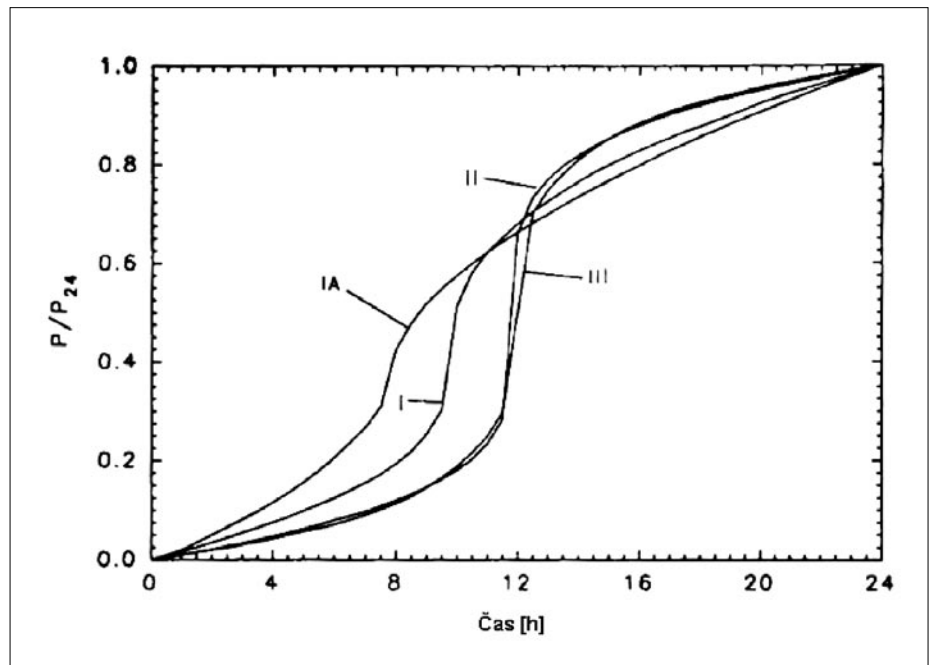
Za izračun projektnih pretokov določene povratne dobe, analizo poplav, načrtovanje, določanje poplavnih linij ipd. se pri hidrološkem modeliranju pogosto uporabljajo sintetični histogrami padavin, dobjeni na podlagi statistične analize padavinskih dogodkov za čim daljše obdobje meritev. Uporabljamo pa jih tudi takrat, ko nimamo na voljo meritev padavin ali pa so le-te prekratke. Sintetični histogrami padavin so najpomembnejši vhodni podatki pri določanju projektnih pretokov (Ball, 1994). Sintetični histogrami padavin določene povratne dobe so časovno porazdeljeni po vzorcu, ki ga po navadi določimo na podlagi krivulj intenziteta-trajanje-pogostost (*ang. intensity-duration-frequency curves*).

Pri konstruiranju sintetičnih padavin je pomembno, da uporabimo primerno trajanje nevihte, časovne intervale, na katere razdelimo nevihto ter razporeditev padavin v odvisnosti od časa. Te podatke prilagodimo glede na površino drenažnega območja in jih uporabimo v hidrološkem modelu (US Army Corps of Engineers, 1982).

