

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo

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



UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
VODARSTVA IN  
KOMUNALNEGA  
INŽENIRSTVA

Kandidat:

**TADEJA TINTA**

**Hidrogram enote v hidroloških modelih**

Diplomska naloga št.: 176

**Unit hydrograph in hydrological models**

Graduation thesis No.: 176

**Mentor:**

doc. dr. Mojca Šraj

**Predsednik komisije:**

doc. dr. Dušan Žagar

**Somentor:**

prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 2011

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **TADEJA TINTA** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:  
**»HIDROGRAM ENOTE V HIDROLOŠKIH MODELIH«.**

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

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

Ljubljana, \_\_\_\_\_ 2011

---

(Podpis)

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

<b>UDK:</b>	<b>556:556.3(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Tadeja Tinta</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Mojca Šraj</b>
<b>Somentor:</b>	<b>prof. dr. Mitja Brilly</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Hidrogram enote v hidroloških modelih</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>105 str., 60 pregl., 50 sl., 59 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>hidrološki model, Trebuščica, HEC–HMS, visoke vode, hidrogram enote, sintetični hidrogram enote</b>

### **Izvleček**

V zadnjih letih se v svetu, pa tudi v Sloveniji, vse bolj pogosto srečujemo s pojavljanjem obsežnih poplav. Zaradi vse pogostejših in intenzivnejših poplav se pojavlja vse več projektov in raziskav napovedovanja poplav. Poplave lahko napovedujemo s hidrološkim modeliranjem. Za izdelavo takih modelov potrebujemo tudi hidrogram enote. Hidrogram enote nam poda transformacijo padavin v odtok. Definiran je kot površinski odtok, ki ga povzroči ena enota efektivnih padavin 10 mm, hkrati pa ponazarja vse dejavnike, ki vplivajo na oblikovanje odtoka s porečja. Zato je pri hidrološkem modeliranju in napovedovanju poplav ključnega pomena podatek o padavinah ter lastnostih porečja. V kolikor imamo podatke na voljo, se lahko hidrogram enote določi iz meritev, če pa podatkov ni oziroma so ti zelo pomanjkljivi, pa se izdelajo sintetični hidrogrami enote. V diplomski nalogi je prikazan pregled metod računanja parametrov za izdelavo sintetičnih hidrogramov enote na primeru porečja Trebuščice.

V prvem delu naloge so predstavljene teoretične osnove hidrograma enote, vplivni dejavniki in pregled metod za izdelavo sintetičnega hidrograma enote. V drugem delu sledi uporaba merjenega hidrograma enote in različnih sintetičnih hidrogramov enote na primeru Trebuščice. Izdelan je bil hidrološki model s pomočjo programa HEC-HMS. Na podlagi pridobljenih podatkov o padavinah in pretokih je bil model umerjen. Na podlagi umerjenega modela je bila narejena primerjava hidrograma enote iz meritev ter sintetičnega hidrograma enote izdelanega s pomočjo različnih metod. Za izdelavo sintetičnih hidrogramov enote so uporabljene metode Snyder, SCS in Clark. Rezultati so med seboj primerjani in ovrednoteni.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDC:</b>	<b>556:556.3(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Tadeja Tinta</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assist. Prof. Mojca Šraj, Ph. D.</b>
<b>Cosupervisor:</b>	<b>Prof. Mitja Brilly, Ph. D.</b>
<b>Title:</b>	<b>Unit hydrograph in hydrological models</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis – University studies</b>
<b>Notes:</b>	<b>105 p., 60 tab., 50 fig., 59 eq.</b>
<b>Key words:</b>	<b>hydrologic model, Trebuščica, HEC–HMS, high waters, unit hydrograph, synthetic unit hydrograph</b>

**Abstract**

In the last few years the world, as well as Slovenia, are increasingly faced with the emergence of large-scale flooding. Because of more frequent and intense flooding, there is an increasing number of research projects and flood forecasting. Floods can be predicted by hydrological modeling. Unit hydrograph transforms precipitation into runoff. It is defined as surface runoff caused by one unit of effective rainfall 10 mm. At the same time it illustrates all the factors that influence the creation of runoff from the basin. Hence, it is vital information for hydrological modeling and flood forecasting. If the data are available, the unit hydrograph can be determined from the measurements and if the data are not exist or they are very deficient we can produce a synthetic unit hydrographs.

In the first part of the present work theoretical background of the unit hydrograph is presented as well as the influencing factors and methods of synthetic unit hydrograph. The main part of the work contains the hydrologic model of the Trebuščica made with measured unit hydrograph and different methods of synthetic unit hydrograph. The model was conducted using HEC-HMS software and calibrated using measured rainfall and discharge data. In addition analysis and comparisons of the results of models made with measured unit hydrograph and different methods of synthetic unit hydrograph were presented. Methods of Snyder, SCS, and Clark were used to create synthetic unit hydrograph .

## **ZAHVALA**

Na prvem mestu se najlepše zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Šraj in somentorju prof. dr. Mitji Brilly, za strokovno pomoč pri pisanju diplomskega dela, za potrpežljivost, predvsem pa se jima zahvaljujem za njuno spodbudo.

Hvala tudi vsem ostalim, ki so na kakršenkoli način prispevali k nastanku ter nazadnje še zahvala domačim za potrpežljivost in podporo.

**KAZALO VSEBINE:**

Izjave	III
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	IV
Bibliographic-documentalistic information and abstract	V
Zahvala	VI
<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1 Cilj diplomske naloge .....	2
<b>2 HIDROGRAM ENOTE</b> .....	<b>3</b>
2.1 Uvod.....	3
<b>3 VPLIVNI DEJAVNIKI NA HIDROGRAM ENOTE</b> .....	<b>5</b>
3.1 Vplivni dejavniki povezani s padavinami .....	6
3.1.1 Vpliv trajanja padavin.....	6
3.1.2 Prostorska razporeditev padavin .....	7
3.1.3 Vpliv intenzivnosti padavin .....	8
3.1.4 Začetna vlažnost.....	8
3.2 Vplivni dejavniki povezani s porečjem.....	9
3.2.1 Velikost porečja .....	9
3.2.2 Naklon vodotoka in naklon povodja .....	9
3.2.3 Oblika povodja.....	9
3.2.4 Raba zemljišč .....	10
3.2.5 Trajanje padavin.....	10
3.2.6 Gibanje padavin .....	10
<b>4 OBLIKA HIDROGRAMA ENOTE</b> .....	<b>11</b>
4.1 Hidrogram odtoka in pripadajoči parametri.....	11
4.2 Časovni parametri povezani s hidrogramom .....	13
<b>5 DOLOČANJE HIDROGRAMA ENOTE IZ MERITEV</b> .....	<b>15</b>
5.1 Primer določanja hidrograma enote iz meritev .....	16
<b>6 SINTETIČNI HIDROGRAM ENOTE</b> .....	<b>20</b>
6.1 Metoda Snyder .....	20
6.1.1 Snyder-jeva enačba .....	20
6.1.2 Enačba Bell in Kerr.....	21
6.1.3 Enačba Tulsa District.....	21
6.1.4 Enačba Denver .....	23
6.1.5 Enačba Rao in Delleur .....	25
6.1.6 Enačba Simas in Hawkins.....	26
6.1.7 Enačba Wu .....	26
6.1.8 Enačba Espey in Drugi.....	27
6.1.9 Enačba Riverside Country .....	29
6.1.10 Enačba Colorado State University .....	29
6.1.11 Enačba Putman.....	30
6.2 Metoda SCS .....	31
6.3 Metoda Clark.....	34
6.3.1 Enačba za določitev časa koncentracije površinskega toka .....	36
6.3.1.1 Kerby-jeva enačba.....	36

---

6.3.1.2 Kirpich-ova enačba.....	36
6.3.2 Enačbe za določitev časa koncentracije površinskega toka.....	37
6.3.2.1 SCS TR-55 enačba .....	37
6.3.2.2 Carter-jeva enačba .....	38
6.3.2.3 Enačba Zvezna uprava za letalstvo.....	38
6.3.3 Enačbe za določitev časa koncentracije toka po strugi .....	40
6.3.3.1 Enačba Van Sickle.....	40
6.3.3.2 Ramser-jeva enačba.....	40
6.3.4 Enačbe za določitev celotnega časa koncentracije $T_c$ .....	41
6.3.4.1 Metoda Clarkovega akumulicijskega koeficienta povodja R.....	41
6.3.4.2 Enačba Melching and Marquardt .....	42
<b>7 NARAVNOGEOGRAFSKE ZNAČILNOSTI POREČJA TREBUŠČICE.....</b>	<b>43</b>
7.1 Geografske značilnosti .....	43
7.1.1 Tektonika .....	44
7.1.2 Geološka zgradba .....	44
7.1.3 Pedologija .....	45
7.1.4 Pokrovnost tal.....	49
<b>8 HIDROLOŠKA SLIKA POREČJA .....</b>	<b>51</b>
8.1 Hidrografija .....	51
8.2 Hidrografske karakteristike porečja.....	51
8.3 Pretočne karakteristike reke Trebuščice .....	52
8.4 Podnebje in padavine.....	54
8.5 Padavinske postaje na porečju Trebuščice .....	55
<b>9 MODEL POREČJA TREBUŠČICE .....</b>	<b>59</b>
9.1 Vhodni podatki .....	59
9.1.1 Padavine .....	59
9.1.1.1 Padavinska situacija 11. 7. 2000.....	60
9.1.1.2 Padavinska situacija 18.7.2008.....	62
9.1.2 Koeficienti CN in začetne izgube Ia.....	64
9.1.3 Pretoki.....	65
9.1.3.1 Pretok za padavinsko situacijo 11. 7. 2000 .....	65
9.1.3.2 Pretok za padavinsko situacijo 18. 7. 2008 .....	68
9.2 Umerjanje modela porečja Trebuščice .....	70
9.3 Verifikacija .....	72
<b>10 IZRAČUN PARAMETROV SINTETIČNEGA HIDROGRAMA ENOTE.....</b>	<b>74</b>
10.1 Metoda Snyder.....	74
10.1.1 Snyder-jeva enačba.....	74
10.1.2 Enačba Bell in Kerr .....	74
10.1.3 Enačba Tulsa District .....	75
10.1.4 Enačba Denver.....	75
10.1.5 Enačba Rao in Delleur.....	76
10.1.6 Enačba Simas in Hawkins .....	77
10.1.7 Enačba Wu.....	77
10.1.8 Enačba Espey in Drugi .....	77
10.1.9 Enačba Riverside Country .....	78
10.1.10 Enačba Colorado State University.....	79



