

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Hidrotehniška smer

Kandidat:

Luka Dirnbek

Vpliv histograma efektivnih padavin na hidrogram odtoka

Diplomska naloga št.: 3046

Mentor:
doc. dr. Mojca Šraj

Somentor:
prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 23. 1. 2009

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **LUKA DIRNBEK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»VPLIV HISTOGRAMA EFEKTIVNIH PADAVIN NA HIDROGRAM ODTOKA«

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, 20.12.2008

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 556.12:556.16(043.2)
Avtor: Luka Dirnbek
Mentor: doc. dr. Mojca Šraj,
Somentor: prof. dr. Mitja Brilly
Naslov: Vpliv histograma efektivnih padavin na hidrogram odtoka
Obseg in oprema: 86 strani, 29 preglednic, 45 slik, 51 enačb
Ključne besede: padavinske izgube, histogram, hidrogram, odtok, Glinščica
Izvleček

Padavine so zelo kompleksen pojav, ki ga je zelo težko točno napovedati. Prav tako nam skozi celo zgodovino predstavljajo velik problem poplave, ki so vzrok velike količine padavin. V diplomski nalogi sem prikazal pregled metod računanja padavinskih izgub, ki se uporabljajo v svetu ter njihov vpliv na hidrogram odtoka na primeru povodja Glinščice. Model povodja Glinščice sem vzpostavil s programom HEC-HMS 3.2, ki v svoji bazi podatkov vsebuje večje število teh metod in se uporablja za računanje površinskega odtoka. Problem pri modeliranju se pojavi pri manjših povodjih, kjer nam primanjkuje meritev, tako da smo pri uporabi omejeni s preprostejšimi metodami, katere uporabljajo manjše število vhodnih podatkov in večje število poenostavitev. V drugem delu naloge sem prikazal uporabnost sintetičnih histogramov, s pomočjo katerih sem ugotavljal, kako vpliva razporeditev in čas trajanja padavin na končni hidrogram odtoka.

Z izračuni sem pokazal, da z izbiro različnih metod padavinskih izgub vplivamo na volumen hidrograma odtoka, maksimalni odtok, čas nastopa maksimalnega odtoka in tudi celotni čas trajanja površinskega odtoka. Rezultate sem ovrednotil s srednjim kvadratičnim pogreškom (*RMSE*), ki opisuje prileganje izračunanega in izmerjenega hidrograma odtoka. Ugotovil sem, da izbira metode padavinskih izgub vpliva na hidrogram odtoka. Vpliv se vidi predvsem v času pojava konice in simuliranju odtoka po daljšem obdobju padavin. Analiziral sem tudi sintetični histogram in ugotovil, da razporeditev padavin bistveno vpliva na čas nastopa maksimalnega odtoka, prav tako pa tudi na maksimalni odtok, volumen odtoka in celotni čas trajanja površinskega odtoka. Prav tako sem prikazal, kako lahko z neprimerno razporeditvijo (enakomerno razporeditvijo) padavin bistveno vplivamo na količino in čas nastopa maksimalnega odtoka.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 556.12:556.16(043.2)
Author: Luka Dirnbek
Supervisor: assist. prof. Mojca Šraj
Cosupervisor: prof. Mitja Brilly
Title: The effect of precipitation excess on runoff hydrograph
Notes: 86 pag., 29 tab., 45 fig., 51 equ.
Key words: rainfall loss, hyetograph, hidrograph, discharge, Glinščica

Abstract:

It is very hard to predict amount of precipitation because rainfall is very complex phenomenon. Through history people have always come across the problem of floods. They have tried to describe and predict rainfall with many mathematical models. In this work rainfall loss methods and their influence on runoff hydrograph have been presented and described. Program HEC-HMS 3.2 has been used and with this program the model for watershed of river Glinščica has been created. Glinščica is small river and because of that there is lack of measures and data so it has to be used only methods for which there was enough data. For more accurate results and use of more complex methods there would have to be more data. It is also shown how to use synthetic hyetographs and how to correctly arrange precipitation.

The results have shown that the use of different loss methods have a greater impact on volume of runoff, maximal runoff, time of peak discharge and total time of direct runoff. Analyses were made with *RMSE* which showed the fitting of calculated and actual discharge. When all methods were used the results showed shorter time of total direct runoff and peak discharge. Other results were good. The different use of synthetic hyetographs and the different arrangement of precipitation has also impact on volume of runoff, maximal runoff, time of peak discharge and total time of direct runoff. The results showed us that we must use the right loss method and correct arrangement of precipitation for modelling watersheds.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Mojci Šraj za pomoč in vse napotke pri izdelavi diplomske naloge ter družini, ki me je v času študija podpirala in mi stala ob strani.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Cilji diplomske naloge	1
2	PADAVINE	2
2.1	Histogrami in sintetični histogrami	2
2.2	Efektivne padavine	7
2.3	Padavinske izgube	7
2.3.1	Evapotranspiracija	8
2.3.2	Infiltracija	8
3	POVRŠINSKI ODTOK	10
3.1	Razdelitev odtoka	10
3.2	Hidrogram enote	11
4	MODELIRANJE S PROGRAMOM HEC HMS 3.2	13
5	PREGLED METOD ZA IZRAČUN PADAVINSKIH IZGUB	14
5.1	Uvod	14
5.2	Metode za izračun padavinskih izgub:	15
5.2.1	Metoda infiltracijskega indeksa	15
5.2.1.1	Postopek in seznam enačb	15
5.2.2	Hortonov model	17
5.2.2.1	Postopek in seznam enačb	20
5.2.3	Model začetnih in enakomernih izgub	20
5.2.3.1	Postopek in seznam enačb	22
5.2.4	Model deficita in konstantnih izgub	23
5.2.5	Mrežast model deficita in konstantnih izgub	24
5.2.6	Model Greena in Ampta	25
5.2.6.1	Postopek in seznam enačb	27
5.2.7	SCS (Soil Conservation Service) model padavinskih izgub	29

5.2.7.1	Postopek in seznam enačb	32
5.2.8	Mrežast SCS model padavinskih izgub	33
5.2.9	Metoda eksponentnih padavinskih izgub	34
5.2.9.1	Postopek in seznam enačb	35
5.2.10	Model upoštevanja vlažnosti zemljine (SMA)	36
5.2.10.1	Postopek in seznam enačb	38
5.2.10.1.1	Padavine	38
5.2.10.1.2	Infiltracija	39
5.2.10.1.3	Pronicanje	39
5.2.10.1.4	Površinski odtok in podpovršinski odtok	40
5.2.10.1.5	Evapotranspiracija	41
5.2.11	Mrežast model upoštevanja vlažnosti zemljine	41
5.2.12	Metoda Smith Parlange padavinskih izgub	42
5.2.12.1	Postopek in seznam enačb	45
5.2.13	Metoda Philip	46
5.2.14	Metoda Swartzendruber	47
5.2.15	Metoda Kostiakov	48
5.2.16	Metoda Holtan	48
6	POVODJE GLINŠČICE	50
6.1	Geografske in hidrografske značilnosti	50
6.2	Geologija in pokrovnost tal povodja	51
6.3	Podnebje in padavine	53
7	UPORABA RAZLIČNIH METOD PADAVINSKIH IZGUB NA PRAKTIČNEM PRIMERU POVODJA GLINŠČICE	56
7.1	Uvod	56
7.2	Modeliranje povodja Glinščice	58
7.2.1	Analiza vhodnih podatkov in prikaz rezultatov	58
7.2.1.1	Metoda infiltracijskega indeksa	58
7.2.1.2	Hortonov model	59

7.2.1.3	Metoda začetnih in enakomernih izgub ter metoda deficita in konstantnih izgub	61
7.2.1.4	SCS metoda padavinskih izgub	63
7.2.1.5	Model Greena in Ampta	64
7.2.1.6	Metoda Smith Parlange	66
7.2.2	Analiza rezultatov	67
8	UPORABA SINTETIČNIH HISTOGRAMOV NA PRAKTIČNEM PRIMERU POVODJA GLINŠČICE	71
9	ZAKLJUČKI	80
VIRI		83

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrednosti koeficientov a , b [mm/min] za različne periode vračanja	5
Preglednica 2: Padavinski dogodek in osnovni podatki o povodju	14
Preglednica 3: Vrednosti koeficienta f_0 za različne tipe zemljin (Akin, 1993)	18
Preglednica 4: Vrednosti koeficientov f_c in k za različne tipe zemljin	18
Preglednica 5: Izgube prestrezanja ali začetne izgube	21
Preglednica 6: SCS klasifikacija zem., infiltracijske izgube za različne tipe zem. (SCS, 1986)	21
Preglednica 7: Vrednosti vhodnih podatkov za različne tipe zemljin (Rawls, et al., 1982)	26
Preglednica 8: Koeficienti CN za urbanizirane površine (Us Army Corps of Engineers, 2000)	30
Preglednica 9: Koeficienti CN za obdelana kmetijska zemljišča (USACE, 2000)	31
Preglednica 10: Koeficient CN za ostala kmetijska zemljišča (USACE, 2000)	32
Preglednica 11: Karakteristike zemljin pri Smith Parlange metodi	44
Preglednica 12: Šifrant podpovodij na 6. ravni (Šraj, 2000)	50
Preglednica 13: Tipi pokrovnosti tal na povodju Glinščica (CORRINE)	52
Preglednica 14: Višine padavin pri povratnih dobah ekstremnih padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad v obdobju 1948 - 2007 (Ovsenik, 2008)	53
Preglednica 15: Količine padavin pri povratnih dobah ekstremnih padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad v obdobju 1948 - 2007 (Ovsenik 2008)	54
Preglednica 16: Deleži neprepustnih površin za posamezna podpovodja	57
Preglednica 17: Vhodni podatki pri metodi infiltracijskega indeksa	58
Preglednica 18: Vhodni podatki pri Hortonovem modelu	60
Preglednica 19: Vhodni podatki pri metodi začetnih in enakomernih izgub	61
Preglednica 20: Vhodni podatki pri SCS metodi padavinskih izgub	63
Preglednica 21: Vhodni podatki pri modelu Greena in Ampta	64
Preglednica 22: Vhodni podatki pri metodi Smith Parlange	66
Preglednica 23: Prikaz rezultatov za posamezna podpovodja	68
Preglednica 24: Izračunane in izmerjene vrednosti rezultatov končnega iztoka ter koeficient <i>RMSE</i>	68
Preglednica 25: Odstopanje (%) izračunanih vrednosti od meritev na iztoku	68

Preglednica 26: Prikaz izračunanih vrednosti za 10- in 100-letno povratno dobo	72
Preglednica 27: Prikaz izračunanih vrednosti pri različnem času nastopa maksimalnih padavin	73
Preglednica 28: Izračunane vrednosti pri različnem času trajanja nevihte	75
Preglednica 29: Primerjava izračunanih vrednosti v odvisnosti od razporeditve padavin	77

KAZALO SLIK

Slika 1: Tipična 24-urna razporeditev padavin (USDA SCS, 1956)	4
Slika 2: SCS 24-urna razporeditev (USDA SCS, 1986)	4
Slika 3: Posamezni deli odtoka padavin (prirejeno po Mckillop, 2004)	10
Slika 4: Deleži posameznih odtokov na hidrogramu (prirejeno po Mckillop, 2004)	11
Slika 5: 1-urni hidrogram enote	12
Slika 6: Padavinske izgube po metodi infiltracijskega indeksa	15
Slika 7: Grafi za določanje vrednosti Φ indeksa (Bhatnagar)	17
Slika 8: Intenziteta infiltracije po Hortonu (prirejeno po Jovanović, 1974)	19
Slika 9: Padavinske izgube po Hortonovem modelu	19
Slika 10: Padavinske izgube po modelu začetnih in enakomernih izgub	22
Slika 11: Padavinske izgube po modelu deficita in konstantnih izgub	24
Slika 12: Padavinske izgube po modelu Greena in Ampta	27
Slika 13: Padavinske izgube po SCS modelu	29
Slika 14: Prikaz padavinskih izgub po metodi eksponentnih izgub (prirejeno po Dijk, 2002)	36
Slika 15: Računska shema SMA modela (prirejeno po US Army Corps of Engineers, 2000)	38
Slika 16: Padavinske izgube po metodi Smith Parlange	43
Slika 17: Prikaz povodja Glinščice	51
Slika 18: Povodje prikazano na karti prsti (Filozofska fakulteta, oddelek za geografijo)	52
Slika 19: Razporeditev padavin na postaji Prženec za opisani dogodek	54
Slika 20: Prikaz računskega modela Glinščice	56
Slika 21: Deset-minutni hidrogram enote	57
Slika 22: Umerjeni površinski odtok na iztoku iz povodja z metodo infiltracijskega indeksa	59
Slika 23: Padavinske izgube po metodi infiltracijskega indeksa za podpovodje 149121	59
Slika 24: Površinski odtok na iztoku iz povodja s Hortonovim modelom	60
Slika 25: Padavinske izgube po Hortonovem modelu za podpovodje 149121	61
Slika 26: Površinski odtok na iztoku iz povodja z metodo začetnih in enakomernih izgub	62
Slika 27: Padavinske izgube po metodi začetnih in enakomernih izgub za podpovodje 149121	62
Slika 28: Površinski odtok na iztoku iz povodja dobljen z SCS metodo padavinskih izgub	63
Slika 29: Padavinske izgube po SCS metodi za podpovodje 149121	64

Slika 30: Površinski odtok na iztoku iz povodja z modelom Greena in Ampta	65
Slika 31: Padavinske izgube po modelu Greena in Ampta za podpovodje 149121	65
Slika 32: Površinski odtok na iztoku iz povodja z metoda Smith Parlange	66
Slika 33: Padavinske izgube po metodi Smith Parlange za podpovodje 149121	67
Slika 34: Površinski odtok pri 10-letni povratni dobi in konici na 50% časa trajanja padavin	72
Slika 35: Površinski odtok pri 100-letni povratni dobi in konici na 50% časa trajanja padavin	73
Slika 36: Prikaz padavin pri konici maksimalnih padavin na 25% časa trajanja nevihte	74
Slika 37: Prikaz padavin pri konici maksimalnih padavin na 50% časa trajanja nevihte	74
Slika 38: Prikaz padavin pri konici maksimalnih padavin na 75% časa trajanja nevihte	74
Slika 39: Površinski odtok 120 minutne nevihte s 100-letno povratno dobo za različne položaje konice	75
Slika 40: Površinski odtok 720 minutne nevihte pri 100-letni povratni dobi za različne položaje konice	76
Slika 41: Površinski odtok 1440 minutne nevihte pri 100-letni povratni dobi za različne položaje konice	76
Slika 42: Prikaz enakomerne razporeditve padavin s padavinskimi izgubami pri 120 minutni nevihti za podpovodje 149121	77
Slika 43: Površinski odtok 120 minutne nevihte s 100-letno povratno dobo za različne razporeditve padavin	78
Slika 44: Površinski odtok 720 minutne nevihte s 100-letno povratno dobo za različne razporeditve padavin	78
Slika 45: Površinski odtok 1440 minutne nevihte s 100-letno povratno dobo za različne razporeditve padavin	79

1 UVOD

Padavine so zelo kompleksen pojav, ki ga je zelo težko točno napovedati. Prav tako nam skozi celo zgodovino predstavljajo velik problem poplave, ki so vzrok velike količine padavin. Različni avtorji so poskušali opisati dejanske razmere pronicanja in odtekanja iz povodij in se tako približati dejanskim razmeram v naravi. Tako so nastale različne metode za izračun padavinskih izgub na povodjih in odtočnih lastnosti povodij.

Pri računanju odtokov iz povodij se v gradbeništvu uporablja veliko število teh metod. Vsaka izmed teh metod je bila določena za posamezna območja in tako uporablja različne predpostavke in s tem tudi različne parametre. Pri vseh analizah odtočnih lastnosti se uporabljajo kot vhodni podatki padavinske izgube. Za izračun teh izgub je bilo do sedaj uporabljenih veliko različnih postopkov, kateri uporabljajo določene poenostavitve. V diplomski nalogi bodo opisani ti postopki in njihov vpliv na končni hidrogram odtoka.

Metode padavinskih izgub uporabljajo različne parametre, ki so dobljeni na podlagi predhodnih meritev. Problem se pojavi pri manjših povodjih, kjer meritev nimamo na razpolago. V tem primeru uporabljamo različne preprostejše metode, ki uporabljajo manjše število vhodnih podatkov.

1.1 Cilji diplomske naloge

Cilj diplomske naloge je podrobnejši prikaz vseh metod padavinskih izgub, ki se uporabljajo v svetu. V teoretičnem delu sem opisal vsako metodo posebej ter prikazal potek padavinskih izgub v času nevihte. Za vsako metodo potrebujemo večje število vhodnih podatkov, ki so prikazani pri vsaki metodi. V nadaljevanju je prikazan vpliv metod padavinskih izgub na končni hidrogram odtoka za primer povodja Glinščice. Uporabil sem metode, za katere sem imel na razpolago dovolj vhodnih podatkov in na koncu prikazal vpliv izbire metode na končni hidrogram odtoka. Prav tako sem opisal sintetične padavine in na primeru Glinščice prikazal njihovo uporabnost. Izračune sem izvedel s programom HEC-HMS.

2 PADAVINE

Eden najpogosteje uporabljenih podatkov v geofiziki so prav padavine. Tako so padavine osnova za mnoge raziskave in analize glede oskrbovanja z vodo, suš, poplav, namakanja in ostalih vodnih regulacijskih sistemov. Padavine so del hidrološkega kroga. Količina padavin je omejena in neenakomerno razporejena po zemeljski obli, zato je človek poskušal z različnimi modeli in izboljšavami čim bolj učinkovito uporabiti te padavine in jih izkoristiti kolikor se da (Gray, 1973).

Kroženje vode v atmosferi imenujemo hidrološki krog. Ta proces zajema gibanje, izgubo in polnjenje zemeljske vode. Hidrološki krog razdelimo na štiri večje faze:

- padavine
- evapotranspiracija
- vodni tok
- podtalna voda

S prvima dvema fazama se ukvarja predvsem meteorologija v povezavi s hidrologijo (hidrometeorologija), kajti padavine in evapotranspiracija sta odvisni od vplivov atmosfere. Zadnji dve fazi se pa nanašata na odtok in sta odvisni od prvih dveh faz (Gray, 1973).

2.1 Histogrami in sintetični histogrami

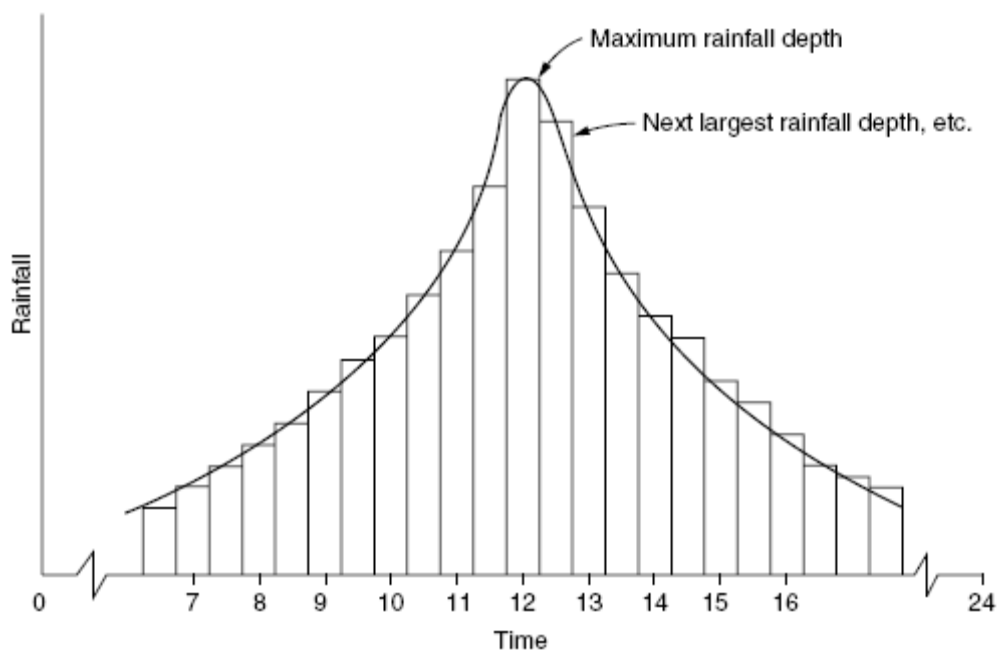
Histogram padavin prikazuje časovno razporeditev padavin in se uporablja kot osnovni podatek za računanje površinskih odtokov. Dobimo jih z meritvami, ki se izvajajo na padavinskih postajah ali pa jih določi računalniški program na podlagi dobljenih verjetnostnih analiz podatkov o padavinah za daljša obdobja. Pri uporabi histogramov predpostavimo, da so padavine razporejene enakomerno znotraj časovnega intervala in enakomerno po celotni prispevni površini. Uporabljajo se pri umerjanju, napovedih ter ocenah modelov (Brilly in Šraj, 2005).

Razvoj in uporabnost padavinskih kart sta se nadaljevali in tako je prišlo do nastanka sintetičnih histogramov. Sintetični histogrami se uporabljajo, ko nam primanjkuje meritev padavin ali pa imamo te padavine narejene za prekratek čas, da bi lahko razvili razmerje med padavinami in frekvenco padavin. Različni tipi sintetičnih padavin se uporabljajo za reševanje vprašanj glede poplav, analiziranja poplav ter pri planiranju in reševanju večjih padavinskih dogodkov. Prav tako se uporabljajo kot osnova za projektiranje vodotokov, dimenzioniranje kanalov, kanalizacij, obrežnih nasipov, zadrževalnikov ter mnogo drugega. Zelo veliko se uporabljajo pri protipoplavnih študijah za prikaz nevarnosti nastopa poplav. Običajno so te padavine uporabljene za generiranje poplav s 100-letno povratno dobo, na podlagi katerih lahko nadalje dimenzioniramo vodotoke (US Army Corps of Engineers, 1982).

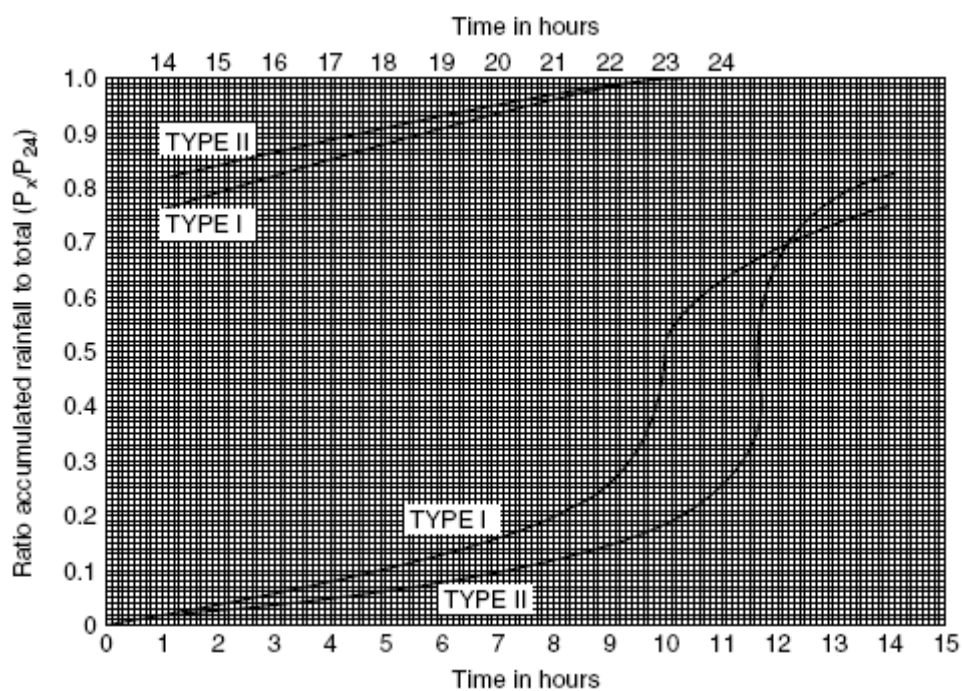
V ZDA se s sintetičnimi padavinami ukvarja državna vodna služba, ki ureja podatke za sintetične padavine za določeno trajanje nevihte. Izdelala je SCS 24-urne porazdelitve neviht. Te razporeditve so bile dobljene iz državnih atlasov, ki opisujejo pogostost padavin za območja manjša od 640 km² in trajanje neviht do 24 ur pri povratni dobi od 1 do 100 let. Območje je razdeljeno na 4 dele, za katere so z analiziranjem podatkov izdelali 4 razrede regionalnih razporeditev:

- razred 1 ter razred 1A zajemata 13 gorskih držav zahodno ležečih od Rocky Mountains vključno z Rocky Mountains, Havaji in Aljasko
- razred 2 zajema 35 držav vzhodno ležečih od Rocky Mountains (preostali del ZDA)
- razred 3 zajema Meksiko in obalo Atlantika

SCS 24-urne razporeditve so bile dobljene iz padavin dolgih od 30 minut do 24 ur (24 urna razporeditev padavin v odvisnosti od časa je prikazana na sliki 1) in temeljijo na ocenjevanju frekvence akumuliranih padavin v odvisnosti od časa trajanja nevihte. Tako so zajeli vse mejne intenzitete padavin znotraj 24 ur. Primerne so tako za modeliranje padavin in odtokov za majhna in velika povodja pri poljubni količini padavin. Edina slabost teh razporeditev je, da so nevihte omejene s 24 urami (Spellman, Whiting 2004). Na sliki 2 sta prikazana prva dva razreda SCS 24-urnih porazdelitev, ki opisujeta razmerje akumuliranih in 24 urnih padavin v odvisnosti od časa v urah.



Slika 1: Tipična 24-urna razporeditev padavin (USDA SCS, 1956)



Slika 2: SCS 24-urna razporeditev (USDA SCS, 1986)

Na podlagi teh ocen so izdelali padavinske karte, ki se uporabljajo za definiranje mej med enakimi skupnimi padavinami znotraj določenega obdobja. To nam omogoča, da lahko povežemo količino in višino padavin za določena trajanja nevihte znotraj regije. Tako lahko narišemo karte (količina – trajanje padavin) za različne povratne dobe in različne čase trajanja nevihte, na katerih med seboj povežemo točke z enako višino padavin. Te višine padavin veljajo za območja velika do 16 km². Večja območje je potrebno prilagoditi, kajti povprečna količina padavin glede na celo območje je potem manjša kot maksimalna vrednost, ki je napisana na karti. Na splošno višina-območje-trajanje zveza variira s tipom nevihte in intenzivnostjo nevihte znotraj regije.

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).