Med najbolj znane metode izdelave sintetičnega histograma spada 24-urna porazdelitev padavin SCS, razvita v ZDA, ki temelji na krivuljah intenziteta-trajanje-pogostost ((USACE, 1982), (SCS, 1986)). Krivulje se dobi z natančno analizo padavinskih podatkov za daljše obdobje meritev. Najprej poiščemo maksimalne srednje intenzitete padavin različnih trajanj (5 min, 10 min ... 24 ur). Izmed vseh maksimumov poiščemo letne ekstremne vrednosti, ki se jim poišče najboljše prilegajočo se porazdelitveno funkcijo (po navadi je to Gumbelova porazdelitev ekstremnih vrednosti). Tako dobimo intenzitete padavin različnega trajanja ter z različno pogostostjo pojavljanja (povratno dobo). Metoda sintetičnega histograma padavin SCS postavi največjo intenziteto na izbrano mesto (25, 50, 75 % trajanja padavin), za njo drugo največjo in pred njo tretjo po velikosti itd. (slika 3). Na tak način so dejansko zajete vse mejne vrednosti intenzitet znotraj 24 ur. Zato je metoda 24-urnega sintetičnega histograma padavin SCS primerna tako za velika kot majhna povodja. V ZDA imajo izdelane 4 regionalne tipe porazdelitev padavin, tipične za določena območja, ki omogočajo hidrologom hitro in enostavno izdelavo sintetičnih histogramov za modeliranje projektnih pretokov (slika 4). Tipa I in Ia zajemata 13 zahodno ležečih gorskih držav, Havaje in Aljasko, tip II 35 vzhodno ležečih držav in tip III Mehiko in obalo Atlantika.



Slika 3 • 24-urni sintetični histogram SCS (SCS, 1986)



Slika 4 • Regionalni tipi porazdelitve padavin za posamezna območja ZDA (SCS, 1986)

V naši študiji smo ugotavljali vpliv sintetičnih histogramov različnih trajanj in verjetnosti na modeliran odtok. Poleg tega smo spreminjali položaj konice sintetičnega histograma in ugotavljali vpliv položaja na hidrogram odtoka.

Narejena pa je bila tudi primerjava med zgoraj opisanim modelom sintetičnega histograma in enakomerno razporejenimi padavinami znotraj padavinskega dogodka. Rezultati študije so predstavljeni v nadaljevanju.

4 • REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 Vpliv modela padavinskih izgub

V študiji smo uporabili šest najpogosteje uporabljenih metod padavinskih izgub (metodo infiltracijskega indeksa Φ , Hortonov model, model začetnih in enakomernih izgub, model SCS, model Greena in Ampta ter Smith-Parlangov model).

Vseh šest modelov je dalo sprejemljive in primerljive rezultate (preglednici 6 in 7; slika 5). Analiza in primerjava rezultatov danega primera kaže, da uporaba različnih modelov padavinskih izgub ni bistveno vplivala na rezultate hidrološkega modela. Razlike seveda obstajajo, vendar niso tolikšne, da bi bistveno vplivale na projektni pretok (preglednica 7). Do podobnih zaključkov sta prišla tudi Garklavs in Oberg v svoji študiji (Garklavs, 1986). Ocenjena povprečna napaka posameznih modelov naše študije (*RMSE – root mean squared error*) je med 0,27 in 0,77 m³/s (preglednica 7). V splošnem je najmanjšo napako dal model, kjer je bila uporabljena metoda SCS padavinskih izgub (*RMSE* = 0,27 m³/s). Model je sicer podcenil konico hidrograma za 7,6 %, je pa najbolje določil volumen vala in čas pojava konice (preglednica 7).

Najpogosteje uporabljeni metodi v Sloveniji in tudi drugod po svetu sta metoda SCS in metoda začetnih in enakomernih izgub. Razlog je predvsem v njuni enostavnosti. Modela zahtevata le enega oz. dva parametra, kar je v praksi seveda prednost, ker natančnejših geoloških meritev po navadi nimamo na voljo.