---

10.1.11	Enačba Putman.....	79
10.2	Metoda SCS .....	80
10.3	Metoda Clark.....	80
10.3.1	Enačba za določitev časa koncentracije površinskega toka – 100m.....	81
10.3.1.1	Kerby-jeva enačba.....	81
10.3.2	Enačbe za določitev časa koncentracije površinskega toka – 6363m.....	81
10.3.2.1	Kirpich-ova enačba .....	81
10.3.2.2	SCS TR-55 enačba.....	82
10.3.2.3	Carter-jeva enačba.....	82
10.3.2.4	Enačba zvezne uprave za letalstvo.....	83
10.3.3	Enačbe za določitev časa koncentracije toka po strugi – 16160m.....	83
10.3.3.1	Enačba Ramser.....	83
10.3.3.2	Enačba Van Sicle .....	83
10.3.3.3	Prikaz izračuna celotnega časa koncentracije $T_c$ .....	84
10.3.4	Enačbe za določitev celotnega časa koncentracije.....	84
10.3.4.1	Enačba Clark-ovega akumulacijskega koeficienta porečja.....	84
10.3.4.2	Enačba Melching and Marquardt.....	85
10.4	Analiza rezultatov .....	85
10.4.1	Model Snyder.....	85
10.4.2	Model SCS .....	91
10.4.3	Model Clark .....	93
<b>11</b>	<b>ZAKLJUČKI.....</b>	<b>99</b>
<b>12</b>	<b>VIRI: .....</b>	<b>101</b>
12.1	Seznam uporabljene literature.....	101
12.2	Seznam ostale literature .....	103

## KAZALO SLIK:

Slika 1: Hidrogram odtoka .....	6
Slika 2: Časovni vpliv padavin na odtok .....	7
Slika 3: Hidrogram prostorske razporeditve nevihte .....	7
Slika 4: Vpliv spremembe intenzivnosti padavin na obliko hidrograma.....	8
Slika 5: Hidrogram odtoka pri nasičeni in nenasičeni podlagi .....	9
Slika 6: Graf hidrograma odtoka s hietogramom padavin in pripadajočimi parametri .....	12
Slika 7: Čas koncentracije in čas zakasnitve .....	14
Slika 8: Presežene padavine na povodju .....	15
Slika 9: Izračun volumna odtoka .....	16
Slika 10: Slikovna ponazoritev izračuna povprečnih preseženih padavin .....	17
Slika 11: Graf odtoka in graf hidrograma enote .....	17
Slika 12: Graf trajanja preseženih padavin skupaj z baznim odtokom.....	18
Slika 13: Graf trajanja preseženih padavin.....	19
Slika 14: 6-urni hidrogram enote.....	19
Slika 15: Soodvisnost med merjenimi in priporočenimi nagibi povodja .....	24
Slika 16: Določanje koeficienta $C_t$ na podlagi odstotka neprepustnih površin I.....	24
Slika 17: Določanje parametra $P$ s pomočjo odstotka neprepustne površine .....	24
Slika 18: Diagram določanja koeficienta $C_t$ .....	30
Slika 19 : Porečje Trebuščice .....	44
Slika 20: Pedološka karta s porečjem Trebuščice .....	46
Slika 21: Karta pokrovnosti tal.....	50
Slika 22: Prispevno območje Trebuščice s padavinskimi in vodomernimi postajami .....	52
Slika 23: Mreža vodomernih postaj l.1997.....	53
Slika 24: Vodomerna postaja Dolenja Trebuša .....	53
Slika 25: Karakteristični pretoki Trebuščice v obdobju 1971-2000.....	54
Slika 26: mreža postaj z registracijo padavin 2009 .....	56
Slika 27: Lokacija padavinske postaje Kal nad Kanalom .....	56
Slika 28: Padavinska postaja Kal nad Kanalom .....	57
Slika 29: Lokacija padavinske postaje Lokve .....	57
Slika 30: Padavinska postaja Lokve .....	57
Slika 31: Lokacija klimatološke postaje Vojsko .....	58
Slika 32: Klimatološka postaja Vojsko .....	58
Slika 33: Vpliv padavinskih postaj s Thiessonovi poligoni .....	60
Slika 34: Histogram padavin vseh treh padavinskih postaj za padavinsko situacijo 11.7.2000 .....	62
Slika 35: Histogram padavin vseh treh padavinskih postaj za padavinsko situacijo 18.7.2008 .....	64
Slika 36: Hidrogram odtoka ter določen bazni odtok na podlagi treh točk za padavinsko situacijo 11.7.2000.....	66
Slika 37: 10- in 20-minutni hidrogram enote za padavinski dogodek 11.7.2000.....	68
Slika 38: Hidrogram odtoka ter določen bazni odtok na podlagi treh točk za padavinski dogodek 18.7.2008. ....	69
Slika 39: Umerjen graf odtoka 11.7.2000.....	71
Slika 40: Verifikacija hidrograma odtoka 18.7.2008 s pomočjo hidrograma enote 11.7.2000	72
Slika 41: Primerjava Snyderjevega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametrov $T_p$ in $C_p$ izračunana po enačbi Bell-a in Kerr-a ...	87
Slika 42: Primerjava Snyderjevega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom ente – vrednost parametrov $T_p$ in $C_p$ izračunana po enačbi Rao in Delleur.....	88

---

Slika 43: Primerjava Snyderjevega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametrov $T_p$ in $C_p$ izračunana po enačbi Putman.....	90
Slika 44: Primerjava odtoka Snyderjevega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – optimalna vrednost parametrov $T_p$ in $C_p$ .....	91
Slika 45: Primerjava sintetičnega SCS hidrograma enote z merjenim odtokom in odtokom, z uporabniško določenim hidrogramom enote.....	92
Slika 46: Primerjava SCS hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim HE – optimalna vrednost $T_p$ .....	93
Slika 47: Primerjava Clarkovega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametra $T_c$ izračunana po kombinaciji enačb Kerby, SCS TR-55 in Van Sickle .....	95
Slika 48: Primerjava Clarkovega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametra $T_c$ izračunana po kombinaciji enačb Kerby, Carter in Van Sickle.....	96
Slika 49: Primerjava Clarkovega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametra $T_c$ izračunana z enačbo Clarkovega akumulacijskega koeficienta $R$ .....	97
Slika 50: Primerjava Clarkovega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim HE – optimalna vrednost $T_c$ in $R$ .....	98

## KAZALO PREGLEDNIC:

Preglednica 1: Koeficienti CN za urbanizirane površine .....	32
Preglednica 2: Koeficient CN za obdelana kmetijska zemljišča .....	33
Preglednica 3: Koeficient CN za ostala kmetijska zemljišča .....	34
Preglednica 4: Koeficient hrapavosti površine zemljišča n.....	36
Preglednica 5: Priporočene vrednosti $T_c$ za planinska območja.....	37
Preglednica 6: Koeficient odtoka .....	39
Preglednica 7: Tipi tal – Avtomorfna tla .....	47
Preglednica 8: Tipi tal – Hidromorfna tla.....	48
Preglednica 9: Pedološka sestava tal .....	48
Preglednica 10: Pokrovnost tal na porečju Trebuščice.....	50
Preglednica 11: Karakteristike porečja Trebuščice .....	52
Preglednica 12: Padavinski postaji in klimatološka postaja.....	55
Preglednica 13: Uteži izračunane s pomočjo Thiessenovih poligonov .....	60
Preglednica 14: 5-minutne padavine na padavinski postaji Kal za padavinsko situacijo 11.7.2000 .....	61
Preglednica 15: 5-minutne padavine na padavinski postaji Vojsko za padavinsko situacijo 11.7.2000 .....	61
Preglednica 16: 5-minutne padavine na padavinski postaji Lokve za padavinsko situacijo 11.7.2000 .....	61
Preglednica 17: 10- minutne padavine za vse tri padavinske postaje z upoštevanimi utežmi za padavinsko situacijo 11.7.2000 (preglednica 11) .....	61
Preglednica 18: 5-minutne padavine na padavinski postaji Kal za padavinsko situacijo 18.7.2008 .....	62
Preglednica 19: 5-minutne padavine na padavinski postaji Vojsko za padavinsko situacijo 18.7.2008 .....	63
Preglednica 20: 5-minutne padavine na padavinski postaji Lokve za padavinsko situacijo 18.7.2008 .....	63
Preglednica 21: 10-minutne padavine za vse tri padavinske postaje z upoštevanimi utežmi za padavinsko situacijo 18.7.2008 (preglednica 11) .....	63
Preglednica 22: Skupina zemljine za porečje Trebuščice .....	64
Preglednica 23: Izračun $I_a$ s pomočjo dobljenega CN .....	65
Preglednica 24: Določanje hidrograma enote za pretočno situacijo 11.7.2000.....	67
Preglednica 25: Debelina vodne plasti .....	68
Preglednica 26: Pretočna situacija 18.7.2008.....	69
Preglednica 27: Debelina vodne plasti .....	70
Preglednica 28: Rezultati umerjanja merjenega in izračunanega odtoka .....	71
Preglednica 29: Rezultati umerjanja merjenega in izračunanega odtoka .....	72
Preglednica 30: Izračunani parametri po enačbi Snyder .....	74
Preglednica 31: Izračunani parametri po enačbi Bell in Kerr .....	75
Preglednica 32: Izračunani parametri po enačbi Tulsa District.....	75
Preglednica 33: Izračunani parametri po enačbi Denver.....	76
Preglednica 34: Izračunani parametri po enačbi Denver.....	76
Preglednica 35: Izračunani parametri po enačbi Rao in Delleur .....	77
Preglednica 36: Izračunani parametri po enačbi Simas in Hawkins .....	77
Preglednica 37: Izračunani parametri po enačbi Wu.....	77
Preglednica 38: Izračunani parametri po enačbi Espey in drugi .....	78
Preglednica 39: Izračunani maksimalni pretok po enačbi Espey in drugi.....	78