Najpreprostejšo obliko sintetičnega histograma je prikazal El-Jabi za območja Monctona in Kanade leta 1973 (El-Jabi, Sarraf, 1991):

$$I = \frac{a}{(t + b)} \quad (1)$$

I ... intenziteta padavin [mm/min]

t ... trajanje padavin [min]

a, b linearna koeficienta, ki sta odvisna od frekvence ali periode vračanja

Preglednica 1: Vrednosti koeficientov a, b [mm/min] za različne periode vračanja

koeficient	perioda vračanja [leto]			
	2	5	10	15
a	22,20	30,25	35,16	37,91
b	16,11	14,23	13,25	12,90

Opazoval in meril je padavine od leta 1958 do leta 1985 na meteorološki postaji na letališču Moncton. Tako je dobil vrednosti koeficientov a in b za različne frekvence trajanja, ki so prikazane v preglednici 1. Iz teh podatkov lahko dalje razvijemo sintetične histograme.

Dobimo intenzivnost padavin v času pred in po nastopu maksimalnih padavin:

$$I_1 = \frac{ab}{\left(\frac{t_1}{r+b}\right)^2} \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{ab}{\left(\frac{t_2}{(1-r)+b}\right)^2} \quad (3)$$

I_1 intenzivnost pred nastopom maksimalnih padavin

I_2 intenzivnost po nastopu maksimalnih padavin

t_1 čas trajanja do nastopa maksimalnih padavin

t_2 čas trajanja po nastopu maksimalnih padavin

r razmerje med časom nastopa maksimalnih padavin in celotnim časom padavin

Iz enačb vidimo, da vrednost koeficienta r variira med 0 in 1. Vrednost 0 pomeni, da bodo maksimalne nevihte nastopile na začetku nevihte, vrednost 1 pa, da bodo maksimalne padavine nastopile na koncu nevihte.

Za določitev koeficienta r je uporabil 14 intenzivnih neviht daljših od 2 ur, ki so se zgodile med leti 1958 in 1985. Na podlagi teh neviht je ocenil intenzivnost maksimalnih padavin za 10, 15, 30, 60 in 120 minutne nevihte. Prišel je do rezultatov, da ta koeficient močno variira v odvisnosti od časa trajanja nevihte in tudi glede na različna mesta. Koeficienta r tako ne moremo predpostaviti, kajti dobili bi nerealne rezultate.

Z nadaljnjimi analizami so ugotovili, da je potrebno uporabiti nova linearna regresijska koeficienta m in n , s pomočjo katerih bi lahko predstavili variabilnost koeficienta r :

$$r = \frac{m}{t+m} \quad (4)$$

$$m = 63.6$$

$$n = 100.1$$

$$I_1 = \frac{abm^2}{[t_1(t+n) + mb]^2} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{ab(t+n-m)}{[t_2(t+n) + b(t+n-m)]^2} \quad (6)$$

Izbor konstantne vrednosti koeficienta r predstavlja preprostejšo metodo sintetičnega histograma. Vendar moramo v nekaterih primerih, npr ko optimiziramo kanalizacijska omrežja, uporabiti tudi variabilne vrednosti koeficienta r v določenem času. Izbor koeficienta r nima vpliva na maksimalni odtok ampak le na čas nastopa maksimalnega odtoka.

2.2 Efektivne padavine

Padavine, ki padejo na površje in površinsko odtečejo imenujemo efektivne ali neto padavine. Te padavine ne zajemajo prestreženih padavin na vegetaciji, padavin, ki se zadržijo na površju in infiltriranih padavin v zemljino. Efektivne padavine torej dobimo tako, da od izmerjenih padavin odštejemo padavinske izgube (Smith Inc., junij 2008).

2.3 Padavinske izgube

Med padavinske izgube štejemo prestrežene padavine, infiltrirane padavine in padavine, ki se zadržijo na površju ter ne prispevajo k površinskemu odtoku. Celotna količina padavinskih izgub je vsota:

- padavin, ki se zadržijo v vegetaciji ter krošnji dreves
- infiltriranih padavin v zemljino
- zadrževanje v površinskih depresijah

Hidrologi so zaradi pomanjkanja območnih podatkov in meritev razvili večje število matematičnih modelov za izračun padavinskih izgub. Ti matematični modeli v večini primerov zajemajo prepustna in neprepustna območja (Smith Inc., junij 2008).

2.3.1 Evapotranspiracija

Pojem evapotranspiracija zajema evaporacijo in transpiracijo. Evaporacija je druga beseda za izhlapevanje in vključuje neposredno izhlapevanje vode s površine in vegetacije. Transpiracija pa predstavlja celoten krog gibanja vode z začetkom, ko rastlina črpa vodo iz zemlje in jo nato uporablja za življenjske procese in na koncu izpusti v ozračje (Brilly in Šraj, 2005).

Evapotranspiracija je zelo pomembna pri računanju padavinskih izgub. Z njeno pomočjo lahko ločimo meteorološki vpliv od vplivov, ki so povezani z naravo, površjem in vegetacijo. Pri matematičnih modelih se uporablja potencialna evapotranspiracija. Ta matematična količina opisuje maksimalne možne padavinske izgube, ki so odvisne od evaporacije in transpiracije. Največja potencialna evapotranspiracija bo tako dosežena podnevi, ob neomejeni količini padavin na vegetaciji in površju zemlje. Tako jo lahko zapišemo kot funkcijo samo meteoroloških spremenljivk (Eagleson, 1970).

2.3.2 Infiltracija

Je proces pronicanja vode v zemljino. Odvisna je od številnih dejavnikov: tipa zemljine, rabe zemljišča, nagiba (naklon) površja, profila zemljine in vlage. Količina infiltrirane vode je primarno odvisna tudi od vrste in velikosti nevihte. Različni modeli uporabljajo različne enačbe in približke za izračun infiltracije, tako da moramo dobro poznati razmere v zemljini na opazovanem območju (Brilly in Šraj, 2005).

Infiltracija se prične s prodiranjem vode na površju zemljine zaradi gravitacije in kapilarne sile. Obe ti sili delujeta vertikalno navzdol in tako omogočata pronicanje vode. Kapilarna sila omogoča prehajanje vode iz večjih por v manjše kapilarne pore. Voda najprej zapolni te kapilarne pore tako, da pronica s pomočjo gravitacijske sile, ki naleti na povečan upor. Istočasno se lahko tudi zmanjša infiltracija na površju, kajti padavine na začetku nevihte ustvarijo na suhem površju dodatni pritisk, ki zmanjša začetno infiltracijo. Po nekaj urah se na

površini nabere plast vode in se prične skoraj konstantna infiltracija, ki traja vse dokler se ne konča nevihta. Proces infiltracije tako razdelimo na tri dele (Gray, 1973):

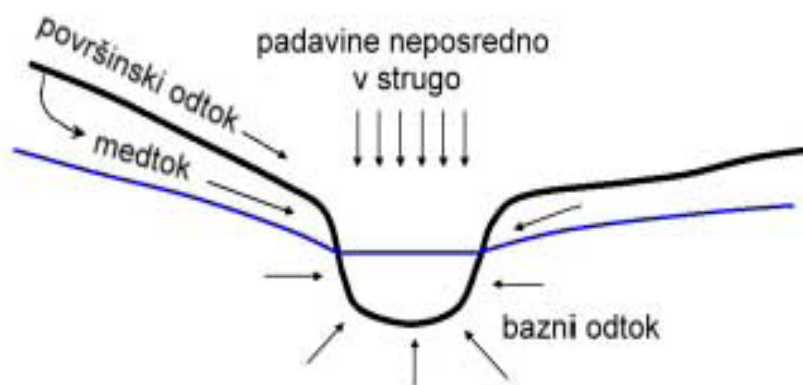
- prodiranje vode v površinski sloj zemeljskega površja
- pronicanje vode skozi različne zemljine
- tok po globokih razpokah

3 POVRŠINSKI ODTOK

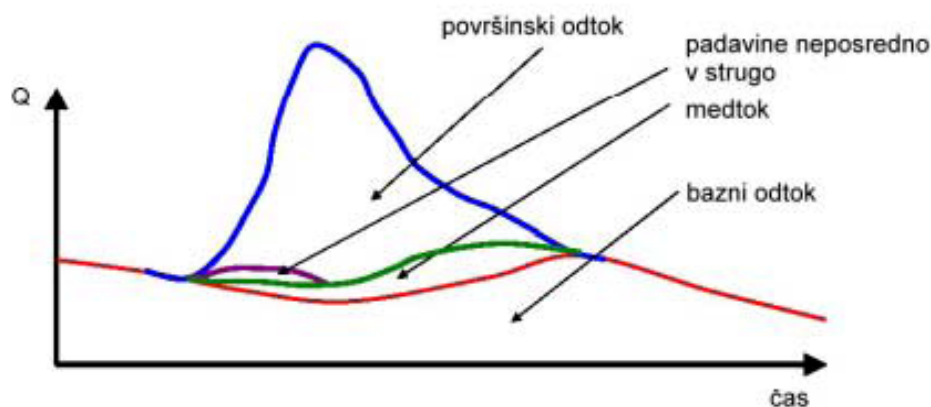
Pri rečnih odtočnih analizah je izbira metod za izračun sprememb padavinskega presežka ključni faktor na spremembe odtoka. Ene metode uporabljajo hidrogram enote in temeljijo na predpostavki, da je pretvorba padavinskega presežka, ki vpliva na spremembe odtoka, linearen in časovno trajen proces. Druge pa temeljijo na matematičnih simulacijah površinskega odtoka in uporablja približne vrednosti koeficientov, ki so izračunani na podlagi kinematičnih enačb za nestalni enodimenzijski tok odprtega kanala. V diplomski nalogi se bom posvetil pristopu, ki uporablja hidrogram enote (Us Army Corps of Engineers, 1994).

3.1 Razdelitev odtoka

Za izračun in razdelitev odtoka v povodju uporabljamo diagram časovnih sprememb, ki se imenuje hidrogram. Hidrogram odtoka je razdeljen na bazni odtok in površinski odtok. Površinski odtok zajema padavine, ki padejo neposredno v strugo, padavine, ki odtečejo površinsko ter medtok, med ali tik po nevihti. Bazni odtok pa predstavlja podpovršinski odtok, ki je posledica predhodnih razmer v zemljini ter izcejanje podzemnih voda v strugi vodotoka. Za določitev celotnega odtoka moramo upoštevati seštevek baznega in površinskega odtoka (Us Army Corps of Engineers, 1994). Posamezni deli odtoka padavin ter deleži posameznih odtokov na hidrogramu so prikazani na slikah 3 in 4.



Slika 3: Posamezni deli odtoka padavin (prirejeno po Mckillop, 2004)



Slika 4: Deleži posameznih odtokov na hidrogramu (prirejeno po Mckillop, 2004)

3.2 Hidrogram enote

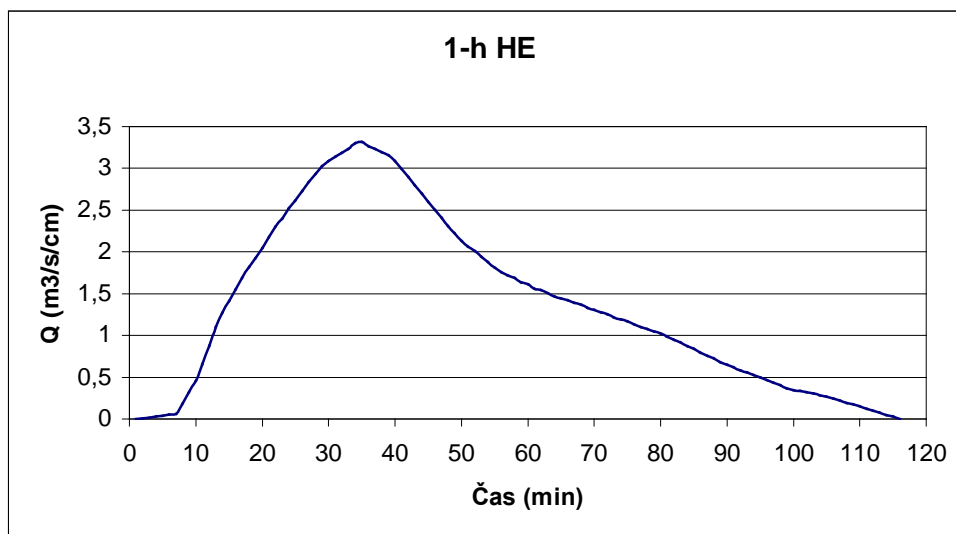
Uporablja se za simuliranje površinskega odtoka in predstavlja površinski odtok na koncu povodja, ki ga povzroča ena enota efektivnih padavin. Efektivne padavine predstavljajo celotne padavine brez padavinskih izgub. V Ameriki to enoto označujejo z 1 palec, v Evropi je pa enota 10 mm. Presežek padavin je razporejen konstantno v določenem času.

Za osnovo vzame postopek predpostavko, da so efektivne padavine razporejene enakomerno časovno in prostorsko po povodju. Tako lahko tok iz povodja obravnavamo kot stacionarno nelinearen sistem in kot matematični model uporabimo vsoto konvolucije (Brilly in Šraj, 2005).

Ostale predpostavke, ki jih zajema hidrogram enote so še:

- Presežek in izgube padavin upošteva kot povprečne vrednosti padavin na celem povodju.
- Površinski odtok v določenem času je sorazmeren volumnu odtoka (predpostavka linearnosti).
- Površinski hidrogram odtoka zaradi presežka padavin je neodvisen od časa nastopa padavin.

Prva predpostavka tako vpliva na izbiro površine povodja. Tako moramo povodje razdeliti na podpovodja, ki so sprejemljiva in zajemajo ozemlja s podobnimi lastnostmi. Druga in tretja predpostavka vplivata na dolžino nevihte in njeno intenzivnost. Za dobre rezultate hidrograma enote moramo vzeti nevihte, ki so močnejše in zajemajo časovno kratek čas. (Us Army Corps of Engineers, 1994). Primer 1-urnega hidrograma enote je prikazan na sliki 5.



Slika 5: 1-urni hidrogram enote

4 MODELIRANJE S PROGRAMOM HEC HMS 3.2

HEC-HMS je razvila ameriška vojska, in sicer hidrološki inženirski center (HEC) za simulacijo padavinskega toka. Je nadgradnja programa HEC-1, ki je bil prvič predstavljen leta 1998. Takrat je bil narejen za DOS okolje, tako da so morali program prilagoditi novi računalniški opremi in delu z okni (Windows).

V ta program lahko vključujemo naravni in umetni odtok iz povodja, zaloge vode na velikih rečnih povodjih ter poplave. Tako lahko z njim modeliramo pregrade in prepuste, napovedujemo poplave, ugotavljamo odtoke s povodja, opravljamo študije bodoče urbanizacije in podobno. Prav tako lahko vanj vnašamo podatke iz različnih računalniških programov, tako da je kompatibilen z novejšimi modernimi programi za dimenzioniranje površinskega odtoka (Brilly in Šraj, 2005).

Celotna izdelava projekta poteka v treh korakih:

1. Izdelava modela povodja (shema povodja - omogočimo vnos vhodnih podatkov in ustreznih parametrov povodja)
2. Izdelava meteorološkega modela (določitev padavin za posamezna podpovodja, ki so kasneje uporabljena za izračune hidrogramov odtoka)
3. Izdelava kontrolnega modela (prikaz rezultatov – rezultati so lahko prikazani v grafični ali tabelarični obliki)

5 PREGLED METOD ZA IZRAČUN PADAVINSKIH IZGUB

5.1 Uvod

V nadaljevanju bom predstavil 16 najbolj uporabnih metod izračuna padavinskih izgub, ki vse temeljijo na zakonu o ohranitvi mase. To pomeni, da vse upoštevajo enačbe, s katerimi vse vstopne padavine v modelu enačimo z vsoto efektivnih padavin (Us Army Corps of Engineers, 2008).

Izbral sem si padavinski dogodek in mu s pomočjo različnih metod določil izgube. Izbran padavinski dogodek in osnovni podatki o podpovodju so prikazani v preglednici 2.

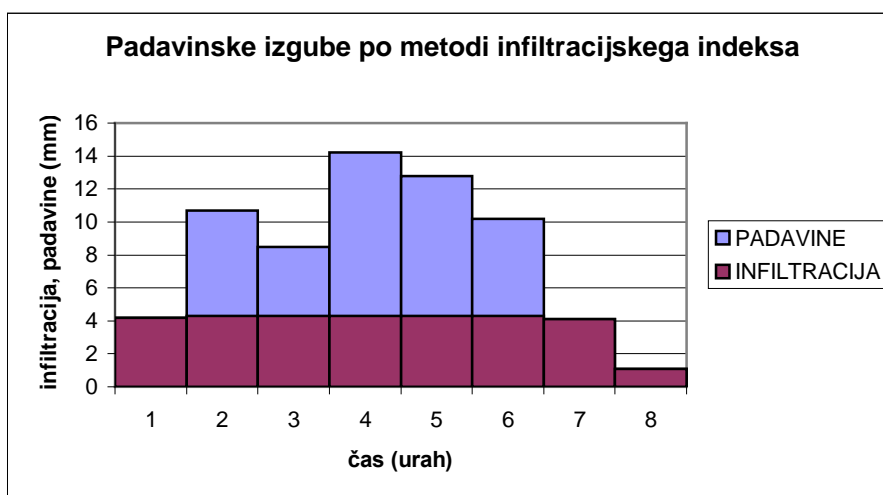
Preglednica 2: Padavinski dogodek in osnovni podatki o povodju

Čas [h]	Padavine [mm]		površina	50 km ²
1	4,2		kat. zemljine	C (glinena ilovica)
2	10,7		raba zemljišča	park
3	8,5		padec povodja	3 promile
4	14,2		Lpov	8546 m
5	12,8		Lca	6895 m
6	10,2			
7	4,1			
8	1,1			

5.2 Metode za izračun padavinskih izgub:

5.2.1 Metoda infiltracijskega indeksa

Je najpreprostejša metoda računanja padavinskih izgub. Infiltracijo obravnavamo kot konstantno skozi celotni padavinski dogodek. Količina infiltracije je odvisna le od infiltracijskega koeficienta Φ (Brilly in Šraj, 2005). Padavinske izgube za izbrani dogodek so prikazane na sliki 6.



Slika 6: Padavinske izgube po metodi infiltracijskega indeksa

5.2.1.1 Postopek in seznam enačb

Za vhodne podatke moramo pri tem modelu poznati količino padavin, padavine v preteklem času ter dolžino trajanja nevihte, na podlagi katerih določimo vrednost infiltracijskega indeksa. Padavinske izgube se porazdelijo enakomerno skozi celotni padavinski dogodek.

V primerih, ko imamo podatke za padavine in meritve pretočnih lastnosti povodja, lahko uporabimo naslednje enačbe:

$$r_d = \sum_{m=1}^M (R_m - \phi \cdot \Delta t) \quad (7)$$

r_d ... višina površinskega odtoka [mm]

R_m ... padavine znotraj določenega intervala [mm]

Φ ... fi indeks [mm]

M ... število padavinskih intervalov, ki prispevajo k površinskemu odtoku

Δt ... časovni interval

$$r_d = \frac{V_d}{A} \quad (8)$$

V_d ... volumen površinskega odtoka [mm³]

A ... površina povodja [mm²]

$$V_d = \sum_{n=1}^N Q_n \cdot \Delta t = \Delta t \cdot \sum_{n=1}^N Q_n \quad (9)$$

Q_n ... celotni površinski odtok iz povodja

Δt ... časovni interval

N ... število intervalov, ki prispevajo k površinskemu odtoku

$$\sum f_i = \sum f_p \cdot \phi \quad (10)$$

$$f_i = \frac{\sum f_p \cdot \phi}{\sum t} \quad (11)$$

$$f_i = f_1, f_2, \dots, f_n$$

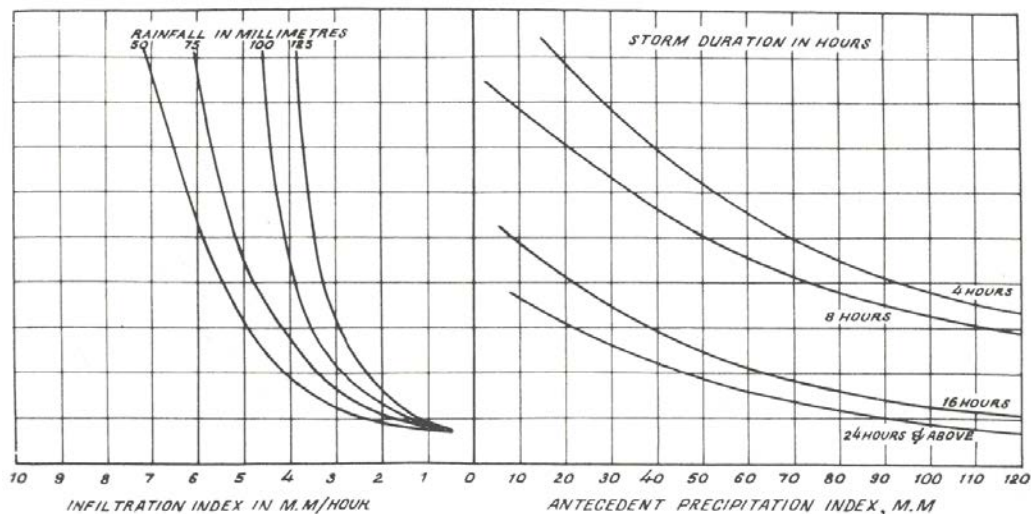
f_i ... količina infiltriranih padavin v času t [mm]

f_p ... količina padavin v času t [mm]

Φ ... infiltracijski indeks

$\sum t$... čas trajanja padavinskega dogodka

A Bhatnagar je podal grafe (slika 7) in enačbe za določitev vrednosti Φ indeksa za indijska povodja, ki jih je izdelal na podlagi 17 indijskih podpovodij, ker ni imel na razpolago meritev pretočnih lastnosti povodja.



Slika 7: Grafi za določanje vrednosti Φ indeksa (Bhatnagar)

$$API = \frac{p_1}{1} + \frac{p_2}{2} + \frac{p_3}{3} + \dots + \frac{p_{10}}{10} + \frac{\rho_{20}}{20} \quad (12)$$

API ... padavine v preteklem času

p_n ... količina povprečnih padavin n dni pred pričetkom nevihte

ρ ... celotne padavine, ki so padle v sezoni pred deset dnevno periodo

Faktor API je odvisen od predhodne vlažnosti v zemljini, katero je zelo težko določiti. S to enačbo se poenostavi izračun predhodne vlažnosti in dobi zadovoljive rezultate.

5.2.2 Hortonov model

Leta 1933 je Horton poskušal opisati proces infiltracije. Opazoval je pronicanje v zemljino in ugotovil, da se sposobnost infiltracije zmanjšuje skoraj eksponentno od neke začetne vrednosti f_0 do končne konstantne vrednosti f_c . (Smith, 2008). Vrednosti koeficientov f_0 in f_c so podane v preglednici 3 in 4.

Preglednica 3: Vrednosti koeficienta f_0 za različne tipe zemljin (Akin, 1993)

Soil Type	tip zemljine	f_0 (mm/hr)
Dry sandy soils with little or no vegetation	suha peščena zemljina z malo ali nič vegetacije	127
Dry loam soils with little or no vegetation	suha ilovnata zemljina z malo ali nič vegetacije	76,2
Dry clay soils with little or no vegetation	suha glinasta zemljina z malo ali nič vegetacije	25,4
Dry sandy soils with dense vegetation	suha peščena zemljina z gosto vegetacijo	254
Dry loam soils with dense vegetation	suha ilovnata zemljina z gosto vegetacijo	152
Dry clay soils with dense vegetation	suha glinasta zemljina z gosto vegetacijo	51
Moist sandy soils with little or no vegetation	vlažna peščena zemljina z malo ali nič vegetacije	43
Moist loam soils with little or no vegetation	vlažna ilovnata zemljina z malo ali nič vegetacije	25
Moist clay soils with little or no vegetation	vlažna glinasta zemljina z malo ali nič vegetacije	7,6
Moist sandy soils with dense vegetation	vlažna peščena zemljina z gosto vegetacijo	84
Moist loam soils with dense vegetation	vlažna ilovnata zemljina z gosto vegetacijo	5,1
Moist clay soils with dense or no vegetation	vlažna glinasta zemljina z gosto vegetacijo	18

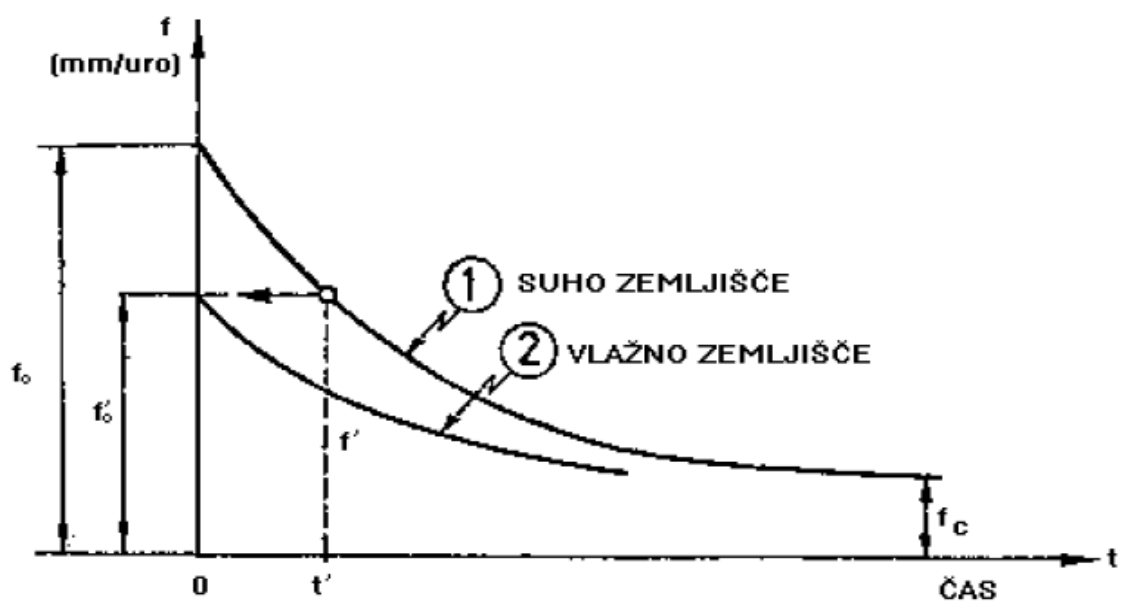
Določanje vrednosti koeficienta konstantne infiltracije k :

- Proporcionalne, sorazmerne padavinske izgube:
Maksimalno stopnjo infiltracije opišemo kot sorazmerne padavinske izgube. V tem primeru vzamemo vrednost koeficienta $k = 1$ [1/h].
- Začetne padavinske izgube/nadaljnje padavinske izgube:
Maksimalno stopnjo infiltracije opišemo kot začetne in nadaljnje padavinske izgube. V tem primeru vzamemo vrednost koeficienta $k = 2$ [1/h].
- Začetne padavinske izgube/proporcionalne padavinske izgube:
Maksimalno stopnjo infiltracije opišemo kot začetne in proporcionalne, nadaljnje padavinske izgube. V tem primeru vzamemo vrednost koeficienta $k = 3$ [1/h].