4.2 Vpliv porazdelitve padavin sintetičnega histograma

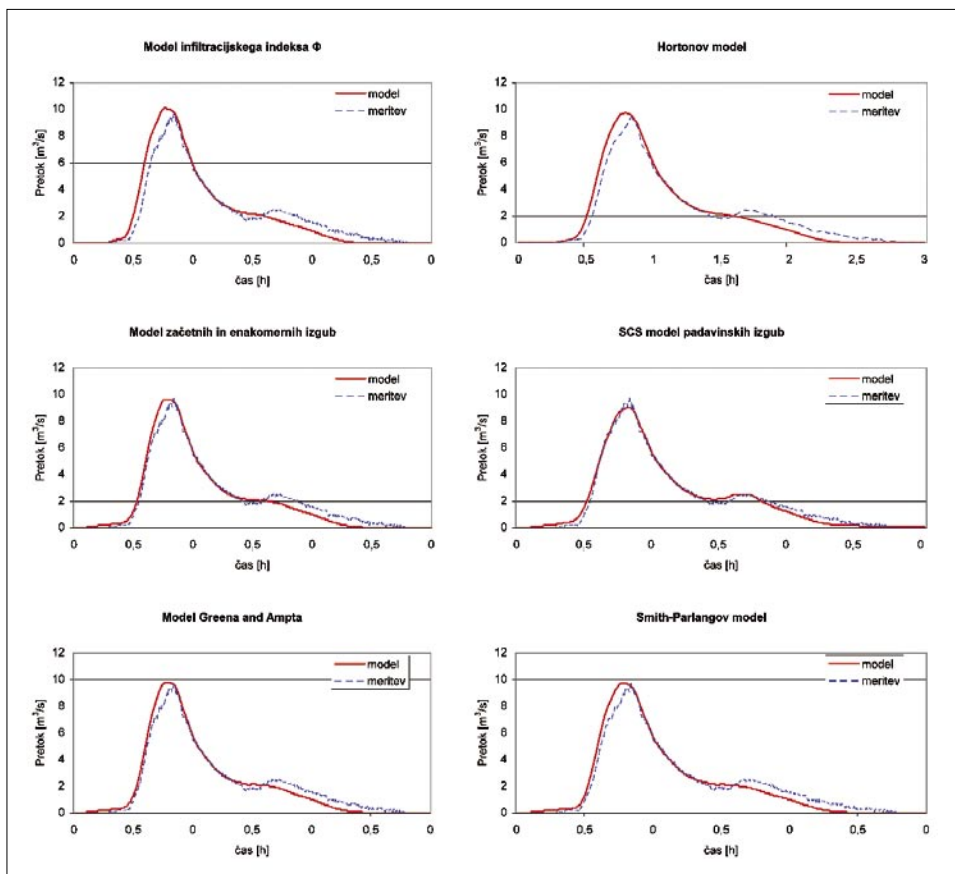
Ker v praksi pogosto nimamo meritev pretokov, da bi lahko hidrološki model umerili, so rezultati (projektni pretok, volumen vala, čas pojava konice) odvisni predvsem od pravilno vnesenega sintetičnega histograma padavin. V študiji smo naredili primerjavo in analizo dveh različnih porazdelitev sintetičnih padavin, in sicer tipične razporeditve padavin SCS (SCS, 1986) s konico na sredini naliva in enakomerne razporeditve padavin. Pri kratkotrajnih nalivih (120 min) ni bilo opaziti bistvenega vpliva razporeditve sintetičnih padavin na hidrogram odtoka (preglednica 8, slika 6). Toda s podaljševanjem trajanja sintetičnih padavin se je razlika v konici odtoka in času njenega pojava drastično večala. Pri 24-urnem trajanju enakomerno razporejenih padavin je bila konica hidrograma odtoka za več kot 100 % nižja kot pri razporeditvi padavin SCS.

	Vodozbirna površina	Padavinske izgube (mm)	Efektivne padavine (mm)	Q_{max} (m ³ /s)	Volumen odtoka (m ³)
Model Φ indeksa	149121	16,82	33,58	4,3	241800
	149122	16,82	33,58	3,6	201100
	149123	16,82	33,58	2,2	122900
Hortonov model	149121	14,88	35,52	4,2	255800
	149122	22,70	27,70	3,5	165900
	149123	14,88	35,53	2,1	130000
Model začetnih in enakomernih izgub	149121	19,98	30,42	4,1	219100
	149122	19,78	30,62	3,3	183400
	149123	12,37	38,03	2,4	139200
Model SCS	149121	18,81	31,59	3,7	227300
	149122	16,59	33,81	3,3	202400
	149123	16,59	33,81	2	123700
Greenov in Amptov model	149121	19,56	30,84	4,1	222000
	149122	19,13	31,27	3,3	187300
	149123	11,91	38,49	2,4	140900
Smith-Parlangov model	149121	20,18	30,22	4	217600
	149122	14,98	35,51	3,7	212700
	149123	17,97	32,49	2,1	118900