Preglednica 40: Izračunani parametri po enačbi Espey in drugi.....	78
Preglednica 41: Izračunani parametri po enačbi Riverside Country.....	79
Preglednica 42: Izračunani koeficient $C_t$ po enačbi Colorado State University .....	79
Preglednica 43: Izračunani parametri po enačbi Colorado State University .....	79
Preglednica 44: Izračunani parametri po enačbi Putman.....	80
Preglednica 45: Izračunani parametri po enačbi SCS .....	80
Preglednica 46: Izračunani koeficient $S_f$ po enačbi Colorado State University.....	80
Preglednica 47: Izračunani parametri po enačbi Kerby .....	81
Preglednica 48: Izračunani parametri po enačbi Kirpich.....	82
Preglednica 49: Izračunani parametri po enačbi SCS-TR55 .....	82
Preglednica 50: Izračunani parametri po enačbi Carter .....	82
Preglednica 51: Izračunani parametri po enačbi Zvezne uprava za letalstvo .....	83
Preglednica 52: Izračunani parametri po enačbi Ramser.....	83
Preglednica 53: Izračunani parametri po enačbi Van Sickle .....	83
Preglednica 54: Kombinacije seštevkov enačb za izračun celotnega časa koncentracije.....	84
Preglednica 55: Izračunani parametri po enačbi Clark-ovega akumulacijskega koeficienta porečja.....	84
Preglednica 56: Izračunani parametri po enačbi Melching in Marquart.....	85
Preglednica 57: Vrednosti parametrov $T_p$ in $C_p$ .....	86
Preglednica 58: Primerjava rezultatov odtoka, dobljenega s pomočjo različnih sintetičnih HE, z merjenim hidrogramom.....	86
Preglednica 59: Vrednosti parametra $T_p$ za SCS HE .....	91
Preglednica 60: Primerjava rezultatov odtoka za SCS sintetični HE.....	92

## 1 UVOD

Voda postaja v današnjem svetu vse bolj pomembna dobrina. Zaenkrat jo lahko še najdemo na vseh delih sveta in je tako osnovna in nepogrešljiva dobrina. Prav tako je voda edina snov, ki se pojavlja v vseh treh agregatnih stanjih in zato se v naravi pojavlja kot hidrološki krog. Voda, ki kroži se tako med drugim steka v vodotoke in oceane, del teh padavin, ki padejo na zemeljsko površje pa pronica v podtalje in tako odteče kot podpovršinski tok. Padavine so lahko tako zelo intenzivne, da se le-te ne morejo dovolj hitro infiltrirati in zato v večini površinsko odtečejo, ali pa je zemlja že prenasičena in se ravno tako pojavi le površinski odtok. Ko nastane takšno stanje v naravi, se začnejo pojavljati tako imenovane poplave.

V zadnjih par letih beležimo po vsem svetu vse večje število poplav. Tudi v Sloveniji so postale poplave stalnica, saj se z njimi srečujemo že skoraj vsako leto, na določenih območjih pa tudi večkrat letno. Zaradi vse pogostejšega pojavljanja poplav pa se pojavlja vse več projektov in raziskav napovedovanja poplav in tudi obseg le teh. Cilj raziskav pa je možnost čimbolj točnega napovedovanja velikosti poplave in ostalih značilnosti ter s tem zagotavljanja pravočasnih opozoril.

Z napovedovanjem poplav in izdajanjem dovolj zgodnjih opozoril se podaja možnost ukrepanja pred nastopom pojava poplave. V ta namen je bilo razvitih več matematičnih modelov. S hidrološkimi modeli se lahko dandanes na podlagi padavinskih podatkov napove velikost odtoka. Osnova hidroloških modelov je hidrogram enote. Z njim poskušamo simulirati površinski odtok. Prvi, ki je podal teorijo hidrograma enote je bil Sherman, leta 1932 (Brilly in Šraj, 2006). Hidrogram enote deluje na predpostavki, da so učinkovite padavine enakomerno in časovno razporejene po porečju ter da je oblika hidrograma neodvisna od predhodnih padavin. Hidrogram enote ponazarja vse dejavnike, ki vplivajo na obliko hidrograma.

Modeliranje hidrograma enote je mogoče na podlagi zadostnega števila podatkov o padavinah, pretokih in porečju. Zato morajo biti padavinske napovedi čimbolj točne. V kolikor pa podatkov nimamo oziroma so ti pomanjkljivi, pa se izdelajo sintetični hidrogrami enote.

## 1.1 Cilj diplomske naloge

Cilj diplomske naloge je na praktičnem primeru porečja Trebuščice analizirati uporabnost posameznih modelov sintetičnega hidrograma enote, jih primerjati in analizirati njihovo natančnost v primerjavi s hidrogramom enote, dobljenim iz meritev. Za študijo sem uporabila enega od najpogosteje uporabljenih hidroloških programov HEC-HMS 3.5. V praksi se pri hidrološkem modeliranju pogosto srečujemo s problemom pomanjkanja zadostnega števila podatkov, zato je znanje sintetičnega modeliranja toliko bolj pomembno. Ker obstaja veliko metod za določanje sintetičnega hidrograma enote, sem se osredotočila zgolj na tiste najpogosteje uporabljene; Snyder, Clark in SCS metodo, ki jih vsebuje model HEC-HMS. Za vsako metodo potrebujemo večje število vhodnih podatkov, na podlagi katerih izračunamo ključna parametra: čas zakasnitve oziroma čas koncentracije. Za vsako metodo za izračun omenjenih parametrov obstaja veliko enačb. Uporabila sem enačbe, za katere sem imela na voljo dovolj vhodnih podatkov. V prvem, teoretičnem delu sem predstavila teorijo hidrograma enote in metod določanja časovnih parametrov znotraj hidroloških modelov, ki so za modeliranje potrebni. V drugem delu pa sem na praktičnem primeru porečja Trebuščice primerjala merjeni hidrogram enote s sintetičnimi hidrogrami enote.

## 2 HIDROGRAM ENOTE

### 2.1 Uvod

Hidrogram enote trajanja  $T_d$  je definiran kot površinski odtok, ki ga povzroči enota efektivnih padavin 10 mm (v ZDA 1 palec), ki so bile v času  $T_d$  enakomerno razporejene po porečju (Brilly in Šraj, 2006). Uporabljamo ga za napovedovanje poplav in hidrološko modeliranje, ter se nanaša na procese preoblikovanja padavin v hidrograme odtoka. Napovedovanje poplav in modeliranje ponavadi vključuje čim boljši opis procesov preoblikovanja padavinskega odtoka. Ti opisi temeljijo ali na empirični ali na fizikalni osnovi, ali pa vključuje fizikalne procese v kombinaciji obeh. Čeprav so nekateri izmed hidroloških procesov poenostavljeni ali celo izpuščeni, lahko v praksi podajajo zadostne ocene poplavnih hidrogramov.

Pri modeliranju posameznih poplav ne upoštevamo učinka evapotranspiracije kot tudi ne interakcije med vodonosnikom in vodotokom. Evapotranspiracije ne upoštevamo, ker je njena velikost v času, ko se poplava razvija, neznatna v primerjavi z infiltracijo. Prav tako je zanemarljiv učinek interakcije podpovršinskega odtoka, ker je odzivni čas podpovršinskih tal daljši kot odzivni čas na površini ali v neposrednem odtoku. Modeliranje na splošno vključuje naslednje vidike (Ramírez, 2000):

- a) ocena pretoka padavin na porečju  $I(x, t)$  v odvisnosti od prostora in časa;
- b) ocena preseženih padavin ali efektivnih padavin v odvisnosti od prostora in časa, to je  $I_e(x, t)$ . Efektivne padavine so padavine, ki odtečejo po upoštevani infiltraciji in drugih odvzemih.
- c) usmerjanje preseženih padavin k odtoku s porečja, da se določi ustrezen poplavni hidrogram,  $Q(t)$ .

### 2.2 Analiza hidrograma enote

Hidrogram enote je hidrogram, ki izhaja iz presežka padavin na povodju po enotni stopnji v določenem časovnem obdobju. Hidrogram enote je prvič predlagal Sherman (1932). Največkrat želimo z modeli hidrograma enote simulirati površinski odtok z določenega porečja in s tem možnost napovedovanja poplav.