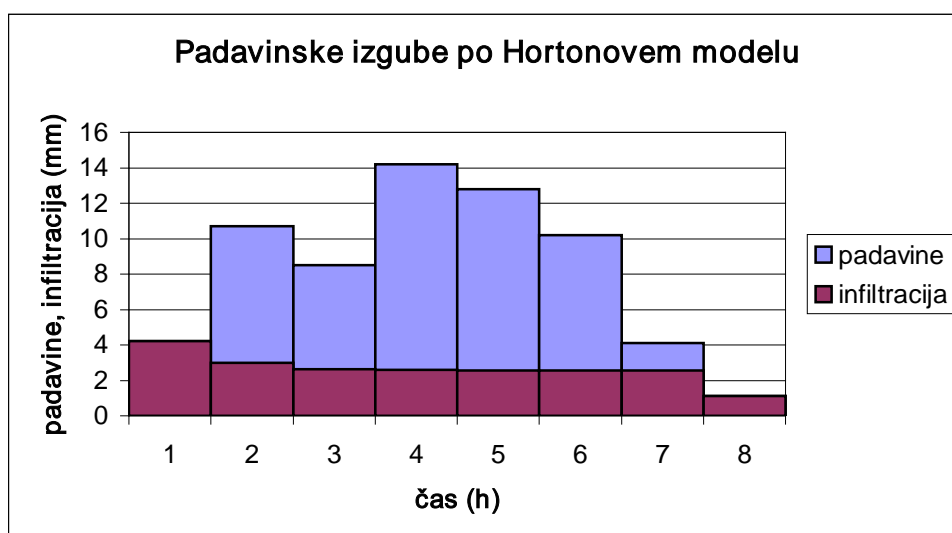
Preglednica 4: Vrednosti koeficientov f_c in k za različne tipe zemljin

Soil Type	tip zemljine	f_c (mm/hr)	k (1/min)	k (1/hr)
Clay loam, silty clay loam	glinasta ilovica, zamuljena glinasta ilovica	0,0 - 1,3	0,069	2,00
Sandy clay loam	peščena, glinasta ilovica	1,3 - 3,8	0,069	2,00
Silt loam, loam	zamuljena ilovica, ilovica	3,8 - 7,6	0,069	2,00
Sand, loamy sand, sandy loams	pesek, ilovnat pesek, peščena ilovica	7,6 - 11,4	0,069	2,00

Ta model temelji na Hortonovi teoriji infiltracije, ki uporablja dejstvo, da je infiltracija hitrejša pri suhi podlagi (slika 8). To pomeni, da z daljšim časom padavin tla postajajo bolj vlažna in tako pride do zmanjšanja infiltracije. Pri suhih podlagah imamo več por znotraj zemljine in tako lahko zemljina sprejme več vode. Prav tako imamo večje kapilarne sile, ki povzročajo pronicanje vode navzdol (Gedzelman, 2008). Za izbrani primer dobimo padavinske izgube prikazane na sliki 9.



Slika 8: Intenziteta infiltracije po Hortonu (prirejeno po Jovanović, 1974)



Slika 9: Padavinske izgube po Hortonovem modelu

5.2.2.1 Postopek in seznam enačb

Hortonov model je tako postal osnova za razvoj ostalih modelov. Osnovna enačba za izračun infiltracije:

$$f_{capc} = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt} \quad (13)$$

f_{capc} ... maksimalna intenziteta infiltracije [mm/h]

f_0 ... začetna intenziteta infiltracije [mm/h]

f_c ... bazična intenziteta infiltracije (odvisna od zemljine) [mm/h]

t ... čas, ki je pretekel od začetka padavin

k ... konstanta infiltracije (odvisna od časa, ki je pretekel od začetka padavin)

Dejanska intenzivnost infiltracije mora biti v vsakem časovnem intervalu nevihte enaka vrednosti intenzivnosti padavin i ali maksimalni infiltracijski sposobnosti f_{capc} . Merodajna je manjša vrednost. Tako dobimo dalje naslednji enačbi:

$$f = f_{capc} \quad \text{za} \quad i \geq f_{capc} \quad (14)$$

$$f = i \quad \text{za} \quad i \leq f_{capc} \quad (15)$$

f ... dejanska intenziteta infiltracije [mm/h]

i ... intenziteta padavin [mm/h]

5.2.3 Model začetnih in enakomernih izgub

Uporabljamo ga pri podpovodjih, za katera nam primanjkuje podatkov o lastnostih zemljin. Primeren je tudi za določene študije, ki se ukvarjajo s pretočnimi in časovnimi razmerami (čas-pretok).

Potrebujemo majhno število podatkov, in sicer začetne izgube (preglednica 5), konstantno infiltracijo in delež neprepustnega površja. Začetne izgube zajemajo padavine, ki se infiltrirajo ali zadržijo v zemljini preden pride do površinskega odtoka. Konstantna infiltracija se pojavi v času, ko se prične površinski odtok in je ves čas trajanja nevihte konstantna ne glede na dolžino časa trajanja nevihte (preglednica 6). Neprepustna površina predstavlja površje, kjer

ne pride do infiltracije. Vse padavine, ki padejo na to površje se prištejejo k površinskemu odtoku (Us Army Corps of Engineers, 2008). Izračuni za moj primer so prikazani na sliki 10.

Preglednica 5: Izgube prestrezanja ali začetne izgube

pridelek	višina pridelka (cm)	prestrezanje (mm)
žito	182,88	0,762
bombaž	121,92	0,8382
tobak	121,92	1,778
majhna žita	91,44	4,064
trava	30,48	2,032
detelja	30,48	2,794

(Linsley, Kohler, Paulhus, 1975)

gozd		12,7
------	--	------

(Viessman, 1977)

Sposobnost skladiščenja (Horton 1935)

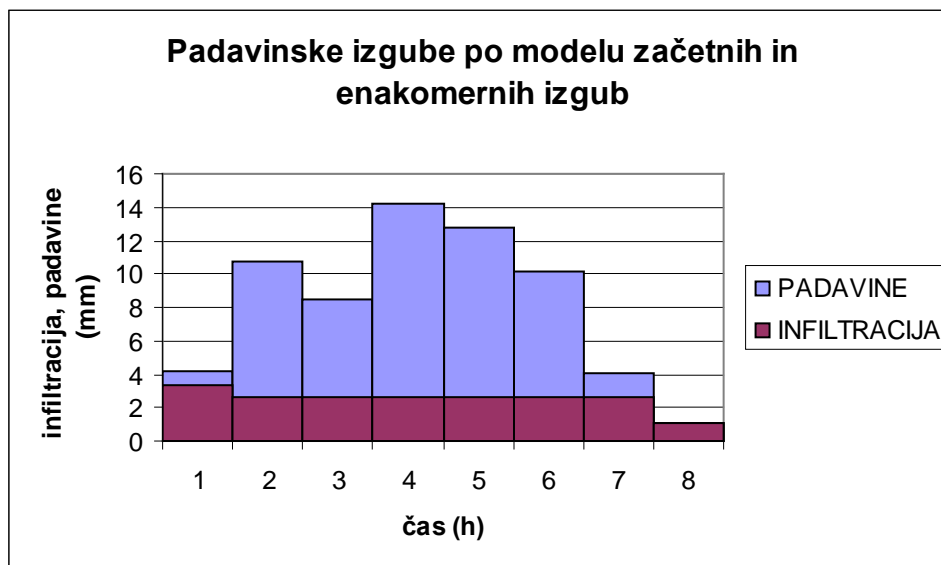
kmetijska obm.		12,7 - 38,1
gozdovi, pašniki, travniki		12,7 - 38,1

Celotne površinske izgube (Horton 1935)

urbana prepustna obm.		2,54 - 12,70
urbana neprepustna obm.		2,54 - 5,08

Preglednica 6: SCS klasifikacija zem., infiltracijske izgube za različne tipe zem. (SCS, 1986)

kategorija zemljine	Opis zemljine	konstantna infiltracija [mm/h]
A	Nizek odtočni potencial. Zemljina ima tudi, če je nasičena, visoko stopnjo infiltracije. Globoke, dobro drenirane zemljine z zmerno teksturo (pesek, globoka rečna naplavina).	7,62
B	Povprečni do nizek odtočni potencial. Zemljina ima, če je nasičena, povprečno stopnjo infiltracije vode. Plitve rečne naplavine, peščena ilovica z zmerno prepustnostjo.	3,85 - 7,50
C	Visok do zmeren odtočni potencial. Zemljina ima, če je nasičena, nizko stopnjo infiltracije vode. Glinena ilovica, plitva peščena ilovica, zemljine z nizko vsebnostjo organskih snovi in zemljine z običajno visoko vsebnostjo gline	1,30 - 3,85
D	Visok odtočni potencial. Zemljina ima, če je nasičena, nizko stopnjo infiltracije vode. Zemljine z visoko gladino talne vode, z glinastim slojem ali neprepustnim slojem na poočršini ali tik pod površino, zaslanjena zemljišča ipd. Zemljine imajo zelo nizko stopnjo prepustnosti.	0,00 - 1,30



Slika 10: Padavinske izgube po modelu začetnih in enakomernih izgub

5.2.3.1 Postopek in seznam enačb

Značilno je, da je maksimalna potencialna stopnja izgub f_c skozi cel dogodek konstantna. Na podlagi te predpostavke lahko zapišemo naslednjo enačbo:

$$pe_t = \begin{cases} p_t - f_c; & p_t \geq f_c \\ 0; & sicer \end{cases} \quad (16)$$

pe_t ... efektivne padavine

p_t ... celotna količina padavin

f_c ... maksimalna potencialno stopnja izgub

Zgoraj zapisana enačba ne upošteva začetnih izgub, ki zajemajo prestrežene padavine in skladiščenje vode v depresijah. Padavine se lahko zadržujejo na vegetaciji, do skladiščenja pa pride zaradi topografskih značilnosti povodja. Z upoštevanjem teh začetnih izgub, dobimo naslednjo enačbo:

$$pe_t = \left\{ \begin{array}{l} 0; \sum p_t \leq I_a \\ p_t - f_c; \sum p_t \geq I_a, p_t \geq f_c \\ 0; p_t \geq I_a, p_t \leq f_c \end{array} \right\} \quad (17)$$

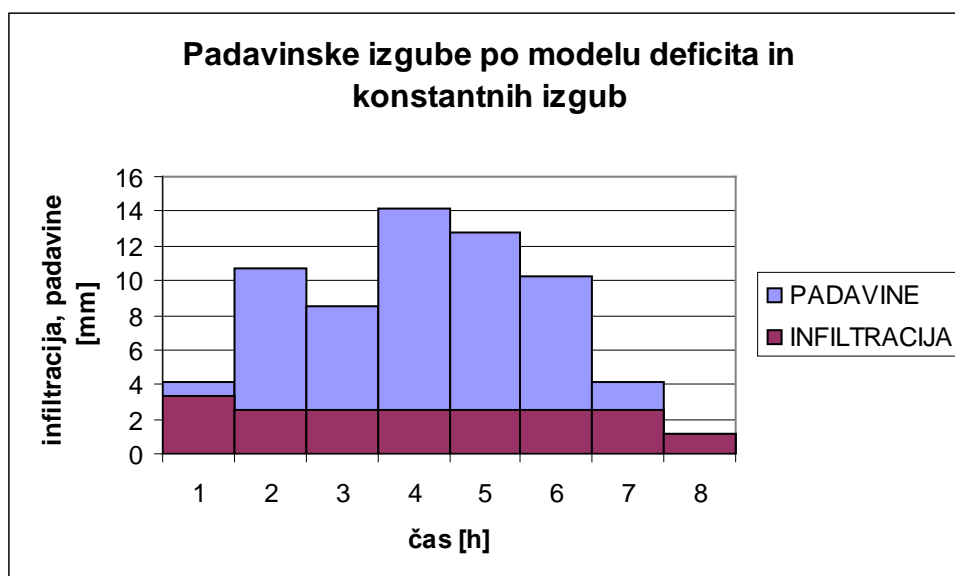
I_a ... začetne izgube padavin (prestrezanje in skladiščenje vode)

Pri tem modelu za opis zemljine ter njeno uporabo na povodju uporabimo samo en parameter (enakomerna stopnja izgub) in samo en začetni pogoj (začetne izgube). Iz enačbe lahko vidimo, da v primerih, ko imamo vsoto padavin manjšo od začetnih izgub, ne pride do površinskega odtoka. Tako stanje se pojavi, ko je zemljina suha. V primeru, ko imamo nasičeno zemljino, se bodo pa začetne izgube približevali vrednosti 0 in bo prišlo maksimalnega odtoka. Konstantna stopnja padavinskih izgub je z drugimi besedami končna infiltracijska sposobnost zemljine. V primerih, ko nam primanjkuje podatkov za zemljino, je bila izdelana metoda SCS (1986), ki klasificira zemljine na osnovi infiltracijskega indeksa. Približne vrednosti infiltracijskih sposobnosti za različne tipe zemljin so prikazane v preglednici 6.

5.2.4 Model deficita in konstantnih izgub

Pri tem modelu obravnavamo en sloj zemljine in opazujemo njegove spremembe vlažnosti. Uporabljati ga moramo v povezavi z meteorološkim modelom, s katerim istočasno določamo evapotranspiracijo. Določitev potencialne evapotranspiracije je zelo pomembna, kajti z njeno pomočjo lahko določimo nasičenost zemljine z vodo med različnimi deževnimi dogodki. Vedeti moramo, da se konstantna infiltracija prične šele, ko je zemljina nasičena. Ta začetni deficit vode do nasičenosti predstavlja začetne razmere pri metodi in tako lahko na podlagi tega deficita določimo, koliko vode potrebujemo do maksimalne nasičenosti zemljine. Maksimalno skladiščenje izrazimo z globino vode na celotnem podpovodju. Prav tako moramo poznati infiltracijo nasičene plasti zemljine, ki jo določimo z aproksimacijo nasičene hidravlične prevodnosti.

Za izračun padavinskih izgub s tem modelom tako potrebujemo začetni deficit, maksimalni deficit, konstantno infiltracijo ter razmerje neprepustne površine s prepustno površino. Neprepustna površina ne prispeva k izgubi padavin in moramo padavine, ki padejo na to površino, prišteti k površinskemu odtoku (Us Army Corps of Engineers, 2008).



Slika 11: Padavinske izgube po modelu deficita in konstantnih izgub

Ta model je v osnovi enak kot model začetnih in enakomernih izgub. Razlikuje se le v tem, da se začetne izgube lahko obnovijo po dolgotrajnem obdobju brez padavin. Tako potrebujemo kot vhodne podatke začetne izgube, konstantne izgube ter stopnjo obnove. Stopnjo obnove lahko ocenimo kot vsoto evaporacije in infiltracije. Padavinske izgube za izbrani primer so prikazane na sliki 11.

Metoda uporablja enake preglednice in enačbe kot metoda začetnih in enakomernih izgub, tako da so preglednice, postopki in enačbe prikazani v poglavju 5.2.3.

5.2.5 Mrežast model deficita in konstantnih izgub

Ta model je nadgradnja modela deficita in konstantnih izgub. Opazovano podpovodje razdelimo na več delov in določimo vhodne podatke za vsak del posebej. Za to metodo je

značilno, da moramo razbrati meteorološke podatke ter evapotranspiracijo za vsak del posebej in jih opisati z razmerjem glede na povprečne vrednosti celotnega povodja. Zato tu potrebujemo večje število vhodnih podatkov, kajti poleg podatkov za celotno povodje, potrebujemo še podrobnejše podatke za dele povodja.

Prav tako kot pri že nekaterih zgoraj opisanih metodah tu potrebujemo začetni deficit vode, maksimalni deficit vode, infiltracijo nasičene plasti vode ter neprepustno površino za določene dele podpovodja. V večini primerov za končne izračune uporabljamo program HEC-HMS, ki ima v svoji podatkovni bazi zajeto večje število podatkov, ki opisujejo določene razmere. Poznati moramo razmere našega območja in s pomočjo programa izbrati ustrezne vhodne podatke. Kot sem omenil že zgoraj, moramo določiti še razmerje teh vhodnih podatkov glede na povprečne vrednosti celotnega podpovodja. V primerih, ko ima del podpovodja enake vhodne vrednosti kot celotno podpovodje, vzamemo privzeto vrednost koeficienta razmerja 1 (Us Army Corps of Engineers, 2008).

Postopek in enačbe so enake, kot pri modelu deficita in konstantnih izgub. Razlika je le v tem, da celotno povodje mrežasto razdelimo in računamo za vsak del mreže posebej. Preglednice in enačbe so prikazane v poglavju 5.2.3.

5.2.6 Model Greena in Ampta

Za določitev padavinskih izgub model uporablja poenostavljeno splošno Richardovo enačbo za nestalni vodni tok po zemljini. Prav tako predpostavimo, da ima zemljina na začetku po celotnem območju konstantno vlažnost in uporabimo konceptualno metodo infiltracije padavin. V enačbah je upoštevano tudi zadrževanje vode na površju, ki ne vpliva na začetne izgube. To površinsko zadrževanje upoštevamo kot dodatno padavinsko zadrževanje vode na površju.

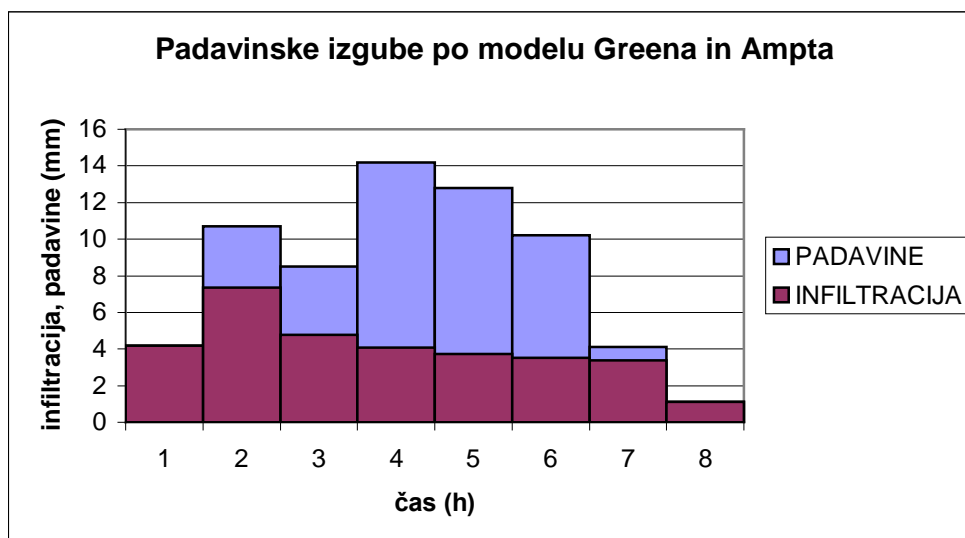
Pri tem modelu uporabimo za začetne pogoje primanjkljaj vlažnosti do zasičenosti. Ta deficit je ocenjen z razliko med poroznostjo zemljine in prostornino vode, ki je prisotna na začetku v zemljini. Za poroznost ne vzamemo celotne poroznosti zemljine, ampak moramo vzeti del

poroznosti, ki je prisotna pri infiltraciji. Tako moramo v modelu določiti sposobnost vsrkavanja zemljine, ki je odvisno 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).

Padavinske izgube dobimo na podlagi vhodnih podatkov, ki so začetne izgube, deficit vlažnosti, sposobnost vsrkavanja, hidravlična prevodnost zemljine ter razmerje neprepustne površine s prepustno površino (preglednica 7). Padavine, ki padejo na neprepustno površino tudi tukaj prištejemo k površinskemu odtoku (Us Army Corps of Engineers, 2008). Padavinske izgube za izbrani primer so prikazane na sliki 12.

Preglednica 7: Vrednosti vhodnih podatkov za različne tipe zemljin (Rawls, et al., 1982)

Vrsta zemljine	Poroznost [cm ³ /cm]	Sesanje vlažne fronte [cm]	Hidravlična prevodnost - zasičena [cm/h]
Pesek	0,437	10,6	21,00
Ilovnati pesek	0,437	14,2	6,11
Peščena ilovica	0,453	22,2	2,59
Ilovica	0,463	31,5	1,32
Zamuljena ilovica	0,501	40,4	0,68
Peščeno glinasta ilovica	0,398	44,9	0,43
Glinasta ilovica	0,464	54,6	0,23
Zamuljena glinasta ilovica	0,471	58,1	0,15
Peščena glina	0,430	63,6	0,12
Zamuljena glinasta ilovica	0,479	64,7	0,09
Glina	0,475	71,4	0,06



Slika 12: Padavinske izgube po modelu Greena in Ampta

5.2.6.1 Postopek in seznam enačb

Pri tem modelu so vse enačbe dobljene na podlagi predpostavke, da se voda infiltrira v relativno suho zemljino pri nevihti z ostro konico maksimalnih padavin. Značilno je, da pride po določenem času, ko imamo na površju presežek vode, do zasičenja zemljine z vlago do določene globine L . Globlje od te točka pa imamo deficit vode (Smith, 2008).

$$M = \phi - \Theta_i \quad (18)$$

M ... volumenski deficit vlage

Θ_i ... začetna vsebnost vode

Φ ... poroznost zemljine

Deficit vode zavzema vrednost med 0 in 0.5. V primeru, ko je zemljina zasičena, je ta vrednost 0. Ko imamo pa suho zemljino, se pa približuje vrednosti 0.5.

Za končne izgube padavin na prepustni površini uporabimo naslednjo enačbo:

$$f_t = K \cdot \left[\frac{1 + (\Phi - \Theta) \cdot S_f}{F_t} \right] \quad (19)$$

f_t ... izgube skozi periodo

K ... zasičena hidravlična prevodnost [mm/h]

S_f ... sesanje vlažne fronte

F_f ... komulativne izgube v času t

Efektivne padavine, ki vplivajo na površinski odtok, dobimo z razliko med padlimi in zgoraj izračunanimi padavinami. Za lažje določanje vrednosti parametrov za različne vrste zemljin po Green-Amptovi metodi je ameriška vojska izdelala preglednico 7.

Upoštevamo Darcy-jev zakon in zapišemo enačbo za hidravlično prevodnost:

$$f = \frac{dL}{dt} = -K \frac{\delta h}{\delta t} \quad (20)$$

$\frac{\delta h}{\delta t}$... hidravlični gradient

Celotno globino h infiltracije dobimo z naslednjo enačbo:

$$h = h_0 + L + S \quad (21)$$

h_0 ... globina vode na površju (ponavadi zanemarimo) [mm]

L ... globina že infiltrirane vode [mm]

S ... sesanje vlažne fronte [mm]

Dalje lahko izpeljemo enačbo za izračun celotnega volumna infiltracije F v zemljini:

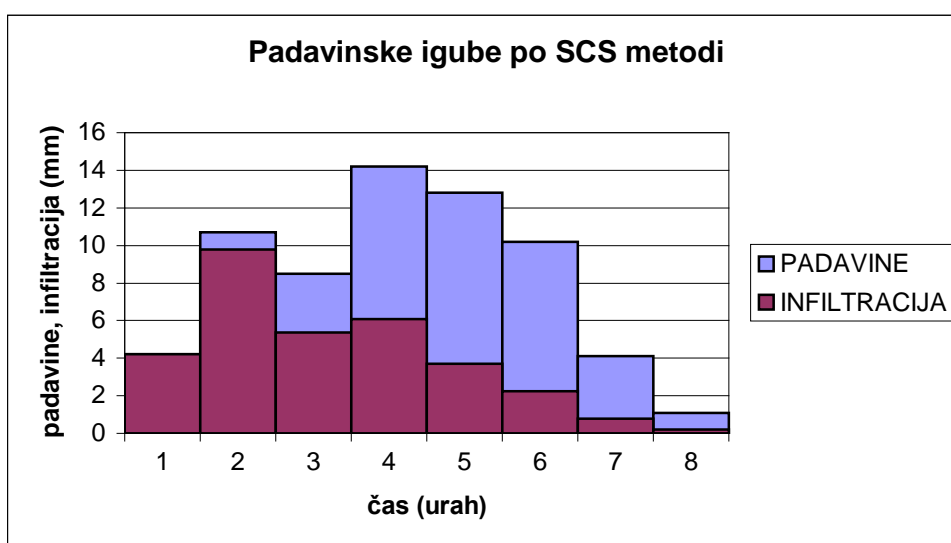
$$F = L \cdot M \quad (22)$$

Model Greena in Ampta uporabljamo pri nevihtah, ko voda prodira v suho zemljino z zaznavno vlažno fronto, usmerjenih navzdol. Poznati moramo tudi mejo med suho in zasičeno zemljino, ki mora biti zelo majhna. Zgoraj zapisana enačba za končne izgube padavin je primernejša za prepustnejše peščene zemljine..

5.2.7 SCS (Soil Conservation Service) model padavinskih izgub

S SCS modelom preračunavamo padavinske izgube v času trajanja nevihte. Čas je razdeljen na intervale, znotraj katerih model preračunava infiltracijski volumen, in sicer z razliko med infiltracijskim volumenom na koncu intervala in na začetku intervala. 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.

Poznati moramo, koliko vode lahko še sprejme zemljina, dokler ne pride do nasičenosti zemljine in površinskega odtoka. Ta vrednost ni enaka začetnim izgubam padavin, kajti sprememba te vrednosti vpliva na zmožnost infiltracije v kasnejšem času znotraj časa nevihte. Če te vrednosti ne poznamo, jo bo program HEC-HMS izračunal sam glede na maksimalno potencialno zadrževanje (S). Ta koeficient S je odvisen od koeficienta CN , ki opisuje lastnosti zemljine. Vrednost koeficienta CN sega med 100 (vodna telesa) in 30 (visoka zmožnost infiltracije) in ga določimo s pomočjo preglednic 8, 9 in 10. Prav tako ne smemo v ta koeficient zajeti neprepustne površine, ki se obravnava posebej, kot razmerje glede na celotno površje. Celoten presežek padavin na tem območju se prišteje k površinskemu odtoku (Us Army Corps of Engineers, 2008). Padavinske izgube za izbrani primer so prikazane na sliki 13.