Preglednica 6 • Rezultati hidrološkega modeliranja z uporabo različnih modelov padavinskih izgub za posamezne prispevne površine Glinščice (Dirnbek, 2009)

	Q_{max} (m ³ /s)	Razlika (%)	Volumen odtoka (m ³)	Razlika (%)	Čas pojava konice	Razlika (%)	RMSE (m ³ /s)
Model Φ -indeksa	10,1	3,7	566000	1,9	18:20	-1:50	0,77
Hortonov model	9,76	0,2	551800	-0,6	19:00	-1:10	0,58
Model začetnih in enakomernih izgub	9,6	-1,4	541600	-2,5	18:40	-1:30	0,47
Model SCS	9,0	-7,6	553400	-0,3	20:00	-0:10	0,27
Greenov in Amptov model	9,8	0,6	550200	-0,9	18:40	-1:30	0,49
Smith-Parlangov model	9,7	-0,4	549200	-1,1	18:40	-1:30	0,52
Merjeni hidrogram	9,74	0	555290	0	20:10	0	0

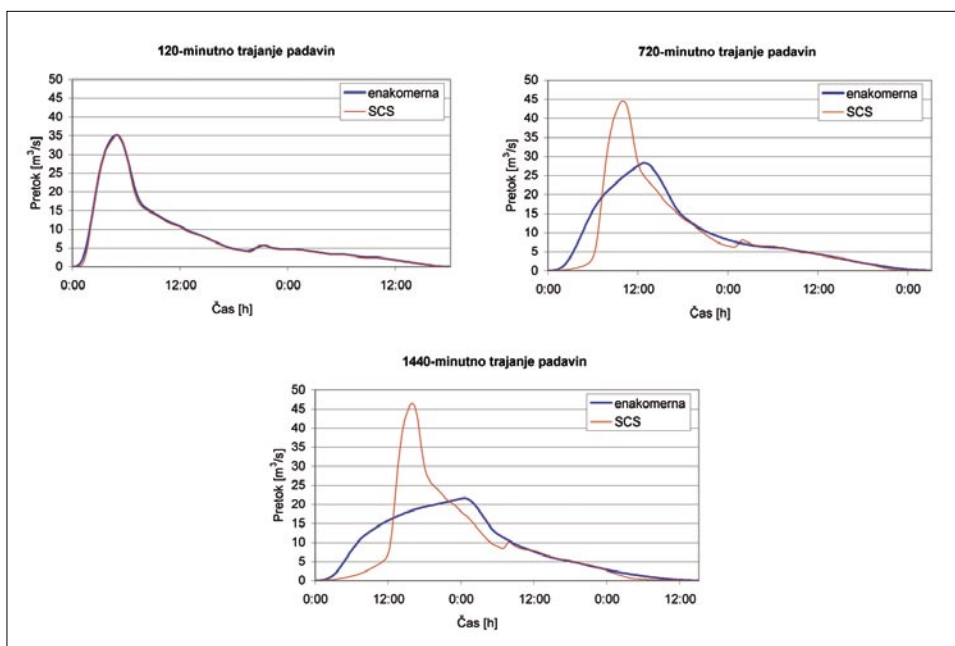
Preglednica 7 • Primerjava rezultatov hidrološkega modeliranja z uporabo različnih modelov padavinskih izgub in merjenih hidrogramov Glinščice (Dirnbek, 2009)



Slika 5 • Primerjava modeliranih odtokov z uporabo različnih modelov padavinskih izgub in merjenega odtoka