Shermanov hidrogram enote naj bi bil uporaben za porečja, ki so manjša od 5200 km<sup>2</sup> (2000 milj<sup>2</sup>). Če nevihtni vzorci vplivajo na hidrogram odtoka, potem porečja lahko razdelimo na manjša podpovodja in za vsako od teh naredimo analizo hidrograma (Fang in sod., 2005a).

Podatki, ki so potrebni za analizo hidrograma enote, so hietogrami padavin in hidrogram odtoka za dogodke enega ali več neviht. Ni pričakovati, da bo odziv porečja enak za 2-letno in 50-letno nevihto.



V idealnih razmerah naj bi hidrogram imel en sam vrh ter bi bil enakomerno razporejen v času in prostoru na porečju. Poleg tega morata biti celotno območje, ki prispeva k odtoku, ter nevihta dovolj velika, tako da je hidrogram odtoka dobro opredeljen. Če je odmik od teh meril prevelik, se je morda bolje zateči k postopku sintetičnega hidrograma enote. (McCuen, 2002)

Če so efektivne padavine, podane v obliki hietograma, ki je kot zaporedje  $M$  impulznih padavin z enakimi dolžinami trajanja  $\Delta t$ , ki ustreza neposrednemu hidrogramu odtoka, lahko izrazimo ločeno konvolucijo hietograma padavin in hidrograma enote (Chow in sod., 1988), in sicer:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{m'} P_m U_{n-m+1}, \quad m' = \min(n, M) \quad (1)$$

$$Q_n = Q(n\Delta t), \quad n = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$P_m = \int_{(m-1)\Delta t}^{m\Delta t} I_s(\tau) d\tau, \quad m = 1, \dots, M \quad (3)$$

če je  $P_m$  volumen efektivnih padavin  $m^{\text{th}}$ ,  $Q_n$  neposredni odtok, in  $U_{n-m+1}$  koordinate hidrograma enote. Čeprav zgornje predpostavke vodijo do sprejemljivih rezultatov, so dejansko porečja nelinearni sistemi. Na primer, hidrogrami enote, ki izhajajo iz različnih dogodkov padavine-odtok, pod predpostavko o linearnosti, so običajno različni, kar razveljavi predpostavko o linearnosti.

Določanje hidrograma enote za določena porečja se lahko izpelje bodisi z uporabo teoretičnega razvoja linearne teorije sistema, ali z uporabo empiričnih tehnik. Za oba primera, morajo biti na voljo sočasna opazovanja tako padavin kot pretokov (Ramírez, 2000).

### 3 VPLIVNI DEJAVNIKI NA HIDROGRAM ENOTE

Hidrogrami enote se oblikujejo za posamezno porečje na dva načina. Če so podatki o padavinah, ki so padli na obravnavano povodje ter podatki o odtoku dostopni, potem se lahko uporabi številne tehnike za oceno in določanje hidrograma enote. Če pa nimamo potrebnih podatkov, potem moramo uporabiti modele sintetičnega hidrograma. Metode regionalizacije se uporabljajo za prenos znanih hidrogramov (ali druge hidrološke značilnosti) iz lokacije, kjer so meritve na voljo, na porečja, kjer teh ni. Regionalizacija vključuje določitev časovnih parametrov za postopek določanja hidrograma enote. Časovni parametri lahko vključujejo čas do vrha hidrograma, čas pojava površinskega odtoka ali čas koncentracije padavin.

Padavine, ki so prestrežene na površju imajo močan vpliv na spreminjanje vodnega režima in s tem na obliko hidrograma. Pri tem je lahko hidrološki odziv (Cretu in sod., 2009):

- Hiter - pomemben v primeru površinskih tokov;
- Zamuden - pomembno v primeru toka podzemne vode;
- Skupen - hidrološki odziv je sestavljen iz površinskega in podzemnega toka;
- Delni - hidrološki odziv je rezultat površinskega toka ali toka podzemne vode.

Dejavnike, ki vplivajo na obliko in komponente hidrograma, lahko razvrstimo v podnebne in fizikalno-geografske dejavnike. Na hidrološki odziv porečja vplivajo številni dejavniki, ki so povezani s (Cretu in sod., 2009):

- podnebnimi razmerami okolja,
- padavinami (prostorske in časovne porazdelitve, intenzivnost in trajanje),
- morfologijo porečja (oblika, dimenzije, orientacije pobočij),
- fizikalnimi lastnostmi porečja (tla narave, vegetativna pokritost),
- strukturo hidrografske mreže (dimenzije, hidravlične lastnosti),
- predhodnim stanjem vlažnosti tal.

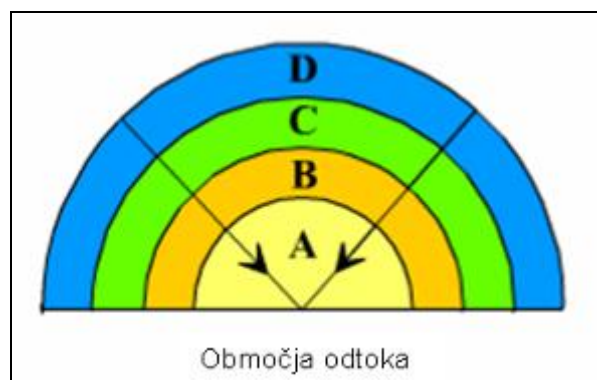
Oblika hidrograma enote je zelo odvisna od učinkovitih padavin ter od lastnosti porečja, ki jih bom tudi podala v naslednjih dveh podpodglavjih. Namreč, na obliko vplivajo tako lastnosti prestreženih oz. učinkovitih padavin kot tudi določene lastnosti porečja (Cretu in sod., 2009)

### 3.1 Vplivni dejavniki povezani s padavinami

#### 3.1.1 Vpliv trajanja padavin

Odziv padavin je odvisen od količine padavin in spremembe intenzivnosti v času trajanja. Slika 1 prikazuje, da so efektivne padavine razdeljene v štiri območja in sicer A, B, C in D. Območja so omejena z izohronami. Spremenljivi čas odtoka se lahko dodeli v vsako območje. 1 ura za območje A ter 4 ure za območje D.

Trajanje padavin neke intenzivnosti ima tudi neposredno proporcionalni učinek na obseg odtoka. Učinek trajanja se odraža v naraščajočem delu hidrograma in njegovi višini.



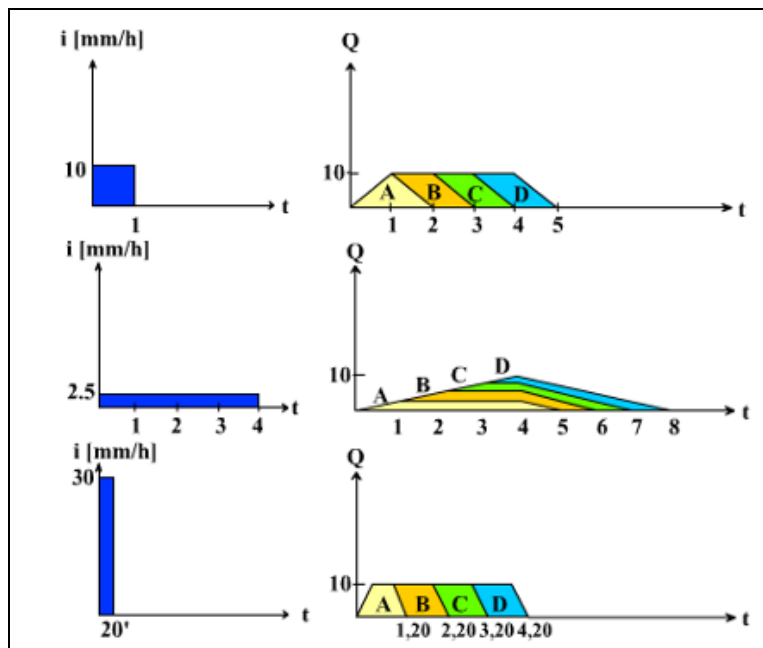
Slika 1: Hidrogram odtoka  
(Cretu in sod., 2009)

Padavine s prostornino 10 mm se konstantno upošteva v vsakem primeru.

Slika 2 predstavlja tri primere:

- enota padavin 10 mm/h ( $i = 10 \text{ mm/h}$ ) na porečju;
- enota padavin 10 mm/4 h ( $i = 2,5 \text{ mm/h}$ ) na porečju;
- enota padavin 10 mm/20 min ( $i = 30 \text{ mm/h}$ ) na porečju.

i...intenziteta padavin

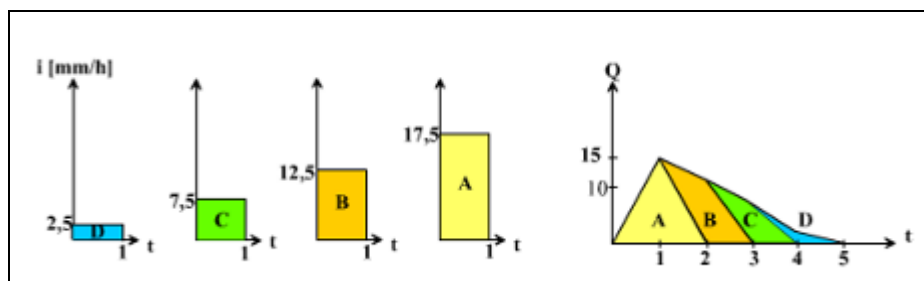


Slika 2: Časovni vpliv padavin na odtok  
(Cretu in sod., 2009)

Slika 2 prikazuje časovni vpliv padavin na obravnavano povodje. Tako so hietogrami prikazani na levi strani in hidrogrami na desni strani. Kritični čas je tisti čas na hidrogramu, kjer le ta doseže maksimum.