Slika 13: Padavinske izgube po SCS modelu

Preglednica 8: Koeficienti CN za urbanizirane površine (Us Army Corps of Engineers, 2000)

Raba tal	% neprep. površin	Vrednosti CN glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
<i>Odprte površine (parki, nasadi, golf igrišča, pokopališča itd.)</i>					
slabi pogoji (pokritost s travo < 50 %)		68	79	86	89
povprečni pogoji (pokritost s travo 50 % do 75 %)		49	69	79	84
dobri pogoji (pokritost s travo > 75 %)		39	61	74	80
<i>Neprepustne površine</i>					
tlakovane površine, strehe, ceste		98	98	98	98
tlakovane ulice in ceste z robniki in kanaliziranimi odtoki		98	98	98	98
tlakovane ulice in ceste z odprtimi kanali		83	89	92	93
makadamske ceste (pesek)		76	85	89	91
neobdelane poti (zemlja)		72	82	87	89
<i>Urbana območja</i>					
komercialna in poslovna območja	85	89	92	94	95
industrijska območja	72	81	88	91	93
<i>Stanovanjske površine</i>					
povprečna velikost parcele do 500 m ²	65	77	85	90	92
povprečna velikost parcele 1000 m ²	38	61	75	83	87
povprečna velikost parcele do 1300 m ²	30	57	72	81	86
povprečna velikost parcele do 2000 m ²	25	54	70	80	85
povprečna velikost parcele do 4000 m ²	20	51	68	79	84
povprečna velikost parcele do 8000 m ²	12	46	65	77	82

Preglednica 9: Koeficienti CN za obdelana kmetijska zemljišča (USACE, 2000)

Raba tal	Hidrol. pogoji	Vrednosti CN glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
<i>Ledina, neobdelan svet</i>					
gola zemljina	-	77	86	91	94
delno poraščena zemljina (ostanki posevkov)	slabi ¹	76	85	90	93
	dobri ²	74	83	88	90
<i>Poljščine v vrsti</i>					
v ravni vrsti	slabi	72	81	88	91
	dobri	67	78	85	89
v ravni vrsti, delna poraščenost	slabi	71	80	87	90
	dobri	64	75	82	85
po plastnicah	slabi	70	79	84	88
	dobri	65	75	82	86
po plastnicah, delna poraščenost	slabi	69	78	83	87
	dobri	64	74	81	85
po plastnicah in na terasah	slabi	66	74	80	82
	dobri	62	71	78	81
po plastnicah in na terasah, delna poraščenost	slabi	65	73	79	81
	dobri	61	70	77	80
<i>Nizka žita</i>					
v ravni vrsti	slabi	65	76	84	88
	dobri	63	75	83	87
v ravni vrsti, delna poraščenost	slabi	64	75	83	86
	dobri	60	72	80	84
po plastnicah	slabi	63	74	82	85
	dobri	61	73	81	84
po plastnicah, delna poraščenost	slabi	62	73	81	84
	dobri	60	72	80	83
po plastnicah in na terasah	slabi	61	72	79	82
	dobri	59	70	78	81
po plastnicah in na terasah, delna poraščenost	slabi	60	71	78	81
	dobri	58	69	77	80
<i>Gosto sejane stočnice ali kolobarjeni travnik</i>					
v ravni vrsti	slabi	66	77	85	89
	dobri	58	72	81	85
po plastnicah	slabi	64	75	83	85
	dobri	55	69	78	83
po plastnicah in na terasah	slabi	63	73	80	83
	dobri	51	67	76	80

Preglednica 10: Koeficient CN za ostala kmetijska zemljišča (USACE,2000)

Raba tal	Hidrol. pogoji	Vrednosti CN glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
Pašnik, preriija	slabi	68	79	86	89
	povprečni	49	69	79	84
	dobri	39	61	74	80
Travnik, košen	-	30	58	71	78
Grmičevje	slabi	48	67	77	83
	povprečni	35	56	70	77
	dobri	30	48	65	73
Gozd v kombinaciji s travo (plantaže, sadovnjaki)	slabi	57	73	82	86
	povprečni	43	65	76	82
	dobri	32	58	72	79
Gozd	slabi	45	66	77	83
	povprečni	36	60	73	79
	dobri	30	55	70	77
Kmetija s poslopjem, podeželsko cesto in okoliškimi parcelami	-	59	74	82	86

5.2.7.1 Postopek in seznam enačb

Tukaj ocenimo presežek padavin (efektivne padavine), ki je funkcija pokrovnosti tal, rabe tal, vlažnosti tal in celotnih padavin. Efektivne padavine dobimo s pomočjo naslednje enačbe:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (23)$$

P_e ... akumulirane efektivne padavine v času t [mm]

P ... višina padavin v času t [mm]

I_a ... začetne izgube [mm]

S ... maksimalno potencialno zadrževanje [mm]

Z analiziranjem večjega števila manjših eksperimentalnih povodij je model SCS razvil empirično povezavo med I_a in S .

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (24)$$

To enačbo vstavimo v zgornjo in dobimo:

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad (25)$$

Porast padavin v času t je izračunan kot razlika med akumuliranimi padavinami na koncu ter na začetku časovnega intervala t . Maksimalno zadrževanje S je odvisno od parametra CN , katerega vrednosti so med 100 in 30 in so prikazane v preglednicah 10, 11, 12.. Vrednost CN je dobljena kot funkcija rabe in vrste tal ter predhodne vlažnosti ali pa s SCS krivuljami. Tako lahko zapišemo končno enačbo:

$$S = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1000 - 10 \cdot CN}{CN}, AMS \\ \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN}, SI \end{array} \right\} [\text{mm}] \quad (26)$$

CN ... številka krivulje (curve number)

Za povodja, ki so sestavljena iz več različnih tipov zemljin in več različnih načinov uporabe zemljišč, uporabimo naslednjo enačbo:

$$CN_{skupen} = \frac{\sum A_i \cdot CN_i}{A_i} \quad (27)$$

CN_{skupen} ... skupni CN

CN_i ... CN posameznega dela podpovodja

A_i ... površina pripadajočega podpovodja

5.2.8 Mrežast SCS model padavinskih izgub

Za ta model bi lahko rekli, da je podrobnejši in nadgrajen SCS model. Prav tako kot SCS model uporablja za vhodne podatke krivuljo porasti padavinskih izgub. Prednost je, da podpovodje razdelimo na manjše dele in nato za vsak del posebej določimo meteorološke razmere. Tako lahko natančneje opišemo razmere in obravnavamo vsak del podpovodja. Vsak del opišemo z individualnimi podatki in ga simuliramo posebej.

Končne rezultate dobimo z združitvijo vseh posameznih delov v celoto. Tudi pri tej metodi ima program HEC-HMS v svoji podatkovni bazi zajete podatke, ki opisujejo določene razmere, tako da moramo samo izbrati ustrezne vrednosti koeficienta CN . Poznati moramo tudi koliko vode lahko še sprejme zemljina, dokler ne pride do površinskega odtoka. To vrednost sem že navedel pri SCS modelu in se izračuna po enakem postopku kot pri SCS modelu. Kot vhodni podatek potrebujemo tudi faktor potencialnega zadrževanja, za katerega v večini primerov predpostavimo vrednost 1. S tem faktorjem uravnamo potencialno zadrževanje, preden ga pomnožimo s koeficientom 0.2 (Us Army Corps of Engineers, 2008).

Postopek in enačbe so enake, kot pri osnovnem SCS modelu in so prikazane v poglavju 5.2.8, razlika je le v tem, da celotno povodje mrežasto razdelimo in računamo za vsak del mreže posebej. Podpovodje tako razdelimo na več manjših delov, tako da končna enačba za izračun CN_{skupen} uporablja CN_i za posamezne dele mreže. HEC-HMS ima v svoji podatkovni bazi opise za posamezne celice mreže, tako da moramo poznati lokacijo celice, razdaljo potovanja vode do iztoka iz podpovodja, velikost A_i in CN_i posamezne celice. HEC-HMS računa presežek padavin (efektivne padavine) za vsako celico posebej neodvisno od ostalih z osnovno enačbo izračuna efektivnih akumuliranih padavin. Efektivne padavine poveže do odtoka iz povodja s pomočjo ModClark metode.

5.2.9 Metoda eksponentnih padavinskih izgub

Je empirična metoda, tako da jo moramo v vseh primerih kalibrirati. Prednost te metode je, da ne upošteva infiltracije kot konstantne vrednosti. Metoda porast infiltracije predstavlja kot logaritmično zmanjšanje akumulirane infiltracije. S tem zajema realnejše razmere, še posebej, ko je zemljina osušena pred pričetkom nevihte. Uporablja se za krajše simulacije padavin, kajti ne upošteva nobenih trajnih obnov sloja zemljine.

Za to metodo je zelo pomembna določitev parametra začetne zmogljivosti, ki predstavlja začetno akumulirano infiltracijo v času, ko se padavinske izgube povečujejo. Tako izrazimo ta parameter kot funkcijo predhodnega primanjkljaja vlažnosti zemljine do nasičenosti zemljine in je v večini primerov odvisen od nevihte. Poznati moramo tudi koeficient začetnih izgub, ki

ga določimo iz eksponentne infiltracijske krivulje. Za ta koeficient je privzeto, da je funkcija infiltracijskih karakteristik in je neodvisen od tipa zemljine, uporabe zemljine, vrste vegetacije ter ostalih značilnosti podpovodja. Te značilnosti zemljine potrebujemo za razmerje koeficienta, ki ga določimo z razmerjem pri katerem se nadaljuje eksponentno zmanjšanje infiltracijske sposobnosti ter pričetkom infiltracije. Vrednost tega koeficienta mora biti razumna in konstantna za večja, homogena podpovodja. Kot že iz imena metode vidimo, potrebujemo za določitev končnih izrazov tudi vrednost eksponenta funkcije. Ta je določen z vrednostjo med 0 in 1 ter je odvisen od razmer pri katerih nastopi nevihta, tako da moramo njegovo vrednost določiti za vsako območje posebej.

Za izračun končnih rezultatov tako pri tej metodi potrebujemo začetno akumulacijsko infiltracijo, koeficient začetnih izgub, koeficient razmerja, vrednost eksponenta ter razmerje neprepustne površine s prepustno površino. Neprepustna površina določimo enako kot pri modelu deficita in konstantnih izgub. (Us Army Corps of Engineers, 2008).

5.2.9.1 Postopek in seznam enačb

Pri primerih, ko imamo opisane frekvenčne intervale različnih kombinacij višine padlih padavin in trajanja padavin z log-normalno funkcijo, uporabimo stohastičen pristop. Zelo podoben pristop, ki vzame eksponentno razmerje med intenzivnostjo in frekvenco padavin so opisali Nicks (1995) in Brown, Foster (1987). Slabosti njihovega pristopa se kažejo predvsem v tem, da zajemajo celoten čas trajanja nevihte, ki ga ne moremo izračunati iz podatkov, tako da imamo določeno stopnjo negotovosti rezultatov. Moramo se vprašati ali se ta razporeditev pravilno obnaša pri daljših nevihtah z majhno intenziteto padavin (Dijk, 2002).

Alternativni pristop ne upošteva časa trajanja nevihte z določeno intenziteto, ampak višino padavin pri intenziteti. Tako lahko zapišemo preprosto razporeditev v eksponentni obliki:

$$P(\geq R) = P \cdot e^{\left(-\frac{R}{\bar{R}}\right)} \quad (28)$$

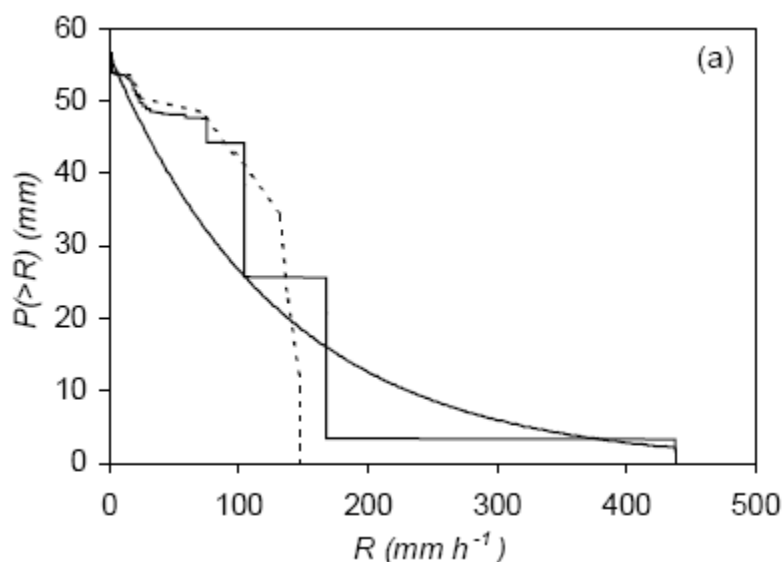
$P(\geq R)$... označuje višino padavin, ki pade pri večji intenziteti od R [mm]

P ... celotna višina padavin, ki je padla med neurjem [mm]

R ... intenziteta padavin [mm/hr]

\check{R} ... višina padavin, ki pade pri povprečni intenziteti padavin [mm/hr]

Parameter P izmerimo, medtem ko \check{R} izračunamo iz meritev padavin. Prednost tega pristopa je predvsem v tem, da imajo padavine z manjšo intenziteto tudi manjši vpliv na izračunano razporeditev parametra \check{R} , kot pri prej omenjenih časovnih pristopih. Seveda velja tudi obratno, da imajo padavine z veliko intenziteto tudi večji vpliv na parameter \check{R} . Za modeliranje odtokov in erozijskih koeficientov smo tako dobili ugodnejši in pravilnejši model (slika 14).

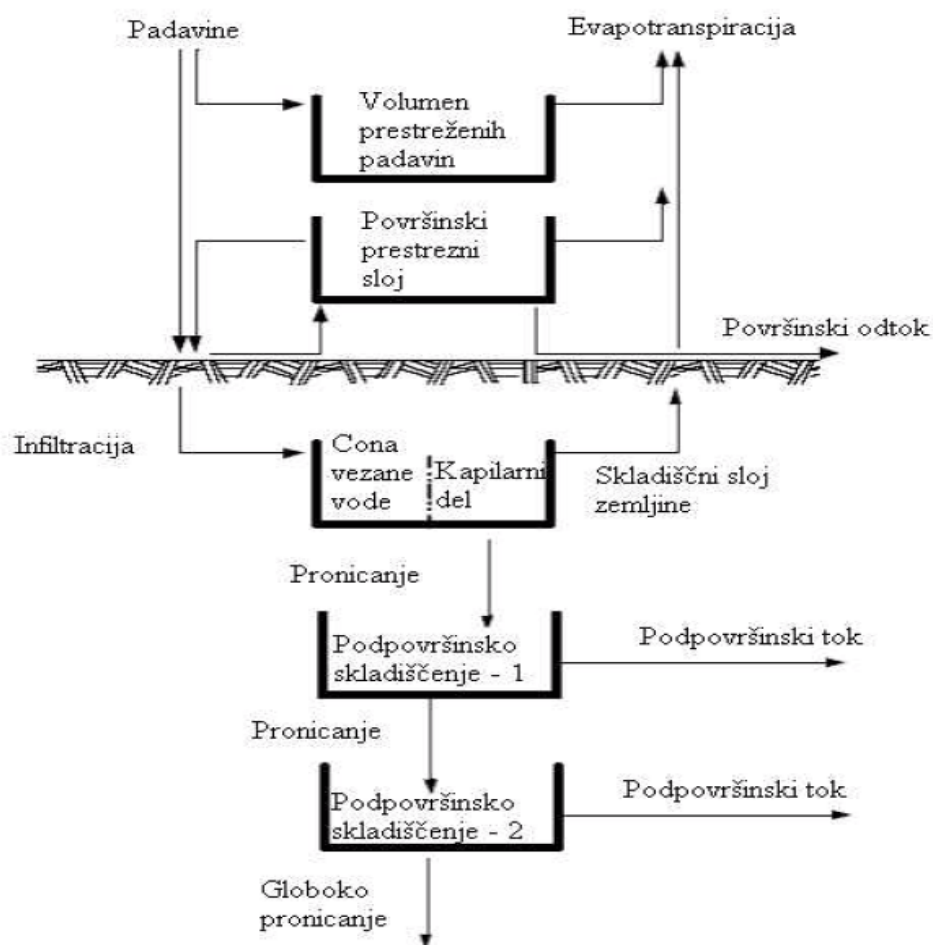


Slika 14: Prikaz padavinskih izgub po metodi eksponentnih izgub (prirejeno po Dijk, 2002)

5.2.10 Model upoštevanja vlažnosti zemljine (SMA)

Za ta model je značilno, da za računanje padavinskih izgub razdelimo zemljino na pet slojev. Ti sloji so: površinsko prestrezanje padavin, površinsko depresijo skladiščenja, vrsta zemljine, gornja podtalna voda in dolnja podtalna voda. S temi sloji opišemo dinamični proces gibanja vode na zemljini in skozi zemljino. Sloj vrste zemljine je nadalje razdeljen še na pritisk skladiščenja ter gravitacijo skladiščenja. Za sloj podtalne vode imamo tudi privzete razne poenostavitve in smo zato omejeni le za plitve sloje podtalnice.

Potrebujemo veliko število vhodnih podatkov, s katerimi dosežemo dobre rezultate za dolgo ciklične in zelo vlažne nevihte. Poznati moramo začetne razmere na površini zemljine. To pomeni, da moramo vedeti kakšna vegetacija raste na površju in tako določiti koliko padavin lahko pade na površje preden se prične pronicanje v zemljino. Padavine morajo najprej zapolniti ta sloj in zapolniti celotno evapotranspiracijo, da se lahko prične polnjenje ostalih slojev. V primerih, ko površje ni poraščeno z vegetacijo, vzamem to vrednost 0. Preostale padavine, ki se ne zadržijo v tem sloju, odtečejo v sloj površinskega skladiščenja. Ta sloj predstavlja maksimalno količino vode, ki se lahko zadrži na površju zemljine, preden se prične površinski odtok. Voda se nato iz tega sloja začne infiltrirati iz površja v zemljino. Površinski odtok se pojavi, ko je to skladišče polno in imamo še vedno presežek padavin. Prav tako kot pri ostalih vhodnih podatkih lahko v nekaterih primerih zanemarimo vpliv površinskega skladiščenja in vzamemo njegovo vrednost 0. Nato moramo določiti maksimalno infiltracijo iz površja v zemljino. Dejanska infiltracija določimo z linearno povezavo med trenutnim skladiščenjem na površju ter trenutnim skladiščenjem v zemljini. Prav tako kot že pri vseh ostalih modelih moramo tudi tukaj določiti neprepustno površino, ki se določi po enakem postopku, kot pri ostalih modelih. Odvečna voda nato pronica iz površinskega skladišča v skladišče znotraj zemljine. Tudi to lahko v nekaterih primerih zanemarimo in vzamemo vrednost 0. Ta sloj razdelimo na skladiščenje zaradi napetosti in zaradi gravitacije. Do pronicanja iz zemljine v napetostno skladiščenje bo prišlo v primeru, ko bo trenutna količina vode v skladišču zemljine presegla količino vode v napetostnem skladiščenu. Voda, ki se zadrži v napetostnem skladiščenu, se nato odstrani le z evapotranspiracijo. Ostala voda nato pronica s pomočjo gravitacije v gornjo podtalno vodo. Dejansko količino pronicanja vode se določi z linearno funkcijo med trenutnim skladiščenjem zemljine in trenutnim skladiščenjem podtalne vode. Iz gornje podtalne vode nato voda pronica v doljno podtalno vodo. Za oba sloja podtalnice moramo poznati količino maksimalnega skladiščenja, sposobnost filtriranja in koeficient podtalnice. Ta koeficient nam pove koliko časa je potrebno, da linearni rezervoar pretvori vodo iz skladišča v stranski odtok. Ta stranski odtok se nato prišteje k baznemu odtoku (slika 15). Prav tako kot pri prejšnjih plasteh, lahko v nekaterih primerih tudi ti dve plasti zanemarimo in vzamemo njuni vrednosti 0 (Us Army Corps of Engineers, 2008).



Slika 15: Računska shema SMA modela (prirejeno po US Army Corps of Engineers, 2000)

5.2.10.1 Postopek in seznam enačb

Računamo celotni proces toka vode med vsemi zgoraj opisanimi sloji. To pomeni, da potrebujemo tok v , iz in med skladiščnimi prostori. Tako lahko vodni tok razdelimo na naslednje oblike: padavine, infiltracija, pronicanje, površinski odtok in podpovršinski tok, evapotranspiracija. (Brilly in Šraj, 2005)

5.2.10.1.1 Padavine

Predstavljajo vhodni tok v celotni sistem skladiščenja. Kot sem že zgoraj omenil, del padavin prestrežejo krošnje, ostali del pa pade na površje in je na voljo infiltraciji.

5.2.10.1.2 Infiltracija

Pomeni količino (volumen) vode, ki predstavlja vhodni podatek skladiščnega sloja zemljine. Calotni volumen, ki vpliva na infiltracijo, zajema padavine brez prestreženih padavin in vodo, ki je že predhodno v tleh. Potencialni volumen vode za infiltracijo je tako odvisen od volumna skladiščenja v zemljini na začetku časovnega intervala, maksimalnega volumna skladiščenja ter maksimalne stopnje infiltracije in se izračuna po naslednji enačbi:

$$PotSoilInf = MaxSoilInf - \frac{CurSoilStore}{MaxSoilStore} \cdot MaxSoilInfil \quad (29)$$

CurSoilStore ... volumen skladiščenja v zemljini na začetku časovnega intervala

MaxSoilStore ... maksimalni volumen skladiščenja

MaxSoilInfil ... maksimalna stopnja infiltracije

5.2.10.1.3 Pronicanje

Imenujemo tok vode med skladiščnim slojem zemljine in podpovršinskim slojem zemljine. Voda tako teče navzdol iz skladiščnega sloja v podpovršinski sloj in globinske prejemnike. Za izračun stopnje pronicanja potrebujemo določiti odvisnost med volumnom samega vira in sprejemanja sloja. Vedeti moramo, da je ta stopnja pronicanja večja v primerih, ko imamo poln izvorni sloj in prazen sprejemni sloj. Za račun potencialne stopnje pronicanja dobimo naslednjo enačbo:

$$PotSoilPerc = MaxSoilPerc \frac{CurSoilStore}{MaxSoilStore} \cdot \left(1 - \frac{CurGwStore}{MaxGwStore} \right) \quad (30)$$

PotSoilPerc ... potencialna stopnja pronicanja

MaxSoilPerc ... uporabniško določena maksimalna stopnja pronicanja

CurGwStore ... skladiščenje v zgornjem sloju na začetku časovnega intervala

MaxGwStore ... uporabniško določeno maksimalno skladiščenje

Za izračun volumna pronicanja zgoraj izračunano potencialno stopnjo pronicanja pomnožimo z željenim časovnim korakom. Voda, ki pronica navzdol, je tako enaka začetnemu skladiščanju plus infiltracija.

Poznati moramo tudi enačbo pronicanja iz prvega podpovršinskega sloja v drugega:

$$PotGwPerc = MaxPercGw \frac{CurGwStore}{MaxGwStore} \cdot \left(1 - \frac{CurGwStore}{MaxGwStore} \right) \quad (31)$$

MaxPercGw ... uporabniško določena maksimalna stopnja pronicanja

CurGwStore ... skladiščenje v gornjem sloju na začetku časovnega koraka sloja 2

MaxGwStore ... uporabniško določeno maksimalno skladiščenja sloja 2

V primerih, ko imamo neposredno pronicanje iz površinskih slojev v globok prejemnik, se enačbi poenostavita, kajti pronicanje je odvisno le od volumna skladiščenja izvornega sloja. Dobimo naslednji obliki enačb:

$$PotSoilPerc = MaxSoilPerc \frac{CurSoilStore}{MaxSoilStore} \quad (32)$$

5.2.10.1.4 Površinski odtok in podpovršinski odtok

Tu prištevamo vodo, ki površinsko (neposredno) odteče ter podpovršinski tok. Vodo, ki prekorači stopnjo infiltracije in preplavi površinsko skladiščenje, imenujemo površinski odtok. Vsota volumnov toka podpovršinskega sloja se pa imenuje podpovršinski tok. Enačba za izračun stopnje podpovršinskega toka ima naslednjo obliko:

$$GwFlow_{t+1} = \frac{ActSoilPerc + CurGw_iStore + PotGw_iPerc - \frac{1}{2} \cdot GwFlow_t \cdot TimeStep}{RoutGw_iStore + \frac{1}{2} TimeStep} \quad (33)$$

$GwFlow_{t+1}$... stopnja podpovršinskega toka v času $t+1$

Enačba za izračun volumna podpovršinskega toka ima naslednjo obliko:

$$GwVolume = \frac{1}{2} \cdot (GwFlow_{t+1} + GwFlow_t) \cdot TimeStep \quad (34)$$

5.2.10.1.5 Evapotranspiracija

Pojem evapotranspiracija je razložen v poglavju 1.4. V našem primeru predstavlja izgubljeno vodo iz volumna prestreženih padavin, površinskih depresij in skladiščnega sloja zemljine. Za izračun potencialne evapotranspiracije potrebujemo poleg izračunane maksimalne potencialne evapotranspiracije še menjajoči se mesečni korekcijski koeficient. Enačba ima naslednjo obliko:

$$ActEvapSoil = PotEvapSoil \cdot f(CurSoilStore, MaxTenStore) \quad (35)$$

ActEvapSoil ... izračunana evapotranspiracija iz skladiščenja v zemljini

PotEvapSoil ... izračunana maksimalna potencialna evapotranspiracija

MaxTenStore ... uporabniško določeno maksimalno skladiščenje v coni vezane vode površinskega sloja

f(CurSoilStore,MaxTenStore) ... funkcija, ki je odvisna od volumna skladiščenja v zemljini na začetku časovnega koraka in maksimalnega skladiščenja v napetostnem delu

5.2.11 Mrežast model upoštevanja vlažnosti zemljine

Pri tem modelu razdelimo podpovodje na več delov in tako dobimo natančnejše rezultate, kot pri osnovnem modelu upoštevanja vlažnosti zemljine. Ker je podpovodje razdeljeno na več manjših delov, potrebujemo za končne rezultate večje število vhodnih podatkov, vendar pa dobimo natančnejše rezultate. Za vsak del podpovodja na podlagi meteoroloških kart določimo presežke padavin in potencialno evapotranspiracijo. Določimo skupne začetne pogoje s pomočjo posameznih presežkov padavin, na podlag katerih dalje obravnavamo vsak del podpovodja posebej. Program HEC-HMS ima v svoji podatkovni bazi zajetih večje število možnih razmer, tako da moramo zbrati prave razmere za naš primer.

Na začetku moramo poznati razmere na površju. Vedeti moramo, koliko vode lahko na površju zadrži vegetacija, preden pride do začetka pronicanja. Postopek določanja plasti ter količin vode v posameznih plasteh je enak kot pri osnovnem modelu upoštevanja vlažnosti zemljin. Zajeti so še podatki za posamezne dele podpovodja, ki jih ima program HEC-HMS

shranjene v svoji podatkovni bazi. Tako da je pomembno, da poznamo celotne razmere in tako izberemo ustrezne vhodne podatke. Končni stranski odtok, ki se prišteje k baznemu odtoku, je vsota vode vseh delov podpovodja. (Us Army Corps of Engineers, 2008)

Uporabljajo se enake enačbe kot pri osnovnem modelu upoštevanja vlažnosti zemljine. Prednost te metode je v tem, da imamo podpovodje mrežasto razdeljeno na manjša območja in lahko tako dobimo natančnejše rezultate. Potrebujemo veliko število vhodnih podatkov, zato je ta metoda zelo kompleksna. V programu HEC-HMS imamo že vstavljene podatke za različne tipe podpovodij, tako da nam je delo olajšano. Poznati moramo tip podpovodja, da lahko izberemo ustrezne vhodne podatke.