Iz rezultatov je razvidno, da enakomerna razporeditev padavin daljšega trajanja daje bistveno nižje konice odtokov in hkrati tudi daljše čase pojava samih konic kot tipična razporeditev padavin SCS. Do podobnih zaključkov so prišli tudi avtorji različnih študij po svetu ((Huff 1967), (Hager, 1985), (Ball, 1994), (Singh, 1997)). Lambourne in Stephenson sta pokazala, da uporaba enakomerno razporejenih padavin (pravokotne oblike) podcenjuje konico in volumen projektnega hidrograma, zato so uporabniki take razporeditve padavin na nevarni strani (Lambourne, 1987). Huff je bil prvi, ki je pokazal, da je časovna razporejenost padavin v večini primerov dejansko bolj ali manj trikotne oblike (Huff, 1967). Ball (Ball, 1994) je poleg tega v svoji študiji ugotovil, da čas koncentracije ni samo lastnost povodja in torej konstanta, temveč je odvisen tudi od časovne razporeditve padavin. Zatorej ga ne bi smeli določati brez upoštevanja časovno neenakomerno razporejenih padavin. Ball (Ball, 1994) je v svoji raziskavi ugotovil, da je čas koncentracije porečja lahko tudi za približno 20 % krajši ali daljši od tistega, ki ga predpostavimo z uporabo enakomerno razporejenih padavin. Do enakih ugotovitev je prišel tudi Hager (Hager, 1985).

4.3 Vpliv položaja konice sintetičnega histograma padavin



Slika 6 • Primerjava modeliranih odtokov pri uporabi različne razporeditve sintetičnih padavin različnega trajanja

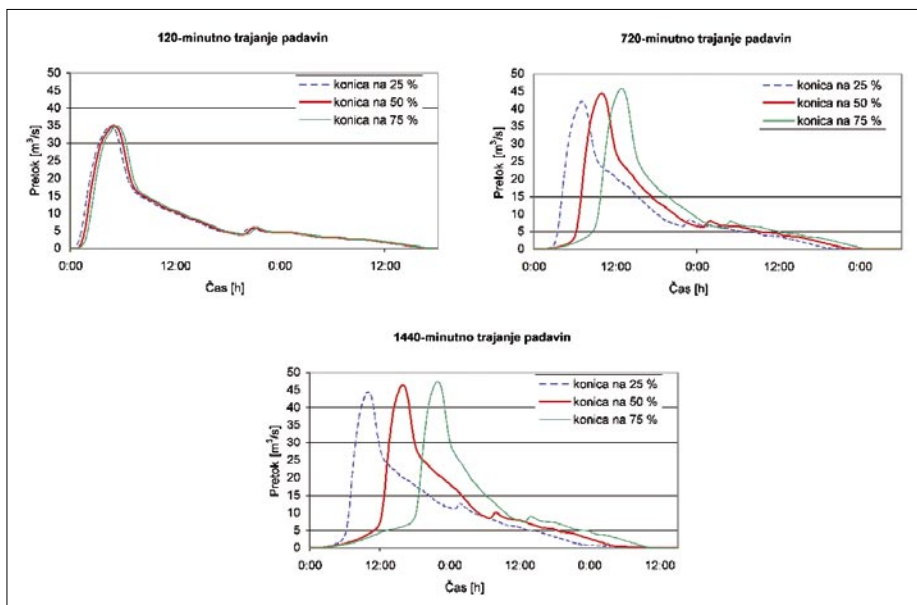
Uporabili smo tri različne položaje konice sintetičnega histograma padavin (25, 50 in 75 % trajanja padavin) za različna trajanja in 100-letno povratno dobo padavin. V modelu je bila uporabljena metoda začetnih in enakomernih padavinskih izgub. Rezultati (preglednica 9 in slika 7) so pokazali bistvene razlike v času pojava konice in manjše razlike v višini konice. Razlika v času pojava konice se opazno večja z daljšanjem trajanja padavin (slika 7). Do podobnih zaključkov so prišli tudi Danil in sodelavci (Danil, 2005), ki so ugotovili, da lahko enak projektni pretok dobimo z različnimi kombinacijami trajanja in povratne dobe padavin.