### 3.1.2 Prostorska razporeditev padavin

Povprečna količina padavin 10 mm/h je enakomerno porazdeljena čez celotno porečje, ki predstavlja območje prestrezanja padavin. Slika 3 prikazuje vpliv prostorske razširjenosti nevihte na prikazanem hidrogramu.



Slika 3: Hidrogram prostorske razporeditve nevihte  
(Cretu in sod., 2009)

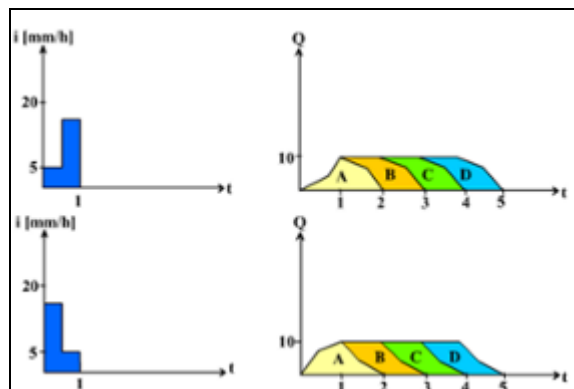
Če se padavine gibljejo dolvodno po porečju proti iztoku s porečja, bo na iztoku hitrejša in večja koncentracija toka. To se kaže v doseženem vrhu hidrograma (Slika 3). Nasprotno je, če se nevihta

giblje navzgor po porečju, saj bo vrh hidrograma nižji, bo pa njegovo trajanje daljše. Hidrogram bo v tem primeru bolj razpotegnjen.

### 3.1.3 Vpliv intenzivnosti padavin

Med podnebnimi dejavniki so trije pomembni dejavniki, ki vplivajo na obliko hidrograma in sicer: intenzivnost, trajanje in smer potovanja padavin. Za dano trajanje, vrh in prostornino površinskega odtoka je intenzivnost padavin sorazmerna. Intenzivnost padavin znatno vpliva na površinski odtok. Če se intenzivnost padavin poveča, se površinski odtok hitro povečuje.

Na sliki 4 je skupna količina padavin 10 mm/h enakomerno razporejena po prispevni površini, vendar pa ni časovno enakomerno porazdeljena. To se kaže v obliki hidrograma odtoka.

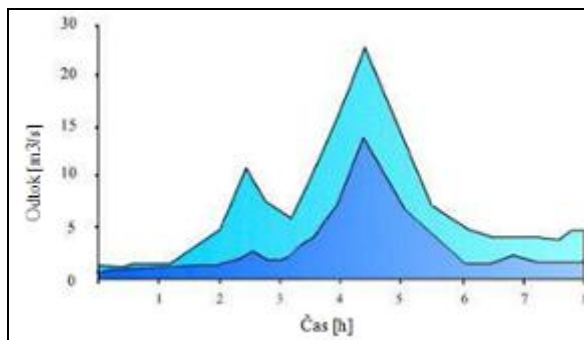


Slika 4: Vpliv spremembe intenzivnosti padavin na obliko hidrograma  
(Cretu in sod., 2009)

### 3.1.4 Začetna vlažnost

Hidrološki odziv je odvisen tudi od začetnega stanja vlažnosti zemljine na obravnavanem območju. Efektivni površinski odtok je odvisen od efektivnih padavin, te pa so povezane s predhodnim stanjem porečja oz. prispevne površine. Namreč, če je območje predhodno že nasičeno z vodo ali pa je to neprepustno, imamo ob veliki količini dežja velik površinski odtok.

V kolikor pa imamo porečje, ki ima nenasičeno podlago, ima le-ta določeno kapaciteto por, ki jih efektivne padavine morajo najprej zapolniti in šele nato pride do površinskega odtoka. Ta pojav je predstavljen na sliki 5, kjer zgornji hidrogram prikazuje odziv porečja s predhodno zasičeno podlago in spodnji odziv porečja z nasičeno podlago.



Slika 5: Hidrogram odtoka pri nasičeni in nenasičeni podlagi  
(Cretu in sod., 2009)

### 3.2 Vplivni dejavniki povezani s porečjem

Nekatere vplive porečja in vodotoka na obliko hidrograma so podali tudi Fang in sod. (2005) in so predstavljeni v nadaljevanju.

#### 3.2.1 Velikost porečja

Mala porečja imajo drugačno funkcijo od velikih porečij v smislu pojava različnih faz površinskega odtoka. Na majhnih porečjih tok po površini porečja prevladuje nad kanalskim tokom. Zato imajo raba zemljišč in intenzivnost padavin pri tem pomembno vlogo, saj vplivajo na vrh hidrograma. Pri velikih porečjih so ti vplivi manjši, saj je kanalski tok veliko bolj pomemben od površinskega toka po celotnem porečju.

#### 3.2.2 Naklon vodotoka in naklon povodja

Nagib glavnega vodotoka kontrolira povprečno hitrost toka. Padajoč del hidrograma predstavlja izčrpavanje skladiščenja vode na porečju. Naklon vodotoka ima izrazit vpliv na ta del hidrograma. Večji naklon vodotoka povzroči hitrejše izčrpavanje skladiščenja in s tem strm padec hidrograma. Naklon porečja pa je bolj pomemben v manjših porečjih.

#### 3.2.3 Oblika povodja

Oblika bazena vpliva na čas, ki je potreben za potovanje vala iz oddaljenih delov porečja do iztoka na porečju. Na takšen način oblika porečja vpliva na pojav vrha in obliko hidrograma. Polkrožno oblikovana povodja imajo na splošno takšno obliko hidrograma, da ima ta zelo visok in ozek vrh. Na drugi strani pa imajo podolgovato oblikovana porečja bolj nizko oblikovane hidrograme ter so ti tudi bolj široki.

### **3.2.4 Raba zemljišč**

Vegetacija in gozdovi povečajo infiltracijo in zmogljivosti skladiščenja vode v tleh, s tem pa povzročajo precejšen vpliv za površinski odtok. Tako vegetacija na splošno zmanjšuje količino površinskega dela odtoka. Ta učinek je navadno zelo izrazit na majhnih površinah oz. manjših porečjih, ki imajo površino manjšo kot 150 km<sup>2</sup> (58 kvadratnih milj). Poleg tega je učinek vegetacije izrazitejši ob manjših padavinskih pojavih. Za dve porečji, ki imata enaki površini in so vsi drugi dejavniki enaki, je vrh hidrograma višji za porečje, ki ima manjšo gostoto vegetacije.

### **3.2.5 Trajanje padavin**

Trajanje padavin določene intenzivnosti je tudi neposredno sorazmerno z obsegom odtoka. Učinek trajanja padavin se odraža v obliki grafa na naraščajočem delu ter njegovemu vrhu.

### **3.2.6 Gibanje padavin**

Če se padavine gibljejo v dolvodni smeri na porečju, se pojavi hitrejša koncentracija toka. To se kaže v vrhu hidrograma. Nasprotno se dogaja, če se padavine gibljejo gorvodno po povodju. V tem primeru bo imel hidrogram nižji vrh ter daljše časovno trajanje. (Fang in sod., 2005a)

## 4 OBLIKA HIDROGRAMA ENOTE

Za vsako trajanje padavin obstaja drugačen hidrogram enote. Po vsej verjetnosti se hidrogram enote za 1-urno nevihto precej razlikuje od hidrograma enote za 6-urno nevihto. Na hidrogram enote vpliva tudi časovna in prostorska porazdelitev preseženih padavin ter značilnosti porečja. Z drugimi besedami, dva padavinska dogodka z različnimi razporeditvami na porečju povzročita različne hidrograme enote, tudi če je trajanje preseženih padavin enako. Odstopanja časovne in prostorske porazdelite padavin prispevajo k odstopanju izračunanih hidrogramov enote za različne nevihtne dogodke na istem porečju.