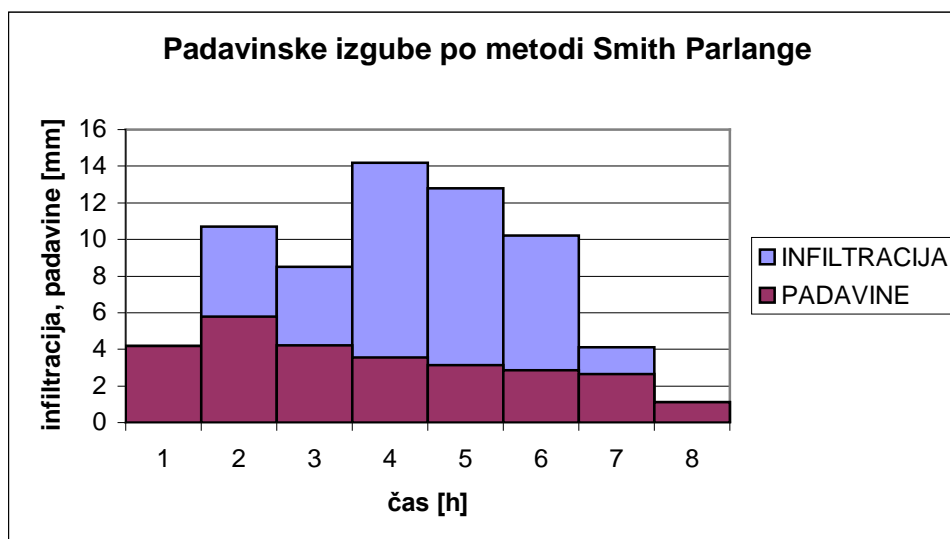
Enačbe in postopek je opisan v poglavju 5.2.10.

5.2.12 Metoda Smith Parlange padavinskih izgub

Temelji na Richardsovi enačbi za infiltracijo v zemljini. Uporablja poenostavljeno obliko, kajti pri tej metodi predvidevamo, da lahko vlažno fronto predstavimo z eksponentom, ki predstavlja nasičeno prevodnost. S takšno linearizacijo osnovne enačbe dosežemo, da lahko račun za infiltracijo poenostavimo in dobimo preprostejšo obliko enačbe, vendar še vedno realne in razumne rezultate.

Kot vhodne podatke potrebujemo začetno količino vode v zemljini, preostanek vode, zasičena količina vode, pritisk vpijanja, porazdeljenost por v zemljini, prevodnost, delež neprepustnega površja, koeficient temperature in koeficient zemljine (preglednica 11). Količino vode na začetku določimo kot volumensko razmerje glede na količino padavin. Poznati moramo tudi vodo, ki se je zadržala v zemljini po končanem dreniranju. Tudi to vrednost moramo določiti kot volumensko razmerje glede na količino padavin. Njeno vrednost dobimo z laboratorijskimi raziskavami ali z oceno, ki jo določimo s pomočjo podatkov o teksturi zemljine. Zasičena količina vode se prav tako določa kot volumensko razmerje glede na količino padle vode in predstavlja maksimalno sposobnost zadrževanja vode. Ponavadi je privzeto, da je zasičena količina vode enaka totalni poroznosti zemljine. Pritisk zaradi

vpijanja nastane zaradi vpijanja na površju in se določi na podlagi teksture zemljine. Tekstura tudi vpliva na količino in porazdeljenost por v zemljini in hidravlično prevodnost, ki sta tudi vhodna podatka. Hidravlična prevodnost predstavlja efektivno nasičeno prevodnost, ki je posledica efektivnih padavin. Enako kot pri ostalih modelih tudi tu potrebujemo delež neprepustnega površja, ki je določen z razmerjem glede na celotno podpovodje. Temperaturni koeficient in koeficient zemljine sta med seboj povezana in predstavljata specifično težo vode, viskoznost vode in temperaturni potencial. Pri temperaturi 25°C ne rabimo izbrati nobene vrednosti za ta dva koeficienta. Pri ostalih temperaturah moramo oba koeficienta skalibrirati s pomočjo urejevalnika komponent. (Us Army Corps of Engineers, 2008). Padavinske izgube za izbrani primer so prikazane na sliki 16.



Slika 16: Padavinske izgube po metodi Smith Parlange

Preglednica 11: Karakteristike zemljin pri Smith Parlange metodi

Vrsta zemljine	Poroznost [cm ³ /cm]	Sesanje vlažne fronte [cm]	Zasičena idravlična prevodnost [cm/h]	Pritisk vpijanja [cm]		Porazdeljenost por	
				aritmetično	geometrijsko	aritmetično	geometrijsko
Pesek	0,437	10,6	21,00	15,98	7,26	0,694	0,592
Ilovnati pesek	0,437	14,2	6,11	20,58	8,69	0,553	0,474
Peščena ilovica	0,453	22,2	2,59	30,20	14,66	0,378	0,322
Ilovica	0,463	31,5	1,32	40,12	11,15	0,252	0,220
Zamuljena ilovica	0,501	40,4	0,68	50,87	20,76	0,234	0,211
Peščeno glinasta ilovica	0,398	44,9	0,43	59,41	28,08	0,319	0,250
Glinasta ilovica	0,464	54,6	0,23	56,43	25,89	0,242	0,194
Zamuljena glinasta ilovica	0,471	58,1	0,15	70,33	32,56	0,177	0,151
Peščena glina	0,43	63,6	0,12	79,48	29,17	0,223	0,168
Zamuljena glinasta ilovica	0,479	64,7	0,09	76,54	34,19	0,150	0,127
Glina	0,475	71,4	0,06	85,60	37,3	0,165	0,131

5.2.12.1 Postopek in seznam enačb

Kot osnovo uporablja Richardsovo enačbo za infiltracijo. Hidravlično prevodnost izračunamo kot funkcijo vsebnosti vode v zemljini θ in pritiska ϕ . V enačbo uvedemo koeficient $K(\theta)$, ki je funkcija vsebnosti vode v zemljini ali pa koeficient $K(\phi)$, ki je funkcija maksimalnega pritiska. S povezavo Darcy-jeve enačbe in kontinuitetne enačbe lahko izpeljemo diferencialno enačbo za nestalni tok. To enačbo imenujemo razširjena enačba ali Richardsova enačba in ima naslednjo obliko (Ward, Trimble, 2008):

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \cdot \left[D_w(\theta) \frac{\delta\theta}{\delta z} \right] + \frac{\delta K(\theta)}{\delta z} \quad (36)$$

$\frac{\delta\theta}{\delta t}$... hidravlična prevodnost

$D_w(\theta)$... razširjenost vode v zemljini

$K(\theta)$... koeficient, ki je odvisen od vsebnosti vode v zemljini

z ... globina

Zgornja enačba je zelo težko rešljiva, kajti povezava med hidravlično prevodnostjo, maksimalnim pritiskom in vsebnostjo vode v zemljini ni linearna.

Darcy-jeva enačba:

$$q = -k \frac{dH}{dz} \quad (37)$$

q ... hitrost toka (ponikovanja) [m/s]

k ... koeficient prevodnosti v porozni zemljini (odvisen od nasičenosti zemljine) [m/s]

H ... potencialna energija [m]

z ... navpična koordinata, usmerjena navzgor (globina) [m]

Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\delta\rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (38)$$

ρ ... specifična teža tekočine

t ... čas

u ... hitrost tekočine

Poenostavljena oblika Richardsove enačbe, ki jo uporabljamo pri tem modelu:

$$K(\psi) = K_{sat} \cdot e^{\alpha\psi} \quad (39)$$

K_{sat} ... koeficient nasičene zemljine

$K(\psi)$... približna vrednost koeficienta K

S pomočjo tega koeficienta smo linearilizirali Richardsovo enačbo in pri tem še vedno ohranili realno odvisnost med koeficientom K in vsebnostjo vode θ . S to poenostavitvijo omogočimo hitrejše in preprostejše reševanje enačbe.

5.2.13 Metoda Philip

Philip je leta 1957 predstavil enačbo, ki naj bi dala zadovoljive rešitve za določanje infiltracijske sposobnosti padavin. Predpostavil je, da imamo homogeno zemljino, ki je na začetku enakomerno zasičena z vlago v zemljini in na površju zemljine. Izhajal je iz difuzijske enačbe za nenasičen tok, s pomočjo katere je s številnimi izpeljavami dobil končno enačbo (Espinoza, 1999):

$$F(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n (\theta) t^{\frac{n}{2}} + K_i t \quad (40)$$

F ... komulativna infiltracija

θ ... začetna vlažnost zemljine

A_n ... funkcija volumenske vsebine vlage

K_i ... prepustnost, ki je odvisna od začetne volumenske vsebine vlage

t ... čas

Problem te enačbe je, da pri daljših časovnih obdobjih pride do prevelikega odstopanja infiltracije glede na dejanske razmerje. Tako je leta 1969 podal enačbo za omejitev časa, znotraj katerega dobimo še zadovoljive rezultate:

$$t_c = \frac{S^2}{4(K - A)^2} \quad (41)$$

t_c ... maksimalni čas

S ... absorbiranje vode, ki določena z numerično integracijo funkcije vsebnosti vlage

A ... parameter določen z numerično integracijo funkcije vsebnosti vlage

$$S = \int_{\theta_i}^{\theta_s} \phi_1(\theta) d\theta \quad (42)$$

$$A = \int_{\theta_i}^{\theta_s} \phi_2(\theta) d\theta + K \quad (43)$$

θ_i ... začetna vlažnost

θ_s ... vlažnost na površini

$\phi_1(\theta)$... funkcija vsebnosti vlage, ki je določena z numeričnim postopkom

$\phi_2(\theta)$... funkcija vsebnosti vlage, ki je določena z numeričnim postopkom

Na podlagi zgoraj zapisanih enačb je izrazil končno obliko enačbe za izračun infiltracije:

$$F = St^{\frac{1}{2}} + At \quad \text{za} \quad 0 \leq t \leq t_c \quad (44)$$

$$F = Kt + t_c(K - A) \quad \text{za} \quad t \geq t_c \quad (45)$$

5.2.14 Metoda Swartzendruber

Swartzendruber je leta 1987 izpeljal izraz za infiltracijsko sposobnost, ki je podoben modelu Greena in Ampta. Razlikuje se le v tem, da tu nimamo predpostavke o razporeditve vlažnosti po globini zemljine, ki je prisotna pri modelu Greena in Ampta. S številnimi izpeljavami je dobil končno obliko enačbe (Espinoza, 1999):

$$F = Z_f \Delta \theta_f = Kt + \frac{\Delta \theta_f}{(K - K_i)} (K \psi_f + K_s h_0) \text{Ln} \left[1 + \frac{(F - K_i t)(K - K_i)}{\Delta \theta_i (K \psi_f + K_s h_0)} \right] \quad (46)$$

F ... komulativna infiltracija

ψ_f ... koeficient, ki se ujema z vsrkavanjem pri začetni vlažnosti

K_s ... hidravlična prevodnost pri zasičeni zemljini

K ... hidravlična prepustnost ($K \leq K_s$)

Zgoraj zapisana enačba ni točno določena za čas t ter komulativno infiltracijo F , zato je potrebno za rešitev te enačbe uporabiti iterativen postopek. Swartzendruber je v nadaljevanju na podlagi zgoraj zapisane enačbe podal poenostavljeno obliko enačbo za določanje infiltracijske sposobnosti zemljine, ki da dobre rezultate za vse čase.

$$F = \frac{S}{A_0} \left[1 - \exp\left(-A_0 t^{\frac{1}{2}}\right) + Kt \right] \quad ($$

S ... absorbiranje vode

A_0 ... parameter prileganja, ki je odvisen od vsebine vode na površju zemljine

5.2.15 Metoda Kostiakov

Kostiakov je leta 1932 predlagal naslednjo empirično enačbo za določanje sposobnosti infiltracije (Espinoza, 1999):

$$f = at^{-\alpha} \quad (48)$$

f ... sposobnost infiltracije

a ... konstanta, ki je določena empirično

α ... konstanta, ki je določena empirično

Iz enačbe lahko vidimo, da gre količina infiltriranih padavin s daljšanjem časa proti nič. Tako ta metoda predpostavi, da bodo infiltrirane padavine neskončno dolgih neviht na koncu enake nič. Kljub temu predvidevanju je ta metoda uporabna zaradi njene preprostosti.

5.2.16 Metoda Holtan

Leta 1961 je predlagal empirično funkcijo za določanje infiltracijske sposobnosti (Espinoza, 1999):

$$f = f_c + G_i a V_t^b \quad (49)$$

f_c ... stopnja pronicanja

G_t ... indeks rasti rastline ($0 \leq G \leq 1$)

a ... koeficient poroznosti

V_t ... volumen neuporabljenega skladišča za vlago v zemljini pri času t

b ... eksponent, ki ima vrednost 1.4

f ... infiltracija vode

Volumen skladišča, ki se še lahko napolni z vodo se izračuna po naslednji enačbi:

$$V_t = V_{t-1} - (f - f_c - E)\Delta t \quad (50)$$

V_{t-1} ... volumen skladiščenja pri predhodnem času ($t - 1$)

E ... stopnja evapotranspiracije

Pri tej metodi imamo parametre opisane s tipom zemljine in vrsto pridelka, tako da vrednosti parametrov ni težko določiti. Edini problem imamo pri določanju kontrolne globine, ki jo potrebujemo za izračun volumna uporabnega skladiščenja vode.

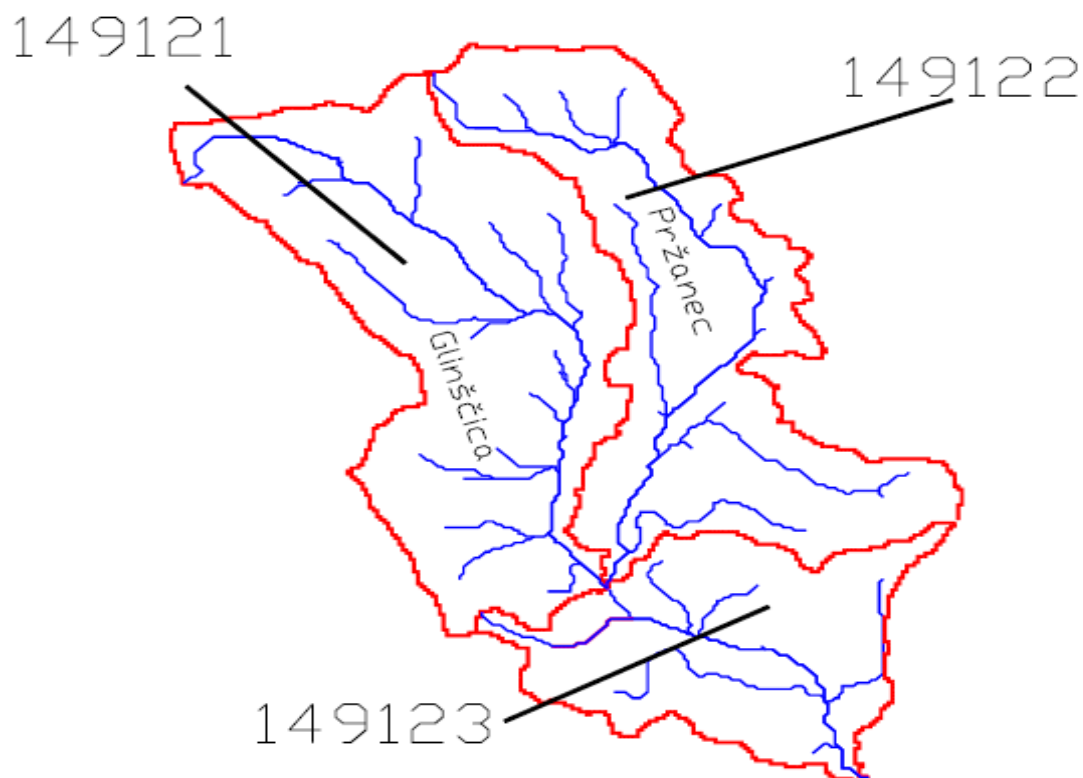
6 POVODJE GLINŠČICE

6.1 Geografske in hidrografske značilnosti

Porečje Glinščice leži v osrednji Sloveniji, in sicer SZ od Ljubljane. Glinščica tako teče po strmih območjih na vzhodu in zahodu, kot tudi po ravninskem območju v južnem delu vodotoka. Porečje Glinščice omejuje pobočje Toškega čela in Črnega vrha na severu, kjer reka tudi izvira, urbano območje Ljubljane na vzhodu, urbana območja preko Brda do Tičnice na zahodu ter Gradaščica na jugu, v katero se Glinščica izliva. Večji pritok predstavlja Pržanec, katerega povirje sega v pobočje Velike trate in Male trate. Povirje Pržanca odvaja predvsem vodo iz ravninskega dela vzhodno od Glinščice. Padavinsko prispevno območje Glinščice obsega 17,4 km², samo prispevno območje pa zajema 19,3 km². Položaj odvodnice znotraj urbanega območja določa odvajanje meteornih vod s kanalizacijskim sistemom, zato imamo v tem primeru dejansko prispevno območje večje od padavinskega (Škrbec, 2005). Prikaz povodja Glinščice, ki je uporabljen v računskem modelu, je prikazan v preglednici 12 ter na sliki 17.

Preglednica 12: Šifrant podpovodij na 6. ravni (Šraj, 2000)

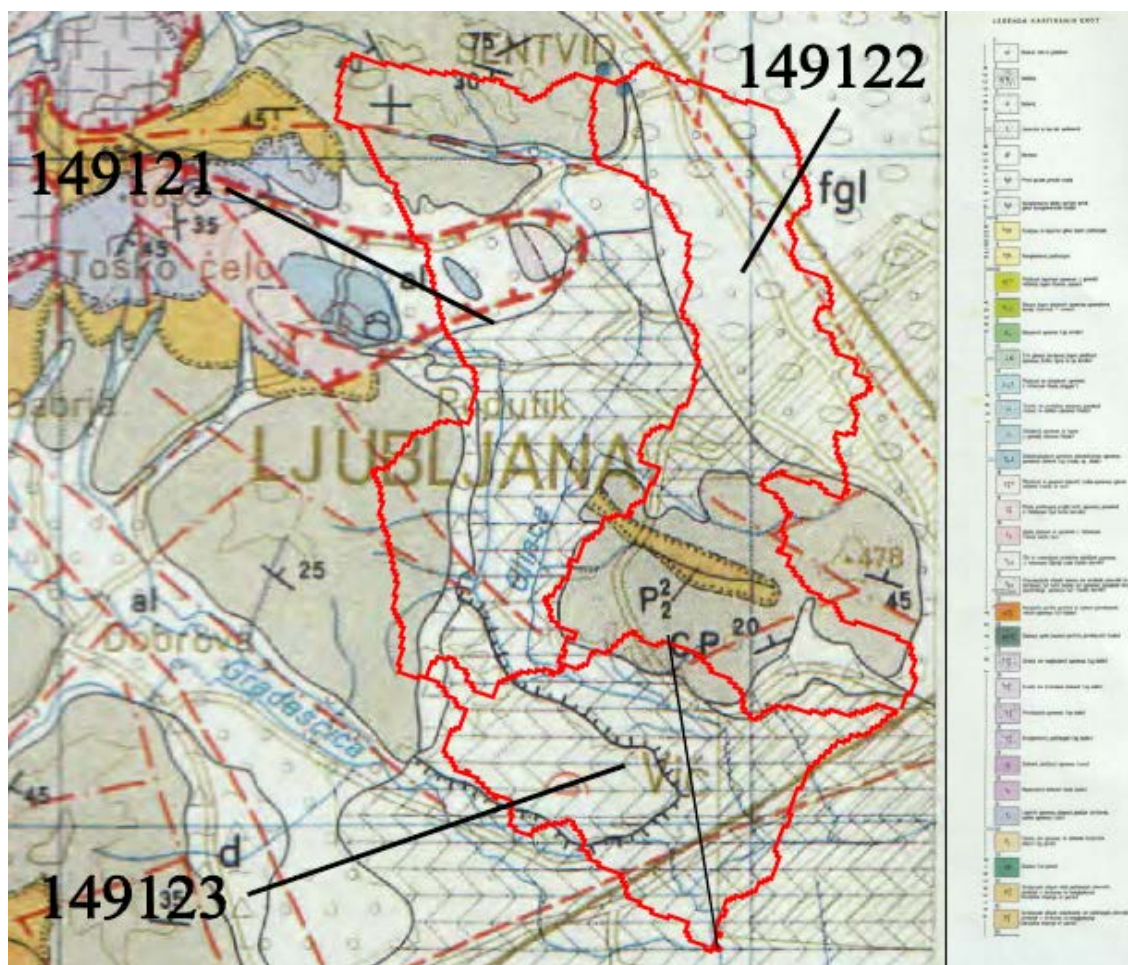
Šifra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	Padavinsko območje	Površina (km ²)
1	Porečje Save						Porečje Save R Slovenije	10656,26
14	Ljubljana						Porečje Ljubljanice vključno s kraškim zaledjem	1883,78
149	Mestna Ljubljana						Porečje Ljubljanice od sotočja s Šuljico do vtoka v Ljubljanico	159,45
1491	Ljubljana - Trnovo						Mestna Ljubljana	195,45
14912	Glinščica						Glinščica	16,85
149121							prispevno bomočje 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



Slika 17: Prikaz povodja Glinščice

6.2 Geologija in pokrovnost tal povodja

Povodje Glinščice je sestavljeno predvsem iz gričevnatih in ravninskih predelov. Gričevja se nahajajo predvsem na zahodu in vzhodu povodja, ravninski je pa predvsem južni del podpovodja. Vidimo, da je relief zelo spremenljiv in imamo predele s strmimi pobočji, kot tudi ravninske predele. Iz karte prsti lahko vidimo, da prevladuje zemljina tipa D, imamo pa tudi posamezne dele z zemljino tipa C ter tudi urbanizirana območja (Štajdohar, 2005). Tipi pokrovnosti tal in tipi prsti, ki se nahajajo na povodju Glinščice so prikazani v preglednici 13 ter sliki 18.



Slika 18: Povodje prikazano na karti prsti (Filozofska fakulteta, oddelek za geografijo)

Preglednica 13: Tipi pokrovnosti tal na povodju Glinščica (CORRINE)

	Podpovodja		
	149121	149122	149123
Raba tal	149121	149122	149123
Nesklenjene urbane površine	0,175	0,320	0,240
Zelene mestne površine	0,000	0,000	0,560
Površine za šport in prosti čas	0,000	0,040	0,000
Namakane njivske površine	0,065	0,100	0,000
Pašniki	0,145	0,070	0,140
Drobnopos. Kmetijske površine	0,050	0,000	0,000
Pret. kmet. površine, večja obm. vegetacije	0,030	0,000	0,000
xListnati gozd	0,050	0,000	0,000
Iglasti gozd	0,100	0,230	0,000
Mešani gozd	0,385	0,190	0,060

6.3 Podnebje in padavine

Območje zajema prehodno podnebje iz gorskega podnebja Julijskih Alp v milejše podnebje Ljubljanske kotline. Najbližja padavinska postaja agencije RS za okolje se nahaja 2 km vzhodno, in sicer postaja Ljubljana – Bežigrad (Štajdohar, 2005). V preglednicah 14 in 15. ki sem ju dobil na agenciji republike Slovenije za okolje (ARSO), so prikazane povratne dobe ekstremnih količin padavin za različne povratne dobe.

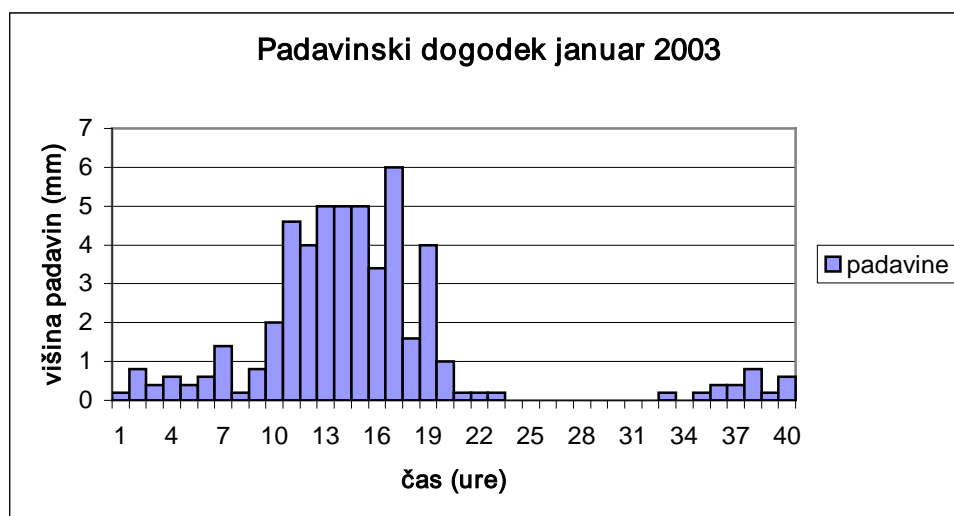
Preglednica 14: Višine padavin pri povratnih dobah ekstremnih padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad v obdobju 1948 - 2007 (Ovsenik, 2008)

trajanje padavin	POVRATNA DOBA								višina
	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 15: Količine padavin pri povratnih dobah ekstremnih padavin za postajo Ljubljana - Bežigrad v obdobju 1948 - 2007 (Ovsenik 2008)

trajanje padavin	POVRATNA DOBA								
	1 leto	2 leti	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let	250 let	količina
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

Poleg tega sem imel na razpolago tudi padavinske podatke iz avtomatske postaje Prženec (UL FGG), ki se nahaja na obrobju Ljubljane. Izbral sem si dogodek, ki se je zgodil 17. januarja leta 2003. Nevihta se je pričela ob 00:00 in je trajala vse do 18. januarja do 16:00. Prikaz razporeditve padavin je prikazan na sliki 19.