Porazdelitev padavin	Trajanje padavin s 100-letno povratno dobo (min)					
	120		720		1440	
	enakom.	SCS	enakom.	SCS	enakom.	SCS
Q_{max} (m ³ /s)	35,2	35,0	28,3	44,5	21,7	46,5
Volumen odtoka (m ³)	1209500	1180200	1689500	1697300	2025800	2041700
Čas pojava konice	4:50	5:00	12:50	9:50	24:30	15:50

Preglednica 8 • Primerjava rezultatov hidrološkega modeliranja z uporabo različnih razporeditev sintetičnih padavin različnega trajanja (Dirnbek, 2009)

	Položaj konice sintetičnega histograma		
	25 %	50 %	75 %
120-minutno trajanje			
Q_{max} (m ³ /s)	34,7	35,0	34,9
Volumen odtoka (m ³)	1167700	1180200	1181700
Čas pojava konice	4:30	5:00	5:20
720-minutno trajanje			
Q_{max} (m ³ /s)	42,1	44,5	45,8
Volumen odtoka (m ³)	1678700	1697300	1702500
Čas pojava konice	7:00	9:50	12:50
1440-minutno trajanje			
Q_{max} (m ³ /s)	44,5	46,5	47,5
Volumen odtoka (m ³)	2027600	2041700	2046900
Čas pojava konice	9:50	15:50	21:50

Preglednica 9 • Primerjava rezultatov hidrološkega modeliranja za različne položaje konice histograma sintetičnih padavin (Dirnbek, 2009)



Slika 7 • Primerjava modeliranih odtokov pri uporabi različnega položaja konice sintetičnega histograma padavin različnih trajanj

5 • SKLEP

V naši študiji so vsi uporabljeni modeli padavinskih izgub dali uporabne in primerljive rezultate. Uporaba posamezne metode v našem primeru ni bistveno vplivala na konico hidrograma, čas pojava konice ali volumen odtoka.

Sintetični histogrami padavin (projektne padavine) so najpomembnejši vhodni podatek pri določanju projektnih pretokov. Njihova razporeditev, trajanje in položaj konice pa lahko bistveno vplivajo na konico hidrograma, čas pojava konice in volumen odtoka. Časovna razporeditev sintetičnih padavin bistveno vpliva na konico in čas njenega pojava. Vpliv lahko zanemarimo le v primeru kratkotrajnih padavin pri relativno majhnih povodjih s kratkimi časi koncentracije. Enakomerna razporeditev padavin lahko podceni konico hidrograma tudi za več kot 100 %, zato so projektanti v tem primeru na nevarni strani. Tipična razporeditev padavin SCS sicer lahko v določenih primerih nekoliko precenjuje projektno pretoko, kljub temu pa uporabo take razporeditve priporočajo hidrologi širom po svetu.

Trajanje padavinskega dogodka je bistveno pri načrtovanju večine projektov. Trajanje projektnih padavin po navadi narašča z naraščanjem površine padavinskega območja, odvisno pa je tudi od namena projekta. Pri projektiranju odvodnje z urbanih površin je trajanje projektnih padavin manj kot 1 ura, pri študijah zadrževanja poplavnih valov pa je po navadi trajanje projektnih padavin večje od 24 ur. V večini hidroloških študij po svetu se uporablja 24-urno trajanje projektnih padavin ali pa trajanje enako času koncentracije.

Različni scenariji položaja konice sintetičnih padavin so pokazali, da postavitve konice bistveno vpliva na čas pojava konice hidrograma in nekoliko manj na samo višino konice. Razlika v času pojava konice se bistveno večja z daljšanjem trajanja padavin.