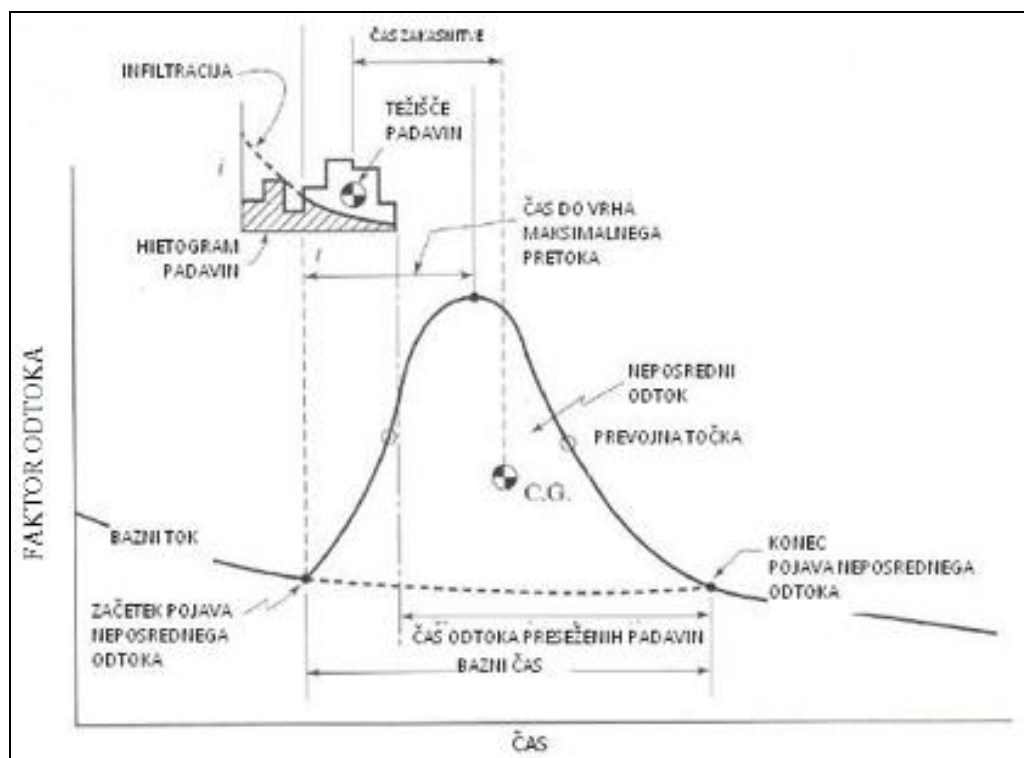
Razviti je možno več vrst hidrogramov enote. D-urni (ali D-minutni) hidrogram enote je hidrogram, ki je posledica nevihte s konstantnim presežkom padavin 1 mm, ki so enakomerno razporejene glede na trajanje v D ur (ali D minut). Trenutni hidrogram enote (HE) je poseben primer D-urnega hidrograma enote z neskončno majhnim trajanjem presežka padavin. Brezdimenzijski hidrogram enote, ki je tretja oblika hidrograma, je hidrogram neposrednega odtoka, katerega ordinate so podane kot razmerje med najvišjim odtokom in katerega časovna os je opredeljena kot razmerje med časom do vrha hidrograma (tj. brezdimenzijski HE z osjo  $q/QP$  v primerjavi  $t/TP$ , kjer je QP stopnja odtoka v času do vrha  $t_p$ ). Preden se lahko uporabi brezdimenzijski HE, ga je potrebno pretvoriti v D-urni hidrogram enote (McCuen in sod., 2002).

Hidrogram enote, ki je oblikovan iz različnih neviht in na istem porečju prikazuje precejšnja odstopanja. Nevihta, ki se pojavi z večjo količino padavin bližje odtoku s porečja, to pomeni čim bolj dolvodno na porečju, ima običajno hidrogram enote vrh prej kot pa je to pričakovati. Enotna nevihta, ki se pojavi na sorazmerno suhem porečju, lahko ima za posledico hidrogram enote z nižjim vrhom kot pa je pričakovano. Daljši čas do pojava vrha hidrograma je potreben zaradi daljšega časa za nadomeščanje začetnih izgub in ta je tudi nižji zaradi primanjkljaja vlažnosti v tleh oz. zemljini. Različne značilnosti neviht ter porečij lahko podajo zelo različne hidrograme enote. Vplivni parametri so podani in opisani v prejšnjem poglavju (Fang in sod., 2005a).

### 4.1 Hidrogram odtoka in pripadajoči parametri

Hidrogram enote lahko določimo iz meritev, v kolikor so na razpolago potrebni podatki in sicer hietogram padavin in hidrogram odtoka za enega ali več padavinskih dogodkov.





Slika 6: Graf hidrograma odtoka s hietogramom padavin in pripadajočimi parametri  
(Fang in sod., 2005a)

Slika 6 prikazuje pomembne komponente hidrograma odtoka, ki so:

- naraščanje grafa,
- vrh grafa,
- padanje hidrograma,
- bazni odtok.

ter časovne parametre:

- čas koncentracije  $T_c$  (*»ang. time of concentration«*),
- čas zakasnitve  $T_p$  (*»ang. time to peak«*) oz.  $T_L$  (*»ang. lag time«*).

Naraščajoči del hidrograma; znan tudi kot krivulja koncentracije, predstavlja povečanje odtoka, ki nastane zaradi postopnega skladiščenja v kanalskem toku in preko zajetja na površini. Velike začetne infiltracijske izgube, ki nastanejo v začetnem obdobju padavin povzročajo, da se odtok povečuje počasi na začetku dogajanja. Ko se nevihta nadaljuje, vse več padavin odteče po površinah iz oddaljenih delov porečja in dosežejo bazni odtok. S časom je namreč dosežena maksimalna možna infiltracija padavin. Ko je ta dosežena, se pojavi površinski odtok. Hkrati pa se infiltracijske izgube prav tako zmanjšajo s časom. Tako se na podlagi enotne nevihte nad porečjem, odtok hitro povečuje s časom.

Vrh hidrograma je eden od najbolj pomembnih delov hidrograma, saj predstavlja maksimalni pretok. Vrh hidrograma predstavlja največjo koncentracijo površinskega odtoka in se ponavadi pojavi kmalu po tem, ko so se padavine končale.

Padajoči del hidrograma je del, kjer odtok pada in se razteza od prevojne točke na koncu viška hidrograma do začetka naravnega toka podzemne vode. Predstavlja umik vode, ki se je skladiščila na porečju v prejšnjih fazah hidrograma. Začetna točka padajočega dela hidrograma, to je prevojna točka, predstavlja maksimalen del skladiščenja vode na porečju. Oblika tega dela hidrograma ni tako zelo odvisna od značilnosti neviht oz. padavin ampak je veliko bolj odvisna od značilnosti porečja.

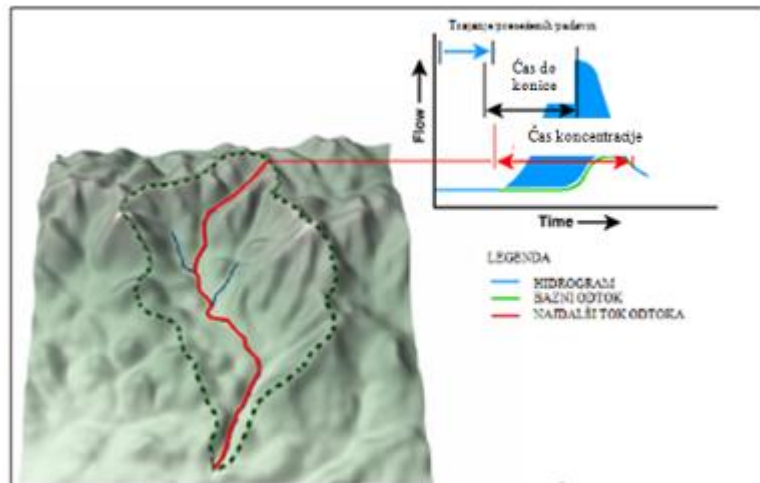
Bazni odtok je del toka v kanalu porečja, ki je obstajal tudi že pred pojavom padavin. Skupen hidrogram odtoka je sestavljen iz dveh delov: neposredni hidrogram površinskega odtoka in bazni odtok. Efektivne padavine ali presežek padavin je del padavin, ki ostanejo po vseh padavinskih izgubah, kot so prestrezanje, infiltracija, izhlapevanje in drugi. Neposredni hidrogram odtoka je preoblikovanje efektivnih padavin, ki prehajajo skozi razvodnico. Bazni odtok je del padavin, ki pronica skozi tla, dokler ta ne doseže podtalnice in sčasoma odteče (Bedient in sod., 2008).

#### **4.2 Časovni parametri povezani s hidrogramom**

*Čas zakasnitve (ang. lag time)  $T_p$*  porečja, je čas med težiščem histograma efektivnih (preseženih) padavin in težiščem hidrograma. Čeprav se neposredni odtok začne z začetkom efektivnih padavin, največji delež odtoka splošno zaostaja za padavinami, saj je potreben čas za pojav odtoka, ki potuje iz katere koli lokacije na porečju, do iztoka s porečja. Čas zakasnitve se pogosto uporablja za številne hidrološke študije in aplikacije. Veliko definicij se uporablja za razvoj različnih hidroloških postopkov.

*Čas koncentracije  $T_c$*  je čas, ki je potreben, da do iztočnega profila priteče voda iz najbolj oddaljene točke porečja. Krajši čas koncentracije imamo na porečjih z večjim padcem terena. Pri dolgotrajnih enakomernih padavinah doseže odtok maksimum, ko je trajanje padavin enako času koncentracije. Čas koncentracije je na hidrogramu prikazan kot čas med koncem trajanja efektivnih padavin in koncem trajanja površinskega dela odtoka na padajočem delu hidrograma.

Slika 7 prikazuje čas koncentracije, ki se začne ob koncu efektivnih padavin in traja vse do takrat, ko površinski tok dejansko zopet postane bazni odtok. Prav tako je prikazan zadrževalni čas, ki pa traja od težišča pojava efektivnih padavin pa do pojava maksimalnega odtoka s porečja (do težišča vrha hidrograma)

Slika 7: Čas koncentracije in čas zakasnitve ( The COMET<sup>®</sup> Program, 2005)

## 5 DOLOČANJE HIDROGRAMA ENOTE IZ MERITEV

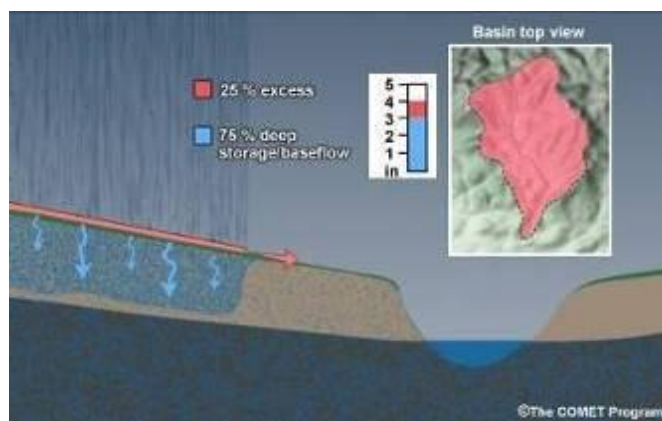
Vloga teorije hidrograma enote v procesu napovedovanja poplav je zagotoviti oceno površinskega odtoka zaradi določenih padavin.