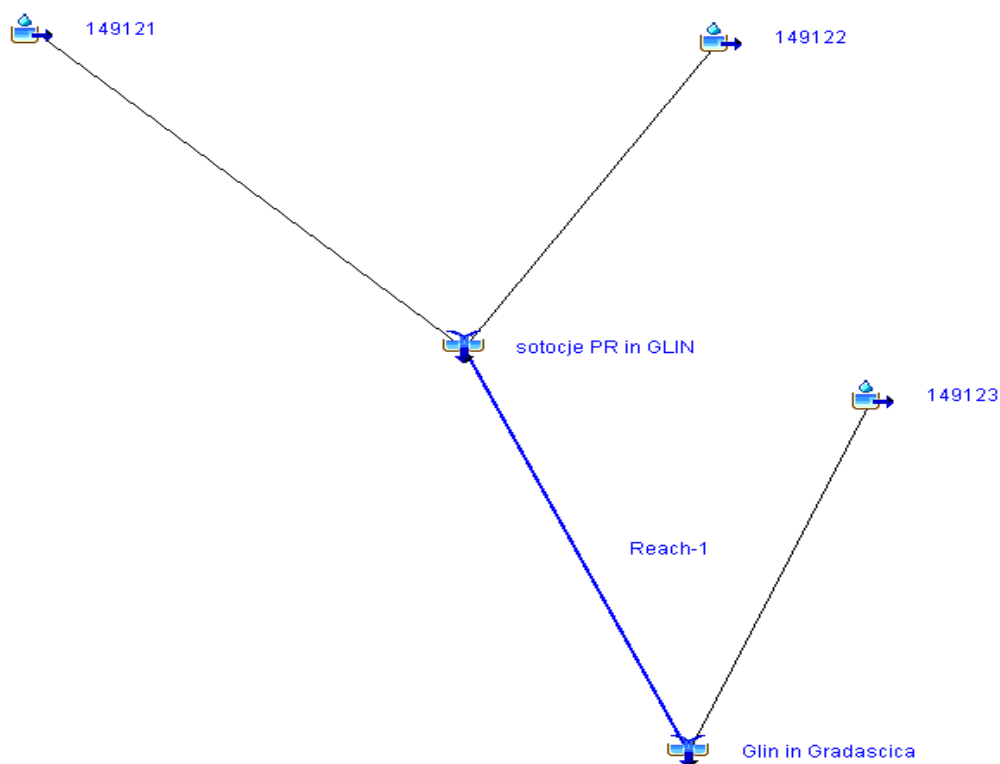
Slika 19: Razporeditev padavin na postaji Prženec za opisani dogodek

Leta 2005 je Maja Štajdohar v diplomski nalogi z naslovom Analiza vpliva urbanizacije na režim odtoka Glinščice opravila korelacijo med postajama Pržanec in Ljubljana-Bežigrad. Vrednost koeficienta je dobila 0,870. Primerjala je dnevne količine padavin, ki so trajale le nekaj ur, tako da velikost koeficienta korelacije ni odvisna od časovne razporeditve padavin, ampak od prostorske razporeditve padavin. Ta vrednost nam pove, da je korelacija dokaj dobra in da z izbiro padavin za postajo Bežigrad ali postajo Prženec dobimo zadovoljive rezultate.

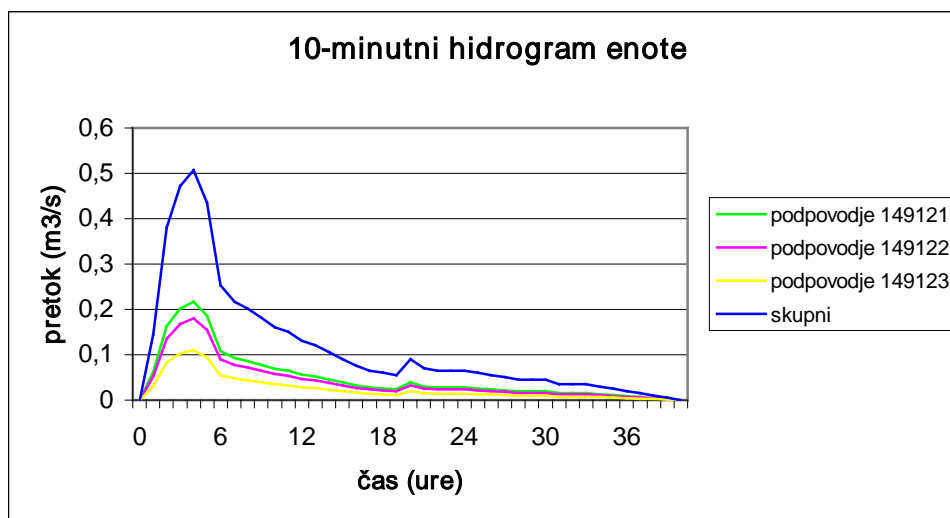
7 UPORABA RAZLIČNIH METOD PADAVINSKIH IZGUB NA PRAKTIČNEM PRIMERU POVODJA GLINŠČICE

7.1 Uvod

V diplomski nalogi sem izdelal računski model povodja Glinščice (slika 20). Razpolagal sem z meritvami pretokov ter meritvami padavin. S pomočjo teh podatkov sem določil hidrogram enote za povodje Glinščice (slika 21). Za primer Glinščice je leta 2005 Gregor Škrbec v diplomski nalogi z naslovom Hidrološki model Gradaščice z Glinščico umeril vrednosti koeficientov $K = 0,5$ in $X = 0,2$ Muksingum-ovega modela, ki označujeta potovanje vala v strugi. S pomočjo tih dveh koeficientov sem modeliral povodje.



Slika 20: Prikaz računskega modela Glinščice



Slika 21: Deset-minutni hidrogram enote

Za vsako podpovodje sem s pomočjo preglednice 13 določil delež neprepustnih površin. Vzel sem, da so nesklenjene urbane površine 70% neprepustne, zelene mestne površine 10% neprepustne, vse ostale površine pa do so 100% prepustne (Hall 1994). Delež neprepustnih površin je prikazan v preglednici 16.

Preglednica 16: Deleži neprepustnih površin za posamezna podpovodja

povodje	delež neprepustne površine (%)
149121	12,6
149122	22,4
149123	22,4

V diplomski nalogi bom prikazal, kolikšna odstopanja rezultatov dobimo z izbiro različnih metod padavinskih izgub. Različne metode zahtevajo različno število vhodnih podatkov, ki so posledice meritev. Velikokrat je problem, da nam primanjkuje meritev, tako da za modeliranje uporabimo tisto metodo padavinskih izgub, za katero imamo dovolj podatkov oz. se nam zdi dovolj enostavna.

7.2 Modeliranje povodja Glinščice

7.2.1 Analiza vhodnih podatkov in prikaz rezultatov

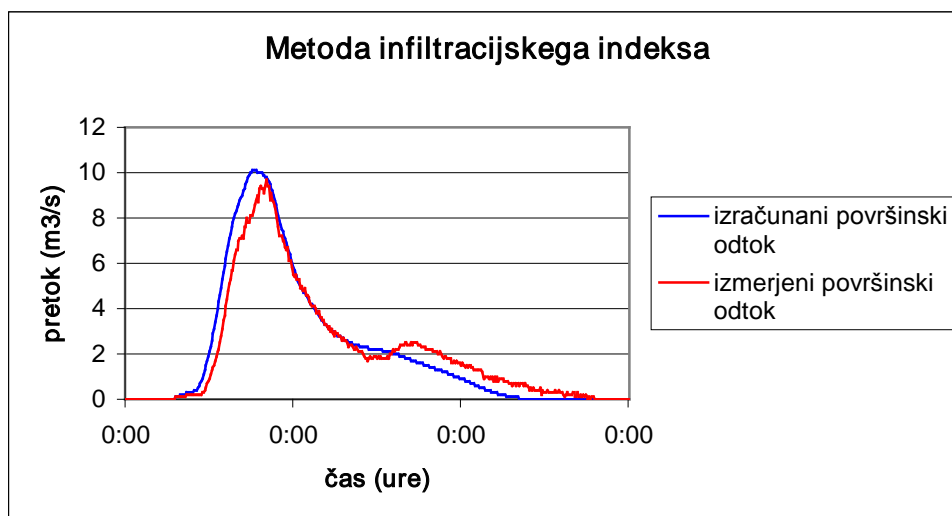
7.2.1.1 Metoda infiltracijskega indeksa

Program HEC-HMS nima možnosti uporabe metode infiltracijskega indeksa. Vemo, da ima ta metoda padavinske izgube razporejene enakomerno po času, tako da lahko izberemo metodo začetnih in enakomernih izgub in podamo, da so začetne izgube enake kot v vseh ostalih intervalih. Na podlagi poglavja 5.2.1.1 (Bathnagar-jev model) sem izračunal vrednost parametra API , ki sem ga dobil s pomočjo predhodno merjenih padavin na postaji Pržanec. Določil sem še vsoto padavin v času nevihte in celotni čas trajanja nevihte. Dobil sem nerealne rezultati, namreč dobil sem vrednost infiltracijskega indeksa $\Phi = 5,2$ mm. Tako velik infiltracijski indeks bi pomenil, da se skoraj vsa voda infiltrira v zemljinu in dobimo minimalen odtok. Problem tega postopka je, da so grafi izdelani za povodja v Indiji, kjer imajo drugačno podnebje in s tem povezano rastje in prst.

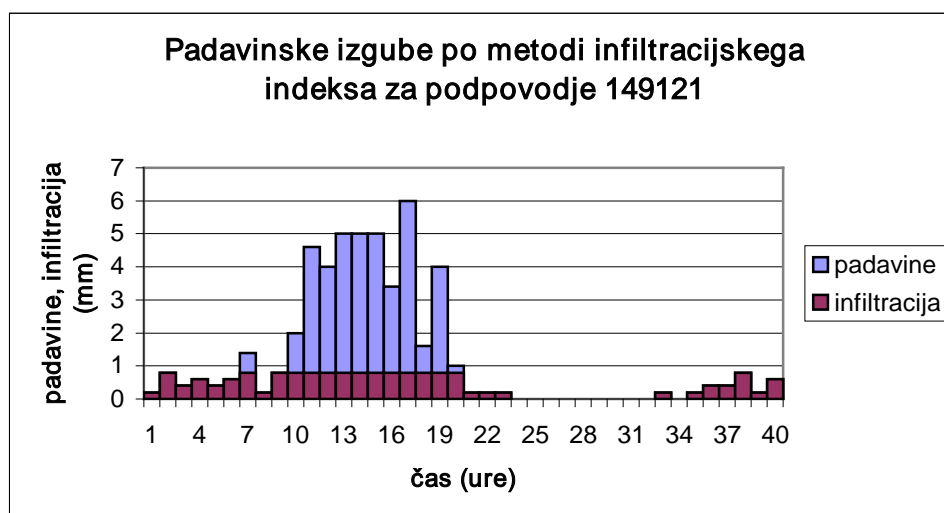
V našem primeru imamo podan končni hidrogram odtoka, tako da sem lahko model umeril. Umeril sem ga glede na volumen površinskega odtoka s pomočjo poglavja 5.2.1.1 in dobil vrednost koeficienta $\Phi = 0,788$ mm. Vhodni podatki in rezultati so prikazani v preglednici 17 ter na sliki 22, 23.

Preglednica 17: Vhodni podatki pri metodi infiltracijskega indeksa

podpovodje	149121	149122	149123
začetne izgube (mm)	0	0	0
konstantne izgube (mm)	0,778	0,778	0,778



Slika 22: Umerjeni površinski odtok na iztoku iz povodja z metodo infiltracijskega indeksa



Slika 23: Padavinske izgube po metodi infiltracijskega indeksa za podpovodje 149121

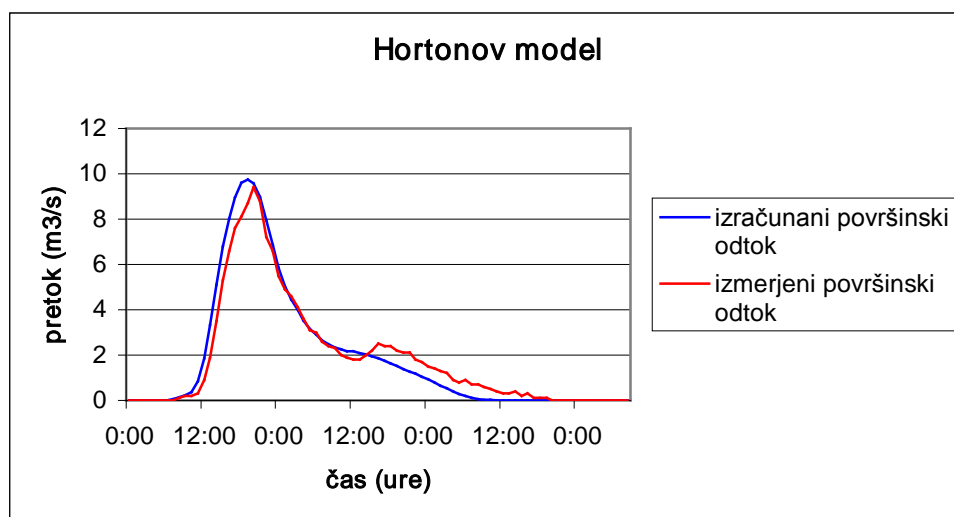
7.2.1.2 Hortonov model

Program HEC-HMS v svoji bazi podatkov ne vsebuje te metode. Račune sem izvedel brez programa. Najprej sem iz preglednice 3 in 4 določil vrednosti koeficientov za vsako podpovodje posebej (preglednica 18), ki sem jih nato vnesel v enačbo 13. Tako sem dobil infiltracijo v zemljo v odvisnosti od časa za vsako podpovodje posebej. Iz količine

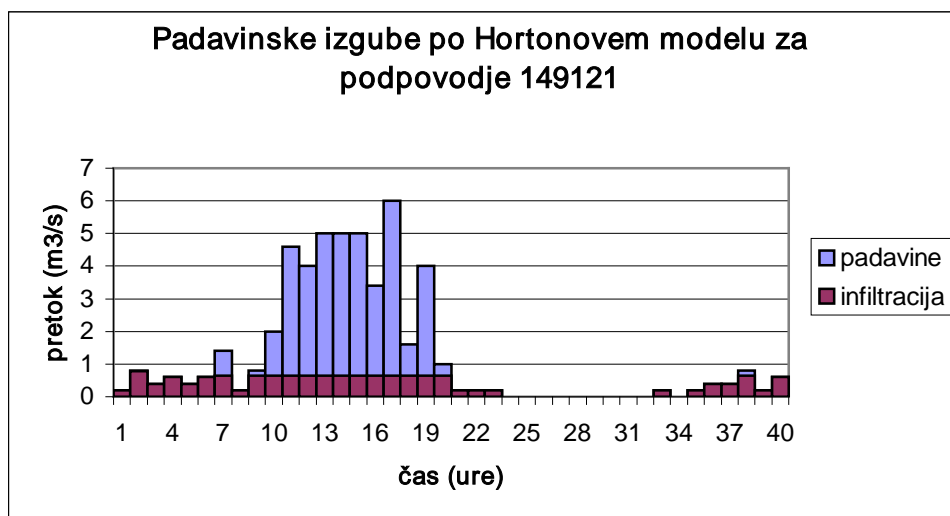
infiltriranih padavin sem z enačbama 14 in 15 določil količino efektivnih padavin v določenem času. V podatkih sem imel 10-minutne hidrograme enote vsakega podpovodja, ki sem jih spremenil v 1-urne. Določil sem Muksingumov koeficient K , ki opisuje propagacijo valov in predstavlja čas potovanja vala do končnega iztoka iz povodja. Prav tako sem preveril za koliko se zmanjša konica hidrograma odtoka zaradi časa potovanja vala. Podpovodji 149121 ter 149122 sem zakasnil za Muksingumov koeficient K ter ju prištel s hidrogramom enote podpovodja 149123 in tako dobil skupni hidrogram enote. Efektivne padavine sem določil za vsako podpovodje posebej, jih množil z deležem površine podpovodja glede na celo povodje ter seštel skupaj. S tem postopkom sem dobil povprečne efektivne padavine za celotno povodje Glinščice. Končni hidrogram enote sem množil z vsakournimi efektivnimi padavinami in tako dobil končni hidrogram odtoka. Rezultati so prikazani na sliki 24 in 25.

Preglednica 18: Vhodni podatki pri Hortonovem modelu

podpovodje	149121	149122	149123
f_0 (mm/hr) =	7,60	7,60	7,60
f_c (mm/hr) =	0,65	1,3	0,65
k (1/hr) =	2,00	2,00	2,00



Slika 24: Površinski odtok na iztoku iz povodja s Hortonovim modelom



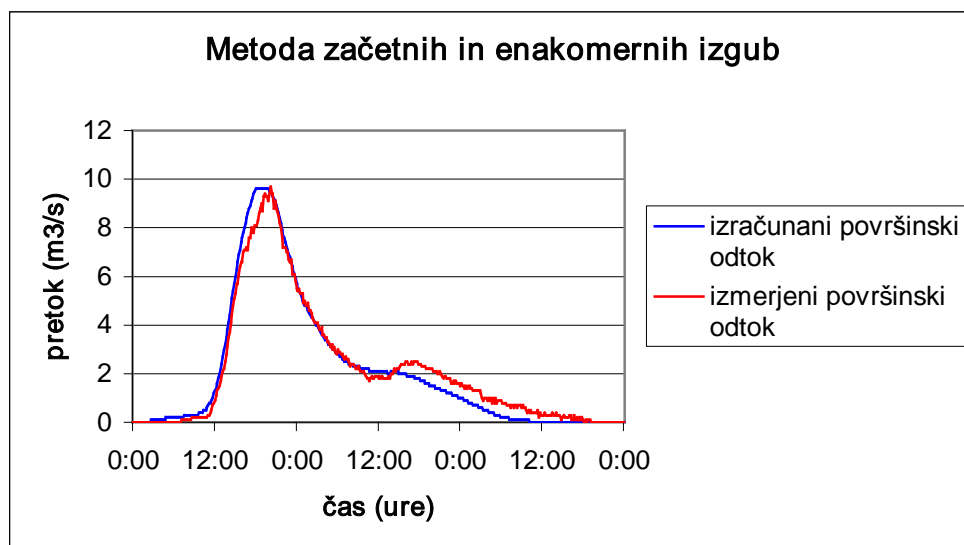
Slika 25: Padavinske izgube po Hortonovem modelu za podpovodje 149121

7.2.1.3 Metoda začetnih in enakomernih izgub ter metoda deficita in konstantnih izgub

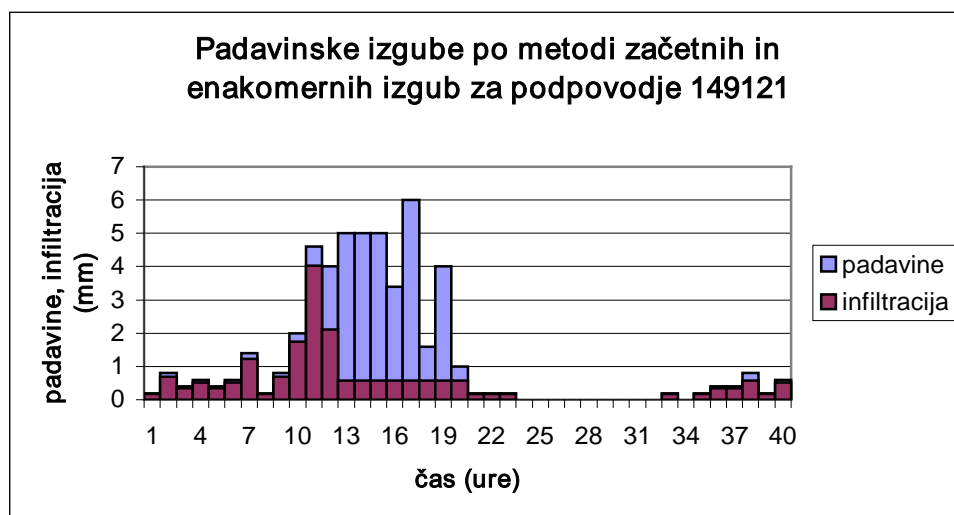
Obe metodi sem obravnaval pod enim poglavjem, ker sta zelo podobni in obe temeljita na enakih vhodnih podatkih. Pri tem modelu je potrebno določiti začetne ter konstantne izgube. Te začetne izgube sem izračunal s pomočjo preglednic 5 in 14, da sem vzel sredinske vrednosti začetnih izgub (prestrezanja) in jih pomnožil z deležem teh območij glede na celotno površino podpovodja. Prav tako imamo pri klasifikaciji zemljin (preglednica 6) velik razpon konstantne infiltracije glede na tip zemljine. Iz karte prsti na sliki 16 vidimo, da na severovzhodu prevladujejo prod, pesek, ki proti jugozahodu prehaja v jezerski in barski sediment. Tako sem določil tip D zemljine, ki prehaja iz manj prepustnega na jugozahodu proti bolj prepustnemu na severovzhodu. Na podlagi vhodnih podatkov (preglednica 19) sem dobil rezultate, ki so prikazani na sliki 26, 27.

Preglednica 19: Vhodni podatki pri metodi začetnih in enakomernih izgub

podpovodje	149121	149122	149123
začetne izgube (mm)	14,09954	10,17016	5,616448
konstantne izgube (mm)	0,65	1,3	0,65



Slika 26: Površinski odtok na iztoku iz povodja z metodo začetnih in enakomernih izgub



Slika 27: Padavinske izgube po metodi začetnih in enakomernih izgub za podpovodje 149121

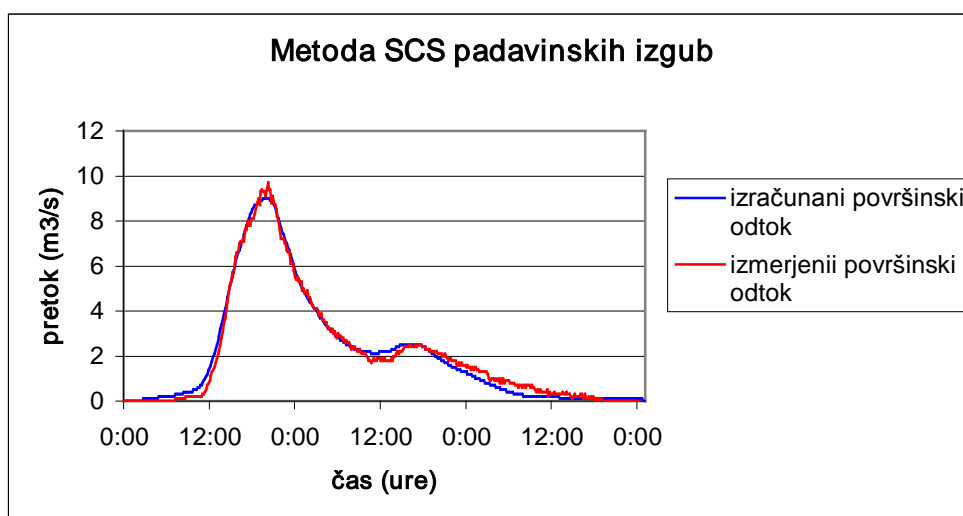
Velik vpliv na rezultate ima pri tej metodi izbor konstantne infiltracije, ki je za različne tipe zemljin omejena. V mojem primeru sem vzel za podpovodji 149121 ter 149123 srednjo vrednost konstante infiltracije zemljine tipa D, za podpovodje 149122 pa mejno vrednost med tipom C in D.

7.2.1.4 SCS metoda padavinskih izgub

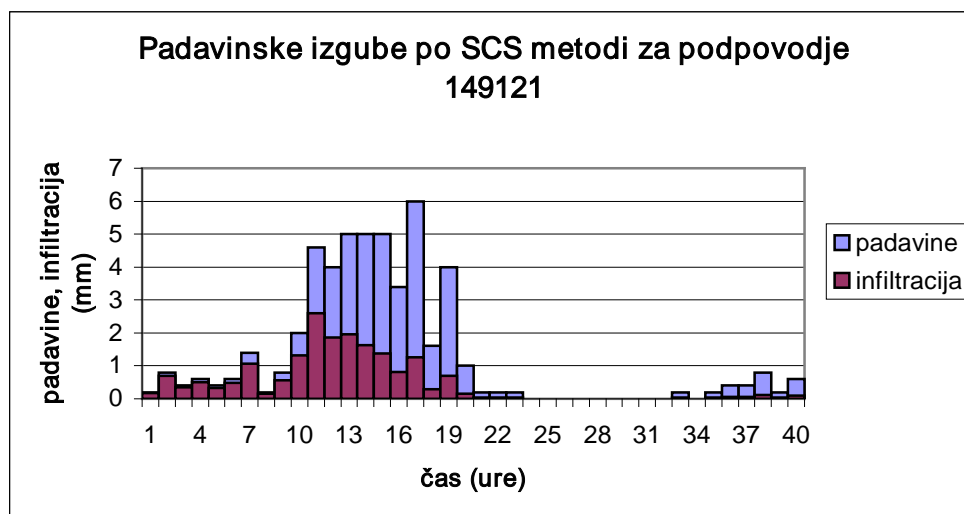
To metodo je že leta 2005 uporabil Škrbec v diplomski nalogi z naslovom Hidrološki model Gradaščice z Glinščico. S programom HEC-HMS je umerjal model, tako da je spreminjal vrednosti koeficientov CN in I_a (primanjkljaj vode do nasičenosti), vendar pa ni upošteval neprepustne površine posameznih podpovodij. S pomočjo preglednic 8, 9 in 10 sem določil vrednosti koeficientov vhodnih podatkov (preglednica 20) ter z upoštevanjem neprepustnih površin dobil rezultate, ki so prikazani na sliki 28 in 29.