6 • LITERATURA

- Ball, J. E., The influence of storm temporal patterns on catchment response, *J. Hydrol.*, 158, 285–303, 1994.
- Brilly, M., Rusjan, S., Vidmar, A., Monitoring the impact of urbanisation on the Glincica stream, *Phys. Chem. Earth.*, 31, 17, 1089–1096, 2006a.
- Brilly, M., Šraj, M., Teoretične osnove modeliranja površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS, Učbenik, UL FGG, Ljubljana, 2006b.
- Danil, E. I., Michas, S. N., Lazaridis, L. S., Hydrologic modeling for the determination of design discharges in ungauged basins, *Global NEST Journal*, 7, 3, 296–305, 2005.
- Dirnbek, L., Vpliv histograma efektivnih padavin na hidrogram odtoka, Diplomsko delo, UL FGG, Ljubljana, 2009.
- El-Jabi N., Sarraf S., Effect of maximum rainfall position on rainfall-runoff relationship, *ASCE Publ.*, 117, 5, 681–685, 1991.
- Garklavs, G., Oberg, K. A., Effect of rainfall excess calculations on modeled hydrograph accuracy and unit-hydrograph parameters, *J. of American Water Resources Association*, 22, 4, 565–572, 1986.
- Globevnik, L., Kaligarič, M., Sovinc, A., Forest cover progression, land-use and socio-economic changes on the edge of the Mediterranean. In Mazzoleni, S., Pasquale, G., Mulligan, M., Martino, P., Rego, F. (editors): *Recent dynamics of the Mediterranean vegetation and landscape*, Wiley, 237–244 (Chapter 21), 2004.
- Hager, W. H., Effects of excess rainfall time distribution on catchment area hydrograph, *Nordic Hydrology*, 16, 157–168, 1985.
- HEC-HMS, dostopno na: <http://www.hec.usace.army.mil/> (3. 9. 2009).
- Horton, R. E., Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacity, *Trans. Hydrology papers, Am. Geophys. Union*, 693–711, 1939.
- Huff, F. A., Time distribution of rainfall in heavy storms, *Water Resources Research*, 3 (4), 1007–1019, 1967.
- Lambourne, J. J., Stephenson, D., Model study of the effect of temporal storm distributions on peak discharges and volumes, *Hydrological Sciences Journal*, 32 (2), 215–226, 1987.
- Petan, S., Šraj, M., Zorn, M., Vidmar, A., Mikoš, M., Brilly, M., Measurements and modelling of rainfall interception and soil erosion processes on the Dragonja experimental river basin, V: Conference on water observation and information system to decision support, Balwois, Ohrid, 2008.
- Pečkovšek, G., Mikoš, M., Estimating the R factor from daily rainfall data in the sub-Mediterranean climate of southwest Slovenia. *Hydrological Sciences Journal* 49(5), 869–877, 2004.
- Rusjan, S., Brilly, M., Mikoš, M., Flushing of nitrate from a forested watershed: An insight into hydrological nitrate mobilization mechanisms through seasonal high-frequency stream nitrate dynamics, *J. Hydrol.*, 354, 1–4, 187–202, 2008.
- Singh, V. P., Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph, *Hydrol. Process.*, 11, 1649–1669, 1997.
- Smith, R. E., Parlange, J. Y., A parameter efficient hydrologic infiltration model, *Water Resour. Res.* 14(3), 533–538, 1978.
- SCS, Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. USDA, Springfield, VA, 1971.
- SCS, Soil Conservation Service, Urban hydrology for small watersheds, Technical reference manual 55. USDA, Springfield, VA, 1986.
- Šraj, M., Šifrant padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije – Watershed coding system of the Republic of Slovenia, *Acta Hydrotechnica*, 19, 30, 3–24, 2001.
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M., Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia, *Agric. for. meteorol.*, 148, 1, 121–134, 2008a.
- Šraj, M., Rusjan, S., Petan, S., Vidmar, A., Mikoš, M., Globevnik, L., Brilly, M., The experimental watersheds in Slovenia, *IOP Conference Series*, 4, 1–13, 2008b.
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Analysis of Ungauged Watersheds Using HEC-1. Davis, California, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 122 str., 1982.
- U.S. Army Corps of Engineers, HEC-HMS Hydrologic Modeling System. Technical Reference Manual, ZDA, 2000.
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, 38–51, 2008.