Ko vemo, koliko dežja je padlo ali koliko snega se je stalilo oz. je verjetno, da ga bo padlo oz. se ga bo stalilo, lahko predvidevamo, koliko od teh padavin se bo spremenilo v odtok. Vendar pa nas še vedno zanima, kako bo časovno ta odtok vplival na pretok vodotoka. Hidrogram enote nam zagotavlja način za to oceno.

Zanima nas, koliko padavin, ki padejo na obravnavano porečje, se dejansko spremeni v površinski odtok. Modeli padavinskega odtoka praviloma podajajo oceno o preseženih padavinah. Glede na določeno količino padavin, nam hidrogram enote omogoča izračun pretoka v določenem časovnem obdobju.

Del padavin, ki pade na porečje, se ali infiltrira v tla in se dolgoročno skladišči v podtalju ali prispeva k baznemu odtoku ali pa k površinskemu odtoku. Bazni odtok je del odtoka v vodotoku, ki se glede na različno količino padavin odziva počasi in je prisoten tudi po daljšem obdobju brez padavin. Bazni odtok je tisti del odtoka, ki zadržuje vodo v vodotoku tudi med sušnimi obdobji. Presežek padavin je tisti del padavin, ki ne izhlapijo in se ne infiltrirajo, ampak površinsko odtečejo, ker se te zaradi maksimalne infiltracije ne morejo več skladiščiti. Imenujemo jih tudi učinkovite padavine.

Slika 8 prikazuje primer nastanka preseženih padavin ter dela padavin, ki se infiltrirajo v podtalnico. Primer podaja delež padavin, ki se infiltrirajo (75 %) in presežni del padavin (25%), ki padejo na površje in zaradi dosežene maksimalne infiltracije površinsko odtečejo.



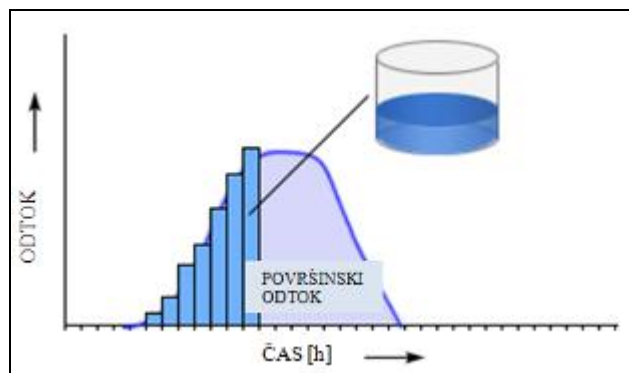
Slika 8: Presežene padavine na povodju (The COMET® Program, 2005)

Določanje hidrograma enote na podlagi merjenih podatkov padavin in odtoka je dokaj enostavno. Na hidrogramu merjenega odtoka, kot je prikazan na sliki 7, moramo najprej določiti delež površinskega in baznega odtoka. Potem pa lahko s pomočjo podanih enačb izračunamo in določimo graf trajanja preseženih padavin. V nadaljevanju je natančno predstavljen potek določitve hidrograma enote na podlagi merjenih podatkov padavin in odtoka.

### 5.1 Primer določanja hidrograma enote iz meritev

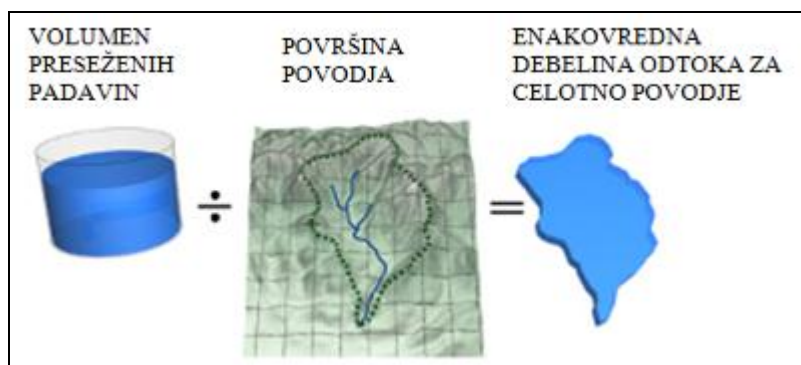
Trajanje učinkovitih padavin je čas, ki je potreben, da se ustvarijo presežene padavine. Te se nanašajo na časovni odziv toka na hidrogramu. Hidrogram enote je poimenovan glede na čas trajanja učinkovitih padavin. V nadaljevanju je slikovno ter tudi tekstualno prikazan in opisan potek določanja površinskega odtoka, ki je potreben za določanje hidrograma enote. Opisan je primer določanja 6-urnega hidrograma enote, ki je tisti hidrogram, ki kaže 6 urni vpliv presežka padavin.

Če imamo merjen hidrogram odtoka, je najprej potrebno določiti delež baznega odtoka ter delež površinskega odtoka. Izločanje baznega odtoka je možno izvesti na več načinov. Najenostavnejši je način z metodo vodoravne premice. Celoten volumen površinskega odtoka pa izračunamo tako, da izračunamo površino prikazanega hidrograma (seštejemo ordinate površinskega odtoka za vsak časovni korak, npr. za vsako uro kot prikazuje slika 9).



Slika 9: Izračun volumna odtoka (The COMET<sup>®</sup> Program, 2005)

Ko imamo ocenjen volumen površinskega odtoka za porečje, moramo izračunati povprečno debelino vodne plasti celotnega povodja.

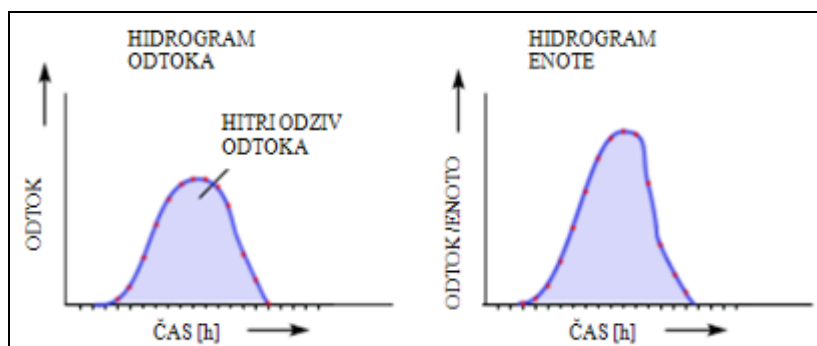


Slika 10: Slikovna ponazoritev izračuna povprečnih preseženih padavin  
(The COMET<sup>®</sup> Program, 2005)

$$\frac{\text{Volumen površinskega odtoka}}{\text{Površina povodja}} = \text{Povprečna debelina vodne plasti} \quad (4)$$

To matematično izračunamo z deljenjem prostornine površinskega odtoka s površino pripadajočega povodja, kot nakazuje zgornja enačba (4).

Spodnja slika 11 prikazuje prilagajanje hidrograma odtoka za ponazoritev 1 enote preseženih padavin.



Slika 11: Graf odtoka in graf hidrograma enote (The COMET<sup>®</sup> Program, 2005)

Višina preseženih padavin, ki jo dobimo po formuli ni najbolj točna, tako kot zahteva teorija hidrograma enote, zato moramo dobljeni rezultat prilagoditi odtočnemu odzivu hidrograma, da dobimo točen odziv.

$$\frac{\text{hidrogram enote}}{\text{presežene padavine}} = \text{prilagoditveni faktor} \quad (5)$$

Uskladitev lahko preprosto ugotovimo z deljenjem hidrograma enote s preseženimi padavinami. Nato uporabimo spodnji prilagoditveni faktor za pretvorbo točk iz hidrograma na hidrogram enote.

$$\frac{1 \text{ cm}}{0.75 \text{ cm}} = 1,33 \quad (6)$$

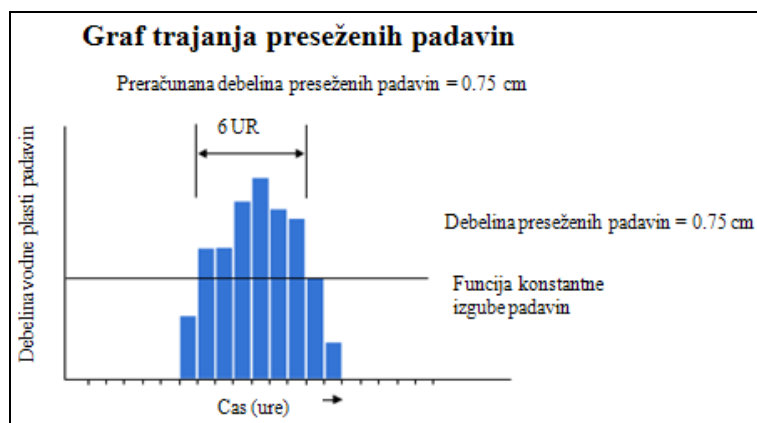
Na primer; naša merjena debelina vodne plasti hidrograma enote znaša 1 cm. Izračunali smo, da je debelina vodne plasti presežka padavin 0.75 cm. To nam poda vrednost prilagoditvenega faktorja 1.33, ki ga lahko uporabljamo za izračun posamezne točke na hidrogramu.