Preglednica 20: Vhodni podatki pri SCS metodi padavinskih izgub

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



Slika 28: Površinski odtok na iztoku iz povodja dobljen z SCS metodo padavinskih izgub



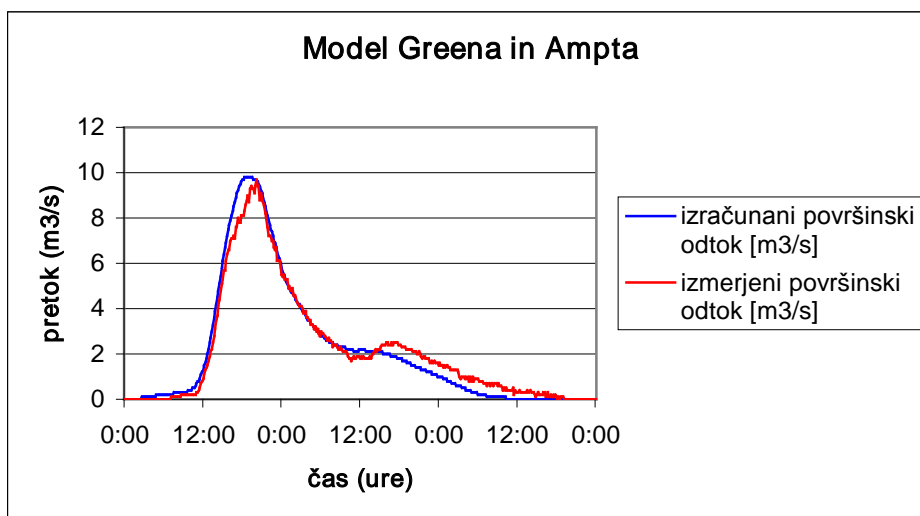
Slika 29: Padavinske izgube po SCS metodi za podpovodje 149121

7.2.1.5 Model Greena in Ampta

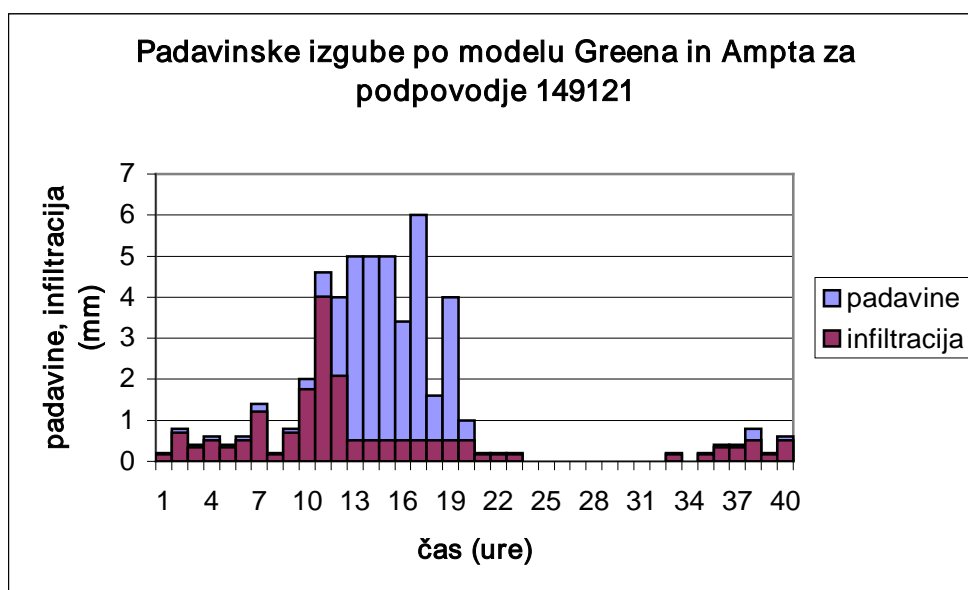
Tu potrebujemo začetne izgube, ki sem jih izračunal na enak način kot pri metodi začetnih in enakomernih izgub. Potrebno je tudi določiti tip zemljine. Celotno povodje je sestavljeno pretežno iz gline. Le severovzhodni del podpovodja 149122 sestavlja pesek in prod.. V tem delu tako prevladuje peščena glina, ostali dve podpovodji pa sestavlja glina. Podatke za vnos v HEC-HMS sem dobil s pomočjo preglednice 9 in so prikazani v preglednici 21. Izračunani in izmerjeni odtok iz povodja sta prikazana na sliki 30 ter padavinske izgube za podpovodje 149121 na sliki 31.

Preglednica 21: Vhodni podatki pri modelu Greena in Ampta

podpovodje	149121	149122	149123
začetne izgube (mm)	14,09954	10,17016	5,616448
primanjkljaj vlage	0	0	0
sesanje vlažne fronte (mm)	714	636	714
hidravlična prevodnost (mm/uro)	0,6	1,2	0,6



Slika 30: Površinski odtok na iztoku iz povodja z modelom Greena in Ampta



Slika 31: Padavinske izgube po modelu Greena in Ampta za podpovodje 149121

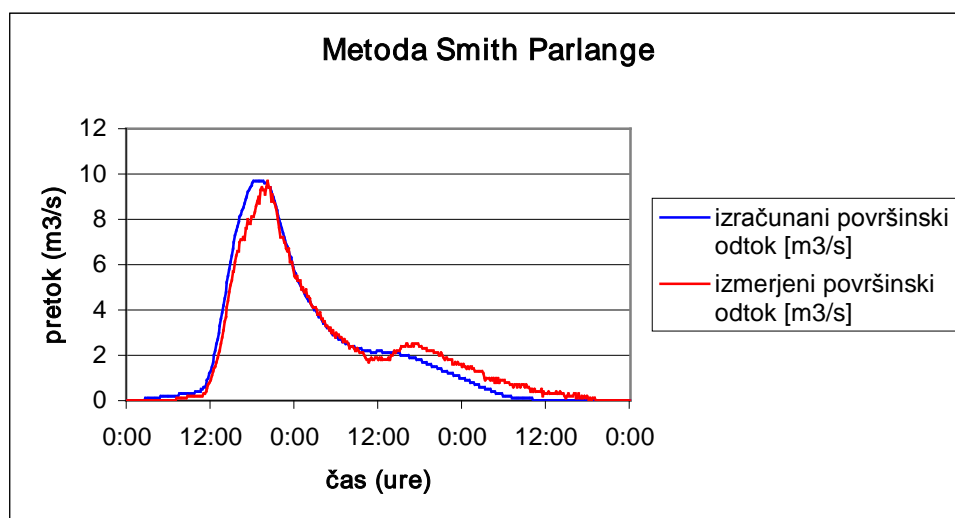
Rezultati so odvisni od izbire tipa zemlje, na podlagi katerega so določene časovne izgube padavin ter od predhodne količine vode v zemljini. Prednost te metode je, da imamo točno določene vrednosti vhodnih parametrov za različne tipe zemljin, tako da modela za doseganje realnih rezultatov ni nujno predhodno umeriti.

7.2.1.6 Metoda Smith Parlange

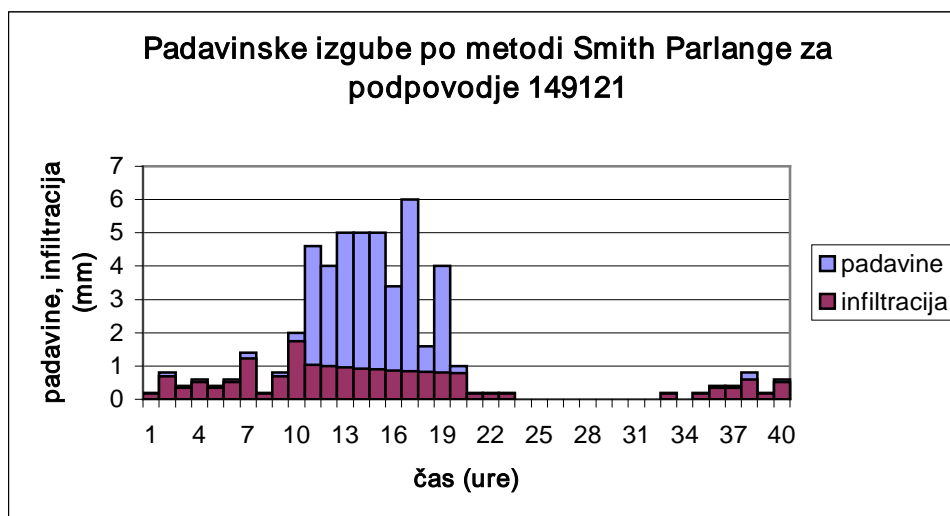
Metoda temelji na tipu zemljine in karakteristikah, ki so značilne za določen tip ter predhodni količini vode v zemljini. Zemljino sem določil enako kot pri ostalih metodah (preglednica 22) in s pomočjo preglednice 13 dobil rezultate, ki so prikazani na sliki 32, 33.

Preglednica 22: Vhodni podatki pri metodi Smith Parlange

podpovodje	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
hid. Prevodnost (mm/ure)	0,6	1,2	0,6



Slika 32: Površinski odtok na iztoku iz povodja z metoda Smith Parlange



Slika 33: Padavinske izgube po metodi Smith Parlange za podpovodje 149121

Z vhodnimi podatki opišemo enako kot pri metodi Greena in Ampt predhodno vlažnost v zemljini ter tip zemljine. Razlikuje se le v tem, da imamo tu bolj natančno opisano zemljino z večjim številom parametrov.

7.2.2 Analiza rezultatov

Analiza rezultatov za posamezna podpovodja je prikazana v preglednici 23. Za celotno povodje sem imel podan izmerjen hidrogram odtoka, tako da sem naredil primerjavo izračunanih rezultatov z izmerjenimi rezultati za celotno povodje (preglednica 24, 25). Ujemanje med izračunanimi in izmerjenimi površinskimi otoki sem ovrednotil s srednjim kvadratičnim pogreškom (*RMSE*). Uporabil sem enačbo 51, s pomočjo katere sem izračunal vrednost *RMSE* za vsako metodo padavinskih izgub.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (dQ_{izr} - dQ_{izm})^2}{n}} \quad (51)$$

RMSE ... srednji kvadratični pogrešek

$dQ_{izr} - dQ_{izm}$... razlika pretokov v določenem času

n ... število časovnih intervalov

Preglednica 23: Prikaz rezultatov za posamezna podpovodja

	podpovodje	max odtok (m ³ /s)	padavinske izgube (mm)	efektivne padavine (mm)	volumen odtoka (m ³)
metoda infiltracijskega indeksa	149121	4,3	16,82	33,58	241800
	149122	3,6	16,82	33,58	201100
	149123	2,2	16,82	33,58	122900
Hortonov model	149121	4,2	14,88	35,52	255800
	149122	3,5	22,70	27,70	165900
	149123	2,1	14,88	35,53	130000
metoda začetnih in enakomernih izgub	149121	4,1	19,98	30,42	219100
	149122	3,3	19,78	30,62	183400
	149123	2,4	12,37	38,03	139200
SCS metoda	149121	3,7	18,81	31,59	227300
	149122	3,3	16,59	33,81	202400
	149123	2	16,59	33,81	123700
metoda Greena in Ampta	149121	4,1	19,56	30,84	222000
	149122	3,3	19,13	31,27	187300
	149123	2,4	11,91	38,49	140900
metoda Smith Parlange	149121	4	20,18	30,22	217600
	149122	3,7	14,98	35,51	212700
	149123	2,1	17,97	32,49	118900

Preglednica 24: Izračunane in izmerjene vrednosti rezultatov končnega iztoka ter koeficient *RMSE*

	max odtok (m ³ /s)	volumen odtoka (m ³)	čas nastopa vrha odtoka od pričetka nevihte	<i>RMSE</i> (m ³ /s)
metoda infiltracijskega indeksa	10,1	566000	18:20	0,77
Hortonov model	9,76	551800	19:00	0,58
metoda začetnih in enakomernih izgub	9,6	541600	18:40	0,47
SCS metoda	9,0	553400	20:00	0,27
metoda Greena in Ampta	9,8	550200	18:40	0,49
metoda Smith Parlange	9,7	549200	18:40	0,52
izmerjene vrednosti	9,74	555290	20:10	

Preglednica 25: Odstopanje (%) izračunanih vrednosti od meritev na iztoku

Primerjava rezultatov glede na izmerjene vrednosti	max odtok %	volumen odtoka %	čas nastopa vrha hidrograma odtoka
metoda infiltracijskega indeksa	3,7	1,9	-1:50
Hortonov model	0,2	-0,6	-1:10
metoda začetnih in enakomernih izgub	-1,4	-2,5	-1:30
SCS metoda	-7,6	-0,3	-0:10
metoda Greena in Ampta	0,6	-0,9	-1:30
metoda Smith Parlange	-0,4	-1,1	-1:30

Metoda infiltracijskega indeksa je najbolj preprosta in določi padavinske izgube kot konstante vrednosti znotraj celotnega trajanja nevihte. Iz rezultatov vidimo, da dobimo s to metodo najslabše rezultate (največje vrednosti indeksa $RMSE = 0,77 \text{ m}^3/\text{s}$), kajti celoten proces odtekanja vode najbolj poenostavi. Napaka se pri tej metodi pojavi, ker imamo padavinske izgube razporejeno konstantno po času in ne upoštevamo začetnih izgub ter tipa zemljine. Zaradi takšne razporeditve padavinskih izgub nam model poda 3,7 % prevelik maksimalni odtok in 1,9 % povečan volumen odtoka ter 1:50 prehiter čas nastopa vrha hidrograma odtoka.

Pri Hortonovem modelu ni upoštevanih neprepustnih površin in so padavinske izgube določene s tipom zemljine in predhodno vlažnostjo zemljine. Vidimo, da imamo največje izgube pri podpovodju 149122, kajti ta del povodja sestavlja peščena glina, ki ima večjo konstantno infiltracijo. Iz poteka padavinskih izgub vidimo, da pri tem modelu padavinske izgube sledijo poteku krivulje, ki je dobljena z enačbo 13. Izgube tako zelo hitro padajo in dosežejo konstantne izgube hitreje kot ostale metode. Poda nam dobre rezultate in ujemanje maksimalnega odtoka (0,2 %), volumna odtoka (-0,6 %) in časa nastopa vrha hidrograma odtoka (-1:10), vendar imamo še vedno slabšo vrednost koeficienta $RMSE = 0,58 \text{ m}^3/\text{s}$ v primerjavi z ostalimi metodami.

Metoda začetnih in enakomernih izgub upošteva poleg tipa zemljine tudi začetne izgube in neprepustne površine. Padavinske izgube za posamezna podpovodja so tako določena z večjim številom zunanjih dejavnikov. Dobimo za 1,4 % manjše vrednosti maksimalnega odtoka in 2,5 % manjši volumen odtoka ter 1:30 hitrejši čas nastopa vrha hidrograma odtoka v primerjavi z izmerjenimi vrednostmi. Ta metoda je dovolj preprosta in ne potrebujemo velikega števila vhodnih podatkov ter meritev in poda dobre vrednosti koeficienta $RMSE = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pri mojem primeru sem najmanjše odstopanje modela od meritev ($RMSE = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$) dobil s SCS metodo. Pri tej metodi uporabljamo koeficient CN , s pomočjo katerega opišemo lastnosti povodja. V tem koeficientu imamo tako zajeto pokrovnost tal in tip zemljine. Padavinske izgube so razporejene znotraj krajšega intervala in se po določenem času približujejo proti 0. Na podlagi takšne razporeditve dobimo najmanjše ujemanje vrednosti maksimalnega odtoka z

izmerjeno vrednostjo (-7,6 %), vendar pa dobimo najboljše ujemanje volumna odtoka (-0,3 %) ter časa nastopa maksimalnega odtoka (-0:10). Prednost te metode je, da nimamo konstantnih izgub, kar je dobro prikazano na sliki 29. Padavine, ki padajo po 30 uri od pričetka padavin, v večji meri prispevajo k površinskemu odtoku kot pri ostalih metodah.

Z metodo Greena in Ampta se izračunani vrednosti maksimalnega odtoka (0,6 %) in volumna odtoka (-0,9 %) zelo dobro ujemata z izmerjenima vrednostima. Tudi tukaj, enako kot pri metodi začetnih in enakomernih izgub in metodi Smith Parlange, nastopi maksimalni odtok 1:30 prehitro v primerjavi z izmerjenim. Uporabljamo enake začetne izgube kot pri metodi začetnih in enakomernih izgub, vendar imamo tu zemljino določeno s točno določenimi parametri. Za podpovodja dobimo podobne rezultate padavinskih izgub kot pri metodi začetnih in enakomernih izgub, kar se dobro vidi s primerjanjem slik 27 in 31. Maksimalni odtok in volumen odtoka se bolje ujemata z izmerjenim kot pri metodi začetnih in enakomernih izgub, vendar pa vseeno dobimo slabšo vrednost koeficienta $RMSE = 0,49 \text{ m}^3/\text{s}$.

Metoda Smith Parlange opisuje zemljino z večjim številom parametrov kot metoda Greena in Ampta, vendar se kljub temu končni rezultati slabše ujemajo z izmerjenimi. Ti rezultati so posledica razporeditve padavinskih izgub, ki so na začetku manjše in s časom počasneje padajo kot pri ostalih metodah (slika 33). Pri tej metodi sem dobil vrednost koeficienta $RMSE = 0,52 \text{ m}^3/\text{s}$, tako da je za moj primer ta metoda boljša le od Hortonovega modela in metode infiltracijskega indeksa. Maksimalni odtok se razlikuje za -0,4 %, volumen odtoka za -1,1 % od izmerjenih vrednosti in maksimalni odtok se pojavi 1:30 hitreje.

8 UPORABA SINTETIČNIH HISTOGRAMOV NA PRAKTIČNEM PRIMERU POVODJA GLINŠČICE

Sintetične padavine pogosto uporabljamo pri analizah za potrebe planiranja in projektiranja. Primerne so za reševanje vprašanj glede poplav, analiziranja poplav, pri planiranju in reševanju večjih padavinskih dogodkov, kot osnova za projektiranje vodotokov, dimenzioniranje kanalov, kanalizacij, obrežnih nasipov, zadrževalnikov, pri protipoplavnih študijah, pri generiranju poplav s 100-letno povratno dobo ter mnogo drugega. Določamo jih na podlagi podrobnih statističnih analiz merjenih podatkov o padavinah za daljše obdobje. Podrobnejši opis sem podal v poglavju 2.1.

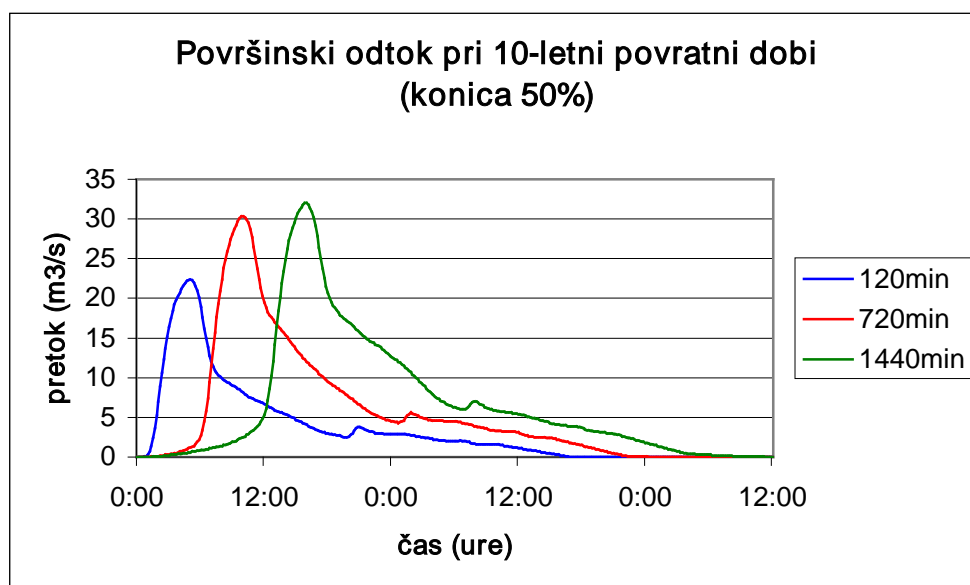
Sintetične histograme za povodje Glinščice sem uporabil na modelu, kjer sem padavinske izgube računal z metodo začetnih in enakomernih padavinskih izgub. Vhodni podatki za padavinske izgube so prikazani pri točki 7.2.1.3. To metodo sem uporabil, ker se zelo veliko uporablja pri računanju odtokov. Je dovolj preprosta za uporabo in da dobre rezultate.

S pomočjo preglednic 14 in 15 sem si izbral padavinska dogodka z 10- in 100-letno povratno dobo. Primerno sem izbral čas trajanja nevihte glede na dolžino časa koncentracije T_c (čas, ki preteče od prenehanja padavin do konca površinskega odtoka). Tako sem si izbral nevihte dolge 120 min, 720 min in 1440 min. Sintetične padavine je potrebno razporediti v odvisnosti od časa. Potrebno je določiti čas nastopa maksimalnih padavin. S programom HEC-HMS 3.2 je možno premikati konico maksimalnih padavin, in sicer konico lahko postavimo na 25 %, 33 %, 50 %, 66 % in 75 % časa glede na celoten čas trajanja nevihte. Padavine so razporejene tako, da imajo drugo največjo vrednost pred maksimalno vrednostjo, tretjo največjo pa za maksimalno vrednostjo itd. Za nevihte daljše od 24 ur lahko vzamemo povprečne vrednosti za vse padavine, ki so padle zunaj periode 24 ur. Tako ne naredimo velikih napak, kajti padavine so takrat že zelo majhne. Pri mojem primeru sem si izbral čas nastopa konice na 25 %, 50 % in 75 % za primer 100-letne povratne dobe pri nevihti dolgi 120 min, 720 min in 1440 min. Na koncu sem nevihte s 100-letno povratno dobo ter trajanjem 120 min, 720 min ter 1440 min razporedil enakomerno po času in prikazal vpliv razporeditve padavin na površinski odtok.

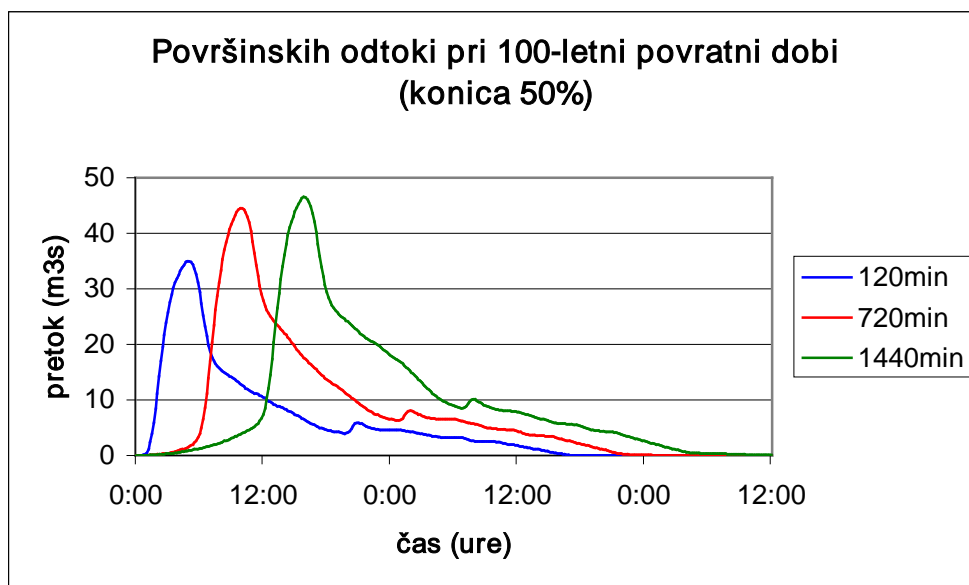
Na sliki 34 in 35 so prikazani površinski odtoki pri 10-in 100-letni povratni dobi za različno trajanje padavin in konico pri 50 %. Vidimo lahko, da trajanje padavin močno vpliva na pretok in čas nastopa maksimalnega odtoka. Pri daljšem času trajanja padavin imamo tudi večjo količino padavin, kar povzroči povečanje pretoka. Prav tako so padavine razporejene čez daljši čas, tako da imamo dalj časa površinski odtok. Rezultati za celotno povodje so prikazani v preglednici 26.

Preglednica 26: Prikaz izračunanih vrednosti za 10- in 100-letno povratno dobo

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	9:50	15:50



Slika 34: Površinski odtok pri 10-letni povratni dobi in konici na 50% časa trajanja padavin

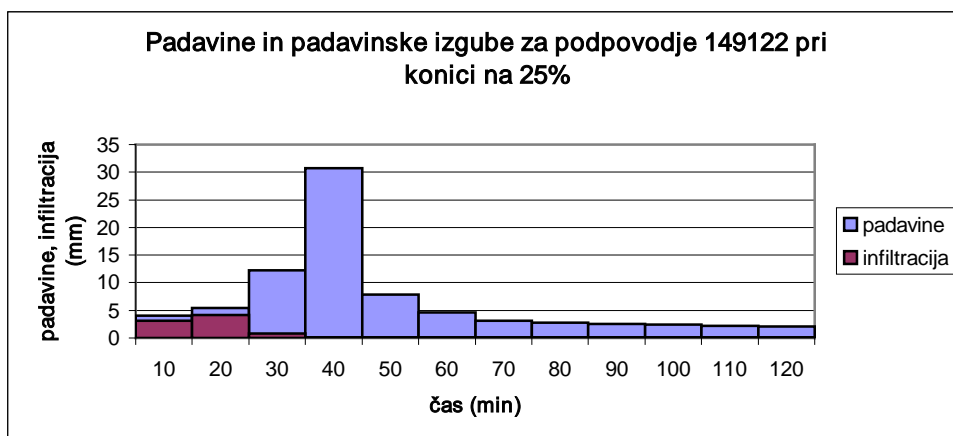


Slika 35: Površinski odtok pri 100-letni povratni dobi in konici na 50% časa trajanja padavin

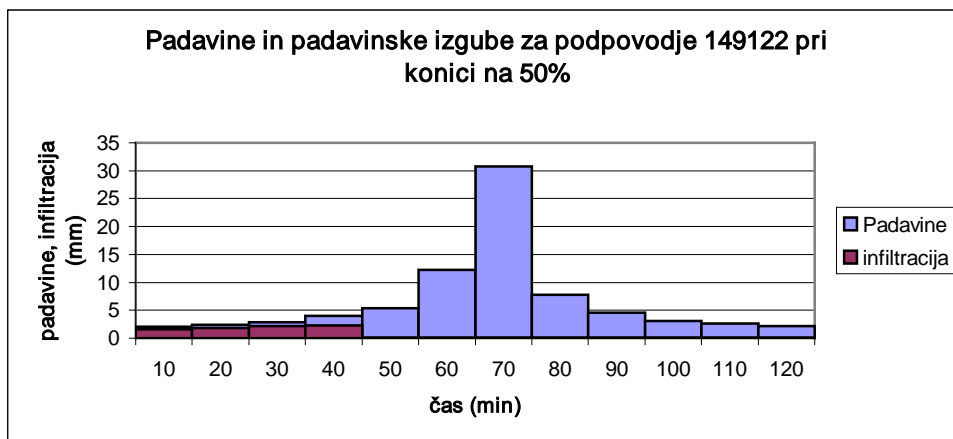
Na sliki 39 so prikazani površinski odtoki za 120 min nevihto s 100-letno povratno dobo in s konico padavin pri 25 %, 50 % in 75 %. S spremembo časa nastopa konice maksimalnih padavin vplivamo na maksimalni odtok, volumen odtoka in tudi čas nastopa maksimalnega odtoka. S kasnejšim nastopom konice pri mojem primeru dosežemo, da se poveča maksimalni odtok, volumen odtoka in čas nastopa maksimalnega odtoka. To pomeni, da so za primer Glinščice bolj neugodne padavine pri katerih nastopijo maksimalne padavine proti koncu nevihte, kajti tako pride do večjega odtoka, kot pri padavinah z večjo intenzivnostjo na začetku nevihte. Razporeditev padavin in padavinske izgube so prikazane na slikah 36, 37 in 38. Podrobnejše rezultate za celotno povodje sem podal v preglednici 27.

Preglednica 27: Prikaz izračunanih vrednosti pri različnem času nastopa maksimalnih padavin

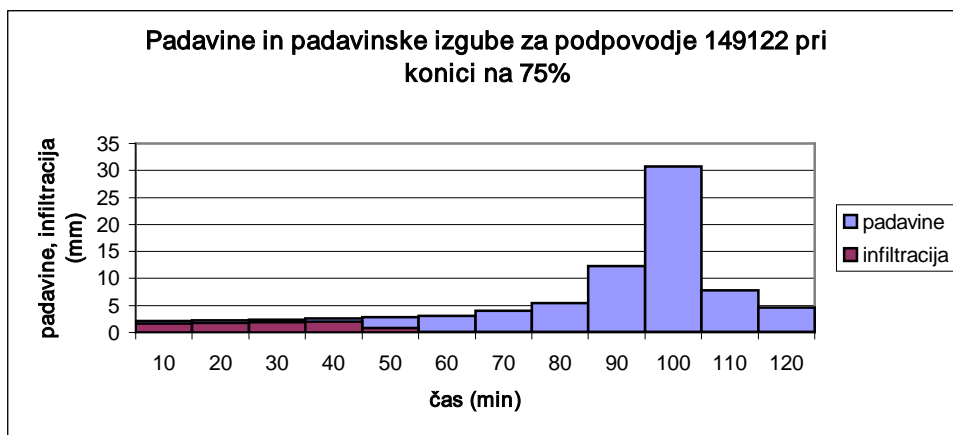
konica	120 minutna nevihta s 100-letno povratno dobo		
	25%	50%	75%
max odtok (m3/s)	34,7	35	34,9
volumen odtoka (m3)	1167700	1180200	1181700
čas nastopa vrha odtoka od pričetka nevihte	4:30	5:00	5:20



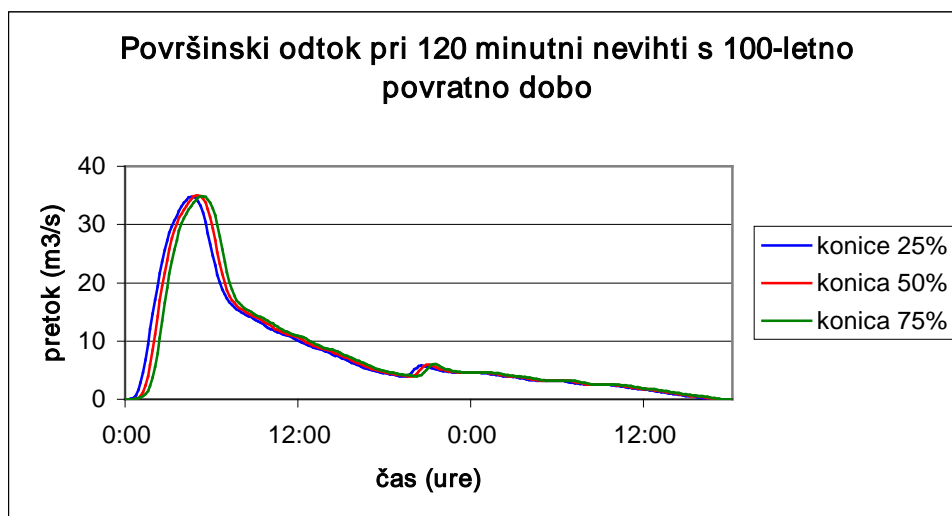
Slika 36: Prikaz padavin pri konici maksimalnih padavin na 25% časa trajanja nevihte



Slika 37: Prikaz padavin pri konici maksimalnih padavin na 50% časa trajanja nevihte



Slika 38: Prikaz padavin pri konici maksimalnih padavin na 75% časa trajanja nevihte

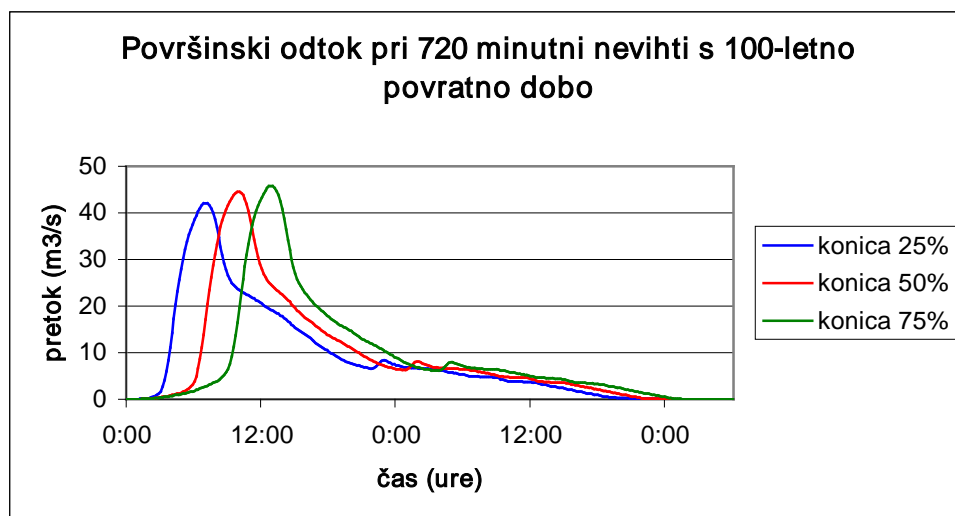


Slika 39: Površinski odtok 120 minutne nevihte s 100-letno povratno dobo za različne položaje konice

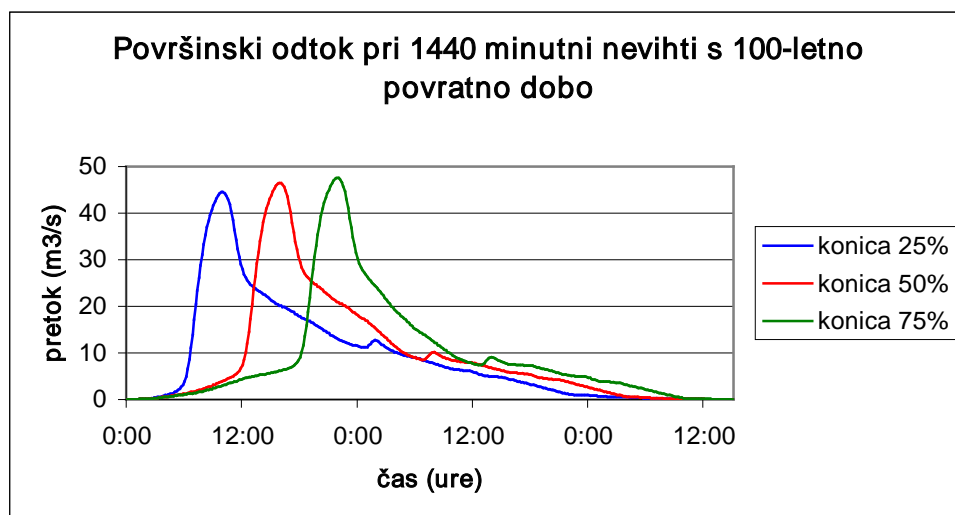
Prav tako sem premikal konico maksimalnih padavin za 720 min in 1440 min padavine pri 100-letni povratni dobi. Vidimo, da so pri daljšem trajanju padavin razlike maksimalnega odtoka, volumna odtoka in časa nastopa maksimalnega odtoka veliko večje in bolj opazne kot pri primeru 120 min nevihte s 100-letno povratno dobo. Najbolj je opazna razlika v času pojava konice. Površinski odtoki so prikazani na slikah 40, 41, izračunane vrednosti za celotno povodje pa v preglednici 28.

Preglednica 28: Izračunane vrednosti pri različnem času trajanja nevihte

	720 min s 100-letno povratno dobo			1440 min s 100-letno povratno dobo		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%
konica						
max odtok (m^3/s)	42,1	44,5	45,8	44,5	46,5	47,5
volumen odtoka (m^3)	1678700	1697300	1702500	2027600	2041700	2046900
čas nastopa vrha odtoka od pričetka nevihte	7:00	9:50	12:50	9:50	15:50	21:50



Slika 40: Površinski odtok 720 minutne nevihte pri 100-letni povratni dobi za različne položaje konice



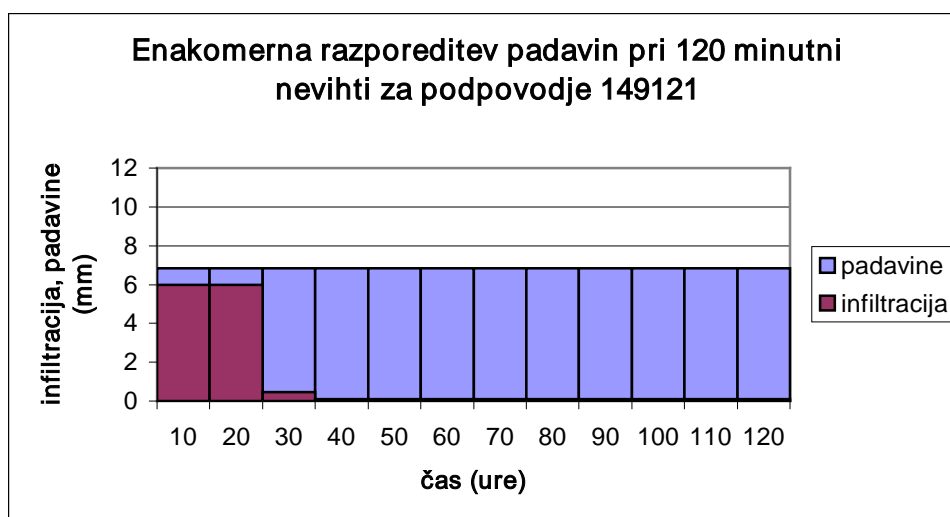
Slika 41: Površinski odtok 1440 minutne nevihte pri 100-letni povratni dobi za različne položaje konice

Na koncu sem še za 120 min, 720 min in 1440 min nevihte s 100-letno povratno dobo razporedil padavine enakomerno v odvisnosti od časa. To sam naredil tako, da sem padavine s pomočjo preglednice 14 razporedil enakomerno po času znotraj časa trajanja nevihte. Primerjava s padavinami, ki imajo konico na 50 % je prikazana v preglednici 29 ter na slikah 43, 44 in 45. Pri enakomerni razporeditvi padavin se z daljšanjem časa trajanja nevihte zmanjšuje konica maksimalnega odtoka v primerjavi z razporeditvijo, ki ima konico padavin

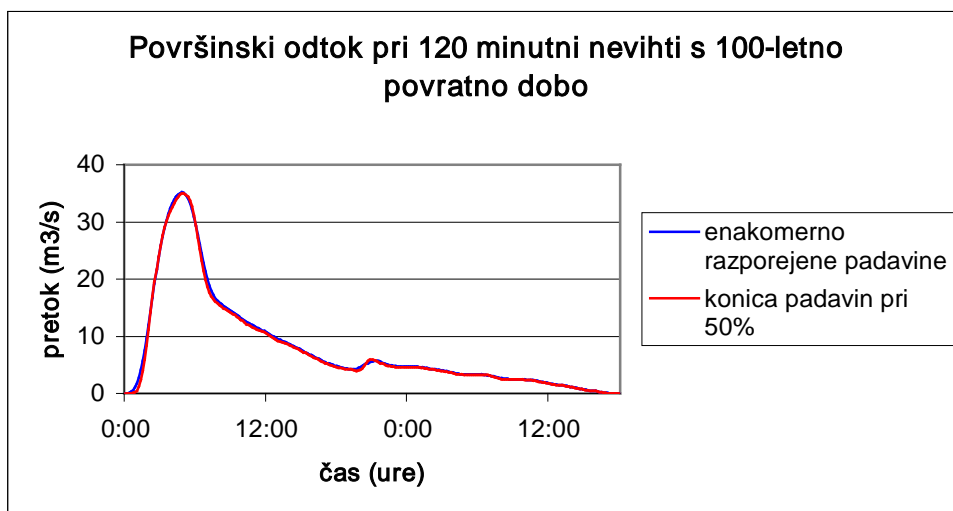
na 50%, kajti program HEC-HMS pri računanju s sintetičnimi histogrami upošteva tudi vsa manjša trajanja padavin do celotnega časa trajanja nevihte in tako določi vsoto padavin, ki se razlikuje od padavin, ki so podane v preglednici 14. Prav tako pride do spremembe volumna in konice odtoka, zaradi oblike razporeditve padavin. Vidimo, da pri 120 minutni nevihti dobimo z enakomerno razporeditvijo padavin majhne razlike v primerjavi z razporeditvijo, ki ima konico padavin na 50%. Problem enakomerne razporeditve se pojavi pri daljših nevihtah, kar se dobro vidi pri 1440 min nevihti, kjer se volumen odtoka zmanjša samo za 1 % v primerjavi z razporeditvijo padavin, ki ima konico na 50 %, vendar pa dobimo za 53 % zmanjšan maksimalni pretok in za 9:00 ur zamaknjen čas nastopa maksimalnega odtoka. Enakomerna razporeditev padavin s padavinskimi izgubami je prikazana na sliki 42.

Preglednica 29: Primerjava izračunanih vrednosti v odvisnosti od razporeditve padavin

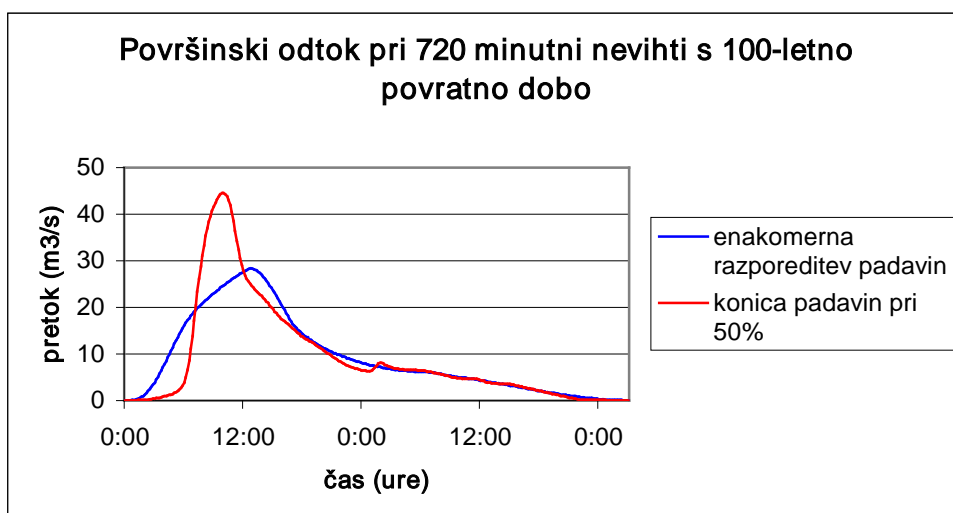
čas trajanja nevihte (min)	100-letna povratna doba					
	120		720		1440	
razporeditev padavin, položaj konice	enakomerna	50%	enakomerna	50%	enakomerna	50%
max odtok (m ³ /s)	35,2	35,0	28,3	44,5	21,7	46,5
volumen odtoka (m ³)	1209500	1180200	1689500	1697300	2025800	2041700
čas nastopa vrha odtoka od pričetka nevihte	4:50	5:00	12:50	9:50	24:30:00	15:50



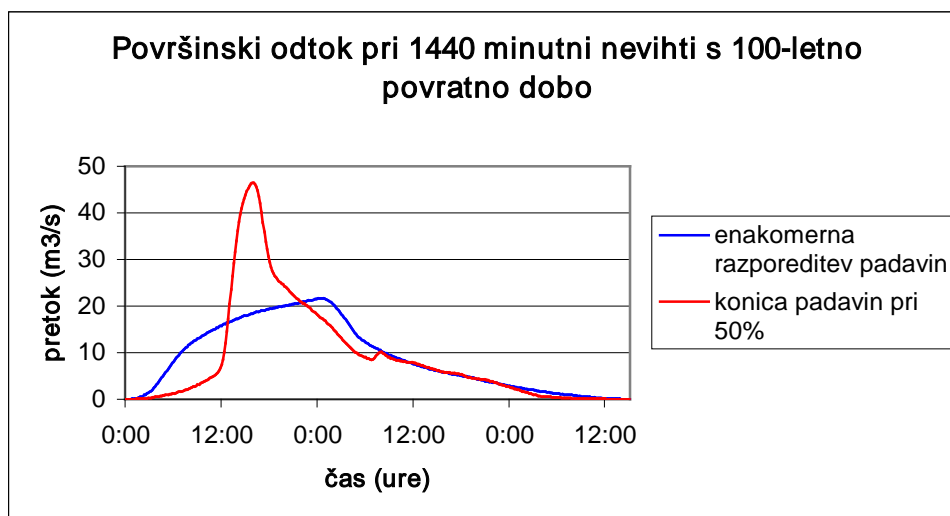
Slika 42: Prikaz enakomerne razporeditve padavin s padavinskimi izgubami pri 120 minutni nevihti za podpovodje 149121



Slika 43: Površinski odtok 120 minutne nevihte s 100-letno povratno dobo za različne razporeditve padavin



Slika 44: Površinski odtok 720 minutne nevihte s 100-letno povratno dobo za različne razporeditve padavin



Slika 45: Površinski odtok 1440 minutne nevihte s 100-letno povratno dobo za različne razporeditve padavin

9 ZAKLJUČKI

V nalogi sem predstavil teoretične osnove metod padavinskih izgub, ki se uporabljajo v svetu. Njihovo uporabnost in primernost rezultatov sem prikazal na umerjenem modelu Glinščice. Metode padavinskih izgub uporabljajo različne vhodne podatke, ki temeljijo na različnih predpostavkah in poenostavitvah. Prikazal sem kako vpliva izbira metode na končni hidrogram odtoka. Avtorji so se poskušali s temi metodami približati dejanskim razmeram v naravi in dobiti na uporabniško enostaven način zadovoljive rezultate. Večino metod sestavljajo kompleksne enačbe, ki so za uporabnika še vedno prekompleksne, zato je ameriška vojska izdelala program HEC-HMS, ki poleg ostalih komponent za računanje hidrogramov odtoka, kot vhodne podatke v program zajema tudi veliko število teh metod.

Iz rezultatov vidimo, da se padavinske izgube za posamezna podpovodja z uporabo različnih metod razlikujejo med seboj. To je posledica vhodnih parametrov, ki jih posamezne metode zajemajo in vpliva posameznega parametra na padavinske izgube. Večina metod temelji na neki vrednosti začetnih izgub, ki s časom preide v konstantne izgube. Prehod od začetnih v konstantne izgube ter njihove vrednosti opisujejo metode z različnimi enačbami, s katerimi se poskušajo približati dejanskim razmeram v naravi. Za primerjavo metod padavinskih izgub sem si izbral primer Glinščice in padavine, ki imajo čas trajanja 40 ur. Maksimalna količina padavin nastopi v 17 uri, v času od 24 do 32 ure padavine prenehajo, po tem času se pa ponovno pričnejo do 40 ure. Iz rezultatov vidimo, da pri vseh metodah površinski odtok hitreje odteče v primerjavi z izmerjenim odtokom in prav tako dobimo predčasni maksimalni odtok. Problem vseh metod je, da se padavinske izgube s časom približujejo konstantni vrednosti. Pri vseh metodah, razen pri metodi SCS padavinskih izgub, se padavine, ki padejo po 32 uri, v celoti infiltrirajo v zemljinu, tako da k površinskemu odtoku prispevajo le neprepustne površine. Izračunani površinski odtok tako hitreje odteče iz povodja kot izmerjeni površinski odtok. Pri metodi SCS se infiltracija z določenim časom močno zmanjša in se približuje vrednosti 0, tako da pri tej metodi padavine, ki padejo po 32 uri skoraj v celoti prispevajo k površinskemu odtoku. Dobimo daljši čas površinskega odtoka v primerjavi z ostalimi metodami in se bolj približamo izmerjenim vrednostim. Posledica takšne razporeditve padavinskih izgub je pa napaka maksimalnega odtoka 7,6 % glede na vrednost

maksimalnega izmerjenega odtoka. Z analizo rezultatov sem ugotovil, da podajo vse metode dobre rezultate, kajti napake med izračunanimi in izmerjenimi vrednosti presegajo 5 % le v primeru maksimalnega odtoka pri SCS metodi, vendar pa dobimo pri vseh metodah predčasni maksimalni odtok.

Prikazal sem tudi uporabnost sintetičnih histogramov na primeru Glinščice. V ZDA imajo že dalj časa v uporabi sintetične histograme, s pomočjo katerih lahko napovedujejo pretoke pri različnih povratnih dobah padavin. Ta postopek določanja odtokov pri različnih povratnih dobah se mi zdi dober in zelo uporaben. Pri računanju s sintetičnimi histogrami sem ugotovil, da na končni odtok iz povodja vpliva postavitve konice maksimalnih padavin, kot tudi razporeditev padavin. S premikanjem konice padavin močno vplivamo na čas nastopa maksimalnega odtoka in tudi na količino maksimalnega odtoka. Ugotovil sem tudi, da ima različna postavitve konice večji vpliv pri daljših in intenzivnejših nevihtah. Prikazal sem tudi do kako velikih napak lahko pridemo z neprimerno razporeditvijo padavin. S primerjavo enakomerne razporeditve padavin in sintetične razporeditve s konico pri 50% sem dobil maksimalne odtok, ki se razlikujejo za več kot 50%, tako da moramo biti pri modeliranju odtokov pozorni pri izbiri razporeditve padavin.

Z vprašanjem padavinskih izgub in sintetičnih histogramov so se v svojih delih (člankih) ukvarjali različni avtorji. Padavinske izgube je obravnaval J. E. Ball (1994), ki je prikazal, da različni načini računanja padavinskih izgub močno vplivajo na zaježitvene lastnosti povodja (pronicanje, prepuščanje, infiltracijo). Ugotovil je, da se njihov vpliv kaže predvsem v različnih časih nastopa maksimalnega odtoka ter obliki samega hidrograma odtoka. N. El-Jabi in S. Sarraf (1991) sta se ukvarjala s sintetičnimi histogrami in v svojih delih prav tako ugotovila, da ima položaj konice padavin bistveni vpliv na čas nastopa maksimalnega odtoka. P Arnaud in sodelavci (2002) so preučevali vpliv prostorske razporeditve padavin na oceno maksimalnega odtoka in volumna odtoka. Analizirali so 50 padavinskih dogodkov na območju 2000 km² in prišli do zaključkov, da pride pri vseh velikostih povodij do manjših razlik pri ekstremnih padavinskih dogodkih (od 30 % do 10 %) in večjih razlik pri manjših padavinskih dogodkih (od 80 % do 20 %). Prav tako se razlika povečuje s povečanjem površine povodja, ker se poveča vpliv razporeditve padavin.

V naravi je dogodke zelo težko napovedati, zato se poskušamo z različnimi metodami čim bolj približati dejanskim razmeram in tako s pomočjo nekaterih matematičnih zakonitosti opisati te pojave. Problem se pojavi predvsem pri povodjih brez meritev. Na primeru umerjenega modela Glinščice sem prikazal, da lahko z uporabo pravih in ustreznih metod dobimo rezultate z dovolj veliko natančnostjo, ki so lahko osnova za napovedovanje visokih vod in tako pripomorejo k reševanju problema visokih vod.

VIRI

Arnaud, P., Bouvier, C., Cisneros, L., Dominguez, R. 2002. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction. *Journal of Hydrology* 260: 216-230.

Ball, J.E. 1994. The influence of storm temporal patterns on catchment response. *Journal of Hydrology* 158, 3-4: 285-303.

Bhatnagar, A. 1969. Determination of storm runoff by the use of infiltration indexes.

<http://www.cig.ensmp.fr/~iahs/redbooks/a085/08526.pdf> (8.9.2008)

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za HEC-HMS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 172 str.

Dijk, A.I.J.M. 2000. Water and Sediment Dynamics in Bench-terraced Agricultural Steeplands in West Java, Indonesia. PHD Thesis, Vrije Univesiteit Amsterdam.

<http://www.geo.vu.nl/~trendy/C11.pdf> (5.9.2008)

Eagleson, P.S. 1970. Evaporation and Transpiration. V: Eagleson, P. S. *Dynamic Hydrology*. New York, Mcgraw-Hill: str. 211-242

El-Jabi, N., Sarraf, S. 1991. Effect of Maximum Rainfall Position on Rainfall-Runoff Relationship. *ASCE Publications* 117, 5: 681-685.

Espinoza, R.D. 1999. Infiltration. V: Delleur, J.W. (Ed.). *The Handbook of Groudwater Engineering*. Boca Raton, CRC Press LLC: poglavje 6.

Gedzelman, S. D. Infiltration and Finite Difference Technique.

http://www.sci.cny.cuny.edu/~stan/E345_L05.doc (5.8.2008)

Gray, D.M. 1973. A general text with special Emphasis on Canadian conditions. V: Gray, D.M. Handbook on the principles of Hydrology. Port Washington, Water information: poglavje 2, 5.

Hall M. P. 1994. Development of Hydrologic standards in Sacramento County using HEC-1. Urban Hydrology & Hydraulics Workshop. Davis, California, 13. -15. september 1994. US Army Corps of Engineers, Hydrology Engineering Center: 376 str.

Kirkby, M. J., Bracken, L. J., Shannon, J. 2005. The influence of rainfall distribution and morphological factors on runoff delivery from dryland catchment in SE Spain. Catena 62:136-156.

Ovsenik, T. Količina padavin pri povratnih dobah ekstremnih padavin za postajo Ljubljana – Bežigrad v obdobju 1948 – 2007. Message to: Dirnbek, L. 20. avgust 2008. Osebna komunikacija.

Smith, A. A. Inc. 2008. Hydrological Theory.

<http://www.alanasmith.com/theory-Calculating-Effective-Rainfall-The-Green-Ampt-Method.htm>, (25.7.2008)

Spellman, F. R., Whiting, N. E. 2004. Stormwater Engineering Calculations. V: Publisher, L. Environmental Engineers Mathematics Handbook. New York, CRC Press: del 6, poglavje 17.

Škrbec, G. 2000. 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. 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.

US Army Corps of Engineers. 1994. Engineering and Design - Flood-Runoff Analysis. Chapter 6: Infiltration/Loss Analysis.

<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1417/c-6.pdf> (8.7.2008)

US Army Corps of Engineers. 1994. Engineering and Design - Flood-Runoff Analysis. Chapter 7: Precipitation Excess-Runoff Transformation.

<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1417/c-7.pdf> (8.7.2008)

US Army Corps of Engineers. 1994. Engineering and Design - Flood-Runoff Analysis. Chapter 16: Ungauged Basin Analysis.

<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1417/c-16.pdf> (9.7.2008)

US Army Corps of Engineers. 1982. Hydrologic Analysis of Ungaged Watersheds Using HEC-1. Davis, California, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center: 122 str.

US Army Corps of Engineers. 2008. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Tehnical Reference Manual: str. 38-51. <http://www.hec.usace.army.mil> (10.6.2008)

US Army Corps of Engineers. 2008. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual version 3.2: 278 str.. <http://www.hec.usace.army.mil>.(5.5.2008)

Viessman, W. J., Lewis, G. L. 2003. Introduction to Hydrology. 5th ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall: str. 181-206.

<http://www.egr.msu.edu/classes/ce421/lishug/text%20book.pdf> (9.10.2008)

Ward, A.D., Trimble S.W. 2004. Environmental Hydrology. 2nd Ed.: Environmental Hydrology Chapter 3 Equations. <http://streams.osu.edu> (10.8.2008)

XPsoftware. Users Manual. Section 11.4: Infiltration.

http://www.xpsoftware.com/products/swmm/webhelp/SECTION_11_GLOBALS/11_4_Infiltration/Decay_rate_of_Infiltration_H1_DECAY.htm (12.10.2008)