Ko vsako točko na hidrogramu pomnožimo z našim prilagoditvenim faktorjem 1.33, posledično naš hidrogram enote izhaja iz natanko 1 cm presežka padavin.

Hidrogram odtoka ima na Y ordinati predstavljen pretok ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), hidrogram enote pa pretok na enoto padavin, na primer, na cm.

Trajanje hidrograma enote se sklicuje na neprekinjeno časovno obdobje v katerem je prišlo do ene enote presežka padavin. Če je potrebno 6 ur za eno enoto presežka padavin, imamo 6-urni hidrogram enote. Ne pozabimo pa, da se trajanje hidrograma enote ne nanaša na trajanje odziva vodotoka.

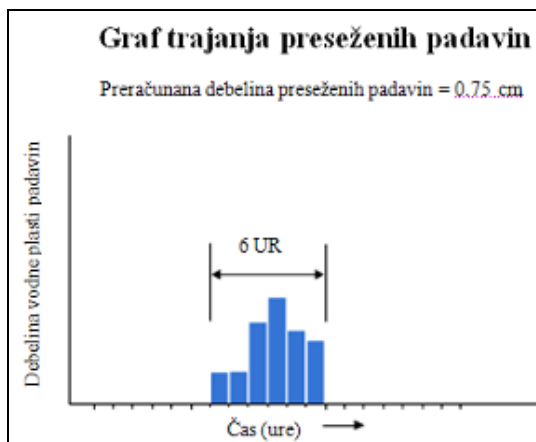
Težji del določanja hidrograma enote je določanje deleža od celotne količine padavin, ki dejansko prispeva k presežku padavin.



Slika 12: Graf trajanja preseženih padavin skupaj z baznim odtokom  
(The COMET<sup>®</sup> Program, 2005)

Voda, ki se infiltrira v tla in se skladišči kot bazni odtok, ni del presežka padavin, ampak t.i. del padavinskih izgub. Tudi za določanje padavinskih izgub obstaja veliko fizikalnih in empiričnih modelov, ki temeljijo predvsem na teoriji infiltracije. Eden najenostavnejših modelov je model konstantnih izgub. Izračunali smo že debelino vodne plasti presežka padavin, ki je v našem primeru znašal 0.75 cm. Sedaj potrebujemo še podatek, koliko časa je bilo potrebno, da je prišlo do presežka padavin. Funkcijo konstantnih izgub padavin premaknemo tako, da je količina padavin nad črto enaka izračunani debelini vodne plasti presežka padavin za obravnavano porečje.

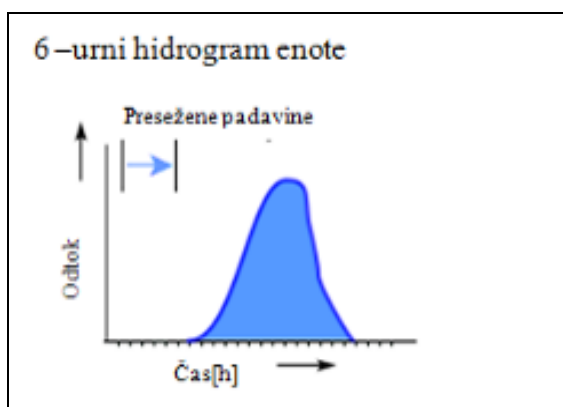
Slika 12 prikazuje padavine, ki se skladiščijo v podtalnici (pod črto) in presežne padavine (nad črto).



Slika 13: Graf trajanja preseženih padavin (The COMET® Program, 2005)

Dobimo histogram presežka padavin, kot je to prikazano na sliki 13. Upoštevamo, da so trajale le 6 ur, v primerjavi s prvotnim 9-urnim histogramom padavin. To pomeni, da je trajanja učinkovitih padavin 6 ur, iz česar izhaja 6-urni hidrogram enote.

Za izračun trajanja hidrograma enote pa predpostavimo, da je do presežka padavin prišlo pravočasno. Dobimo 6-urni hidrogram enote, ki s 6-urnim presežkom padavin ustvari eno enoto debeline vodne plasti (Slika 14).



Slika 14: 6-urni hidrogram enote (The COMET® Program, 2005)



## 6 SINTETIČNI HIDROGRAM ENOTE

Metode sintetičnih hidrogramov enote se uporabljajo pri transformaciji efektivnih padavin v površinski odtok padavin s povodja, ko nimamo na razpolago merjenih podatkov ali pa ti niso dovolj točni, da bi lahko oblikovali hidrogram enote. Sintetične hidrograme oblikujemo na podlagi določenih lastnosti porečja in različnih teoretičnih in empiričnih izhodišč. (Brilly in Šraj, 2006)

Poleg tega pa je bilo znotraj modelov razvitih veliko empiričnih formul za ocenjevanje časovnih parametrov za različna porečja. Te enačbe temeljijo na korelaciji med različnimi porečji in/ali padavinskimi karakteristikami in časovnimi parametri. Druge enačbe se nanašajo na različne parametre časa, ki temeljijo na korelaciji med časovnimi parametri. Omeniti je potrebno, da so bile različne definicije časovnih parametrov že uporabljene v mnogih predhodnih študijah. Uporaba empiričnih enačb zahteva inženirske presoje, in značilnosti porečja, za katerega uporabljamo izbrano enačbo, morajo biti primerljive z značilnostmi območij, na katerih enačbe temeljijo.

Hidrogram enote se izdelava za posamezno podpovodje z enim ali dvema parametroma. Parametri sintetičnega hidrograma enote se ponavadi nanašajo na značilnosti porečja. Zato se hidrogram enote lahko oceni za nemerjena porečja z geomorfologijo tal, pokrovnostjo in rabo tal, itd (Fang in sod., 2005a).

V nadaljevanju so predstavljeni modeli in podmetode (enačbe) sintetičnih hidrogramov enote, ki so na razpolago za modeliranje z modelom HEC-HMS in sicer model Snyder, SCS ter Clark, ostali modeli pa so predstavljeni v seminarski nalogi (Tinta, 2010). Za modela Snyder ter Clark je na razpolago za izračun potrebnih parametrov več podmetod oziroma enačb.

### 6.1 Metoda Snyder

Snyder-jev hidrogram enote je verjetno najbolj razširjen in raziskan postopek za določanje hidrograma enote. Zato obstaja veliko empiričnih enačb za določanje parametrov Snyder-jevega HE.

#### 6.1.1 Snyder-jeva enačba

Na podlagi meritev pretokov in padavin je Snyder določil hidrograme enote, jih parametriziral in parametre povezal z merjenimi vrednostmi. Za čas zakasnitve HE predlaga enačbo (Ramírez):

$$T_p = 0.7516 \cdot Ct(L L_c)^{0.3} \quad (7)$$

- $T_p$  čas zakasnitve [h],  
 $C_t$  koeficient povodja [1.8 – 2.2],  
 $L$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice [km],  
 $L_c$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje centroidu povodja [km].

Parameter  $C_p$  in  $C_t$  nima fizikalne razlage in ju je priporočljivo določiti s kalibracijo v modelu HEC-HMS. Večje vrednosti  $C_p$  so povezane z manjšimi vrednostmi  $C_t$  (Brilly in Šraj, 2006).

$C_t$  je empirični koeficient odvisen od topografije in izhaja iz bližnjega vozlišča povodja. Vrednosti so običajno v območju 1,8-2,2. Viessman in Lewis sta povzela tipične vrednosti  $C_t$  na različnih lokacijah v ZDA (Fang in sod., 2005a).

### 6.1.2 Enačba Bell in Kerr

Predlagala sta kritični zamik kot priročen karakteristični čas, ki je lahko povezan z vsako drugo lastnostjo časa. V večini primerov je kritični zamik primerna vrednost za kritično trajanje padavinskega modela. Ker naj bi bil zamik odvisen predvsem od fizičnih značilnosti porečja, sta Bell in Kar predlagala, da se uporabljajo naslednje spremembe oblike enačbe Kirpich (Fang in sod., 2005a):

$$T_L = \frac{0.693 ML^{0.77}}{S^{0.89}} \quad (8)$$

Kjer je:

- $T_L$  je kritični čas zakasnitve [ure],  
 $L$  je razdalja od iztoka s povodja do najbolj oddaljenega dela povodja vzdolž poti toka [km],  
 $S$  je naklon toka [m/m],  
 $M$  je konstantna glede na vrsto območja poplav [od 1 do  $3.4 \times 10^{-4}$ ].

### 6.1.3 Enačba Tulsa District

Razvita je bila na podlagi poskusov, ki jih je izvedla enota Tulsa District U.S.Army Corps of Engineers v Oklahomi v ZDA in velja predvsem za naravna porečja v podeželskih krajih.

Podala sta naslednjo enačbo za izračun časa zakasnitve za naravna porečja (EMS-I, 2011):

$$T_p = 0.708 \left( \frac{L \cdot L_c}{\sqrt{S}} \right)^{0.39} \quad (9)$$

Kjer je:

- $T_p$  čas zakasnitve [h],  
 $L$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice [km],  
 $L_c$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje centroidu povodja [km],  
 $S$  padec povodja [%].

Priporočljivo je, da se pri računanju s to enačbo upoštevajo naslednje omejitve:

1. površina povodja naj bo med 2.3 in 1300 km<sup>2</sup>;
2. padec povodja naj znaša od 0.8 do 15.5 ‰;
3. dolžina povodja naj bo med 2.2 in 100 km;
4. dolžina toka do centroida povodja pa med 1 in 50 km.

Za urbanizirane površine sta bili razviti dve enačbi. Za urbana naselja s 50 % urbanizacijo velja:

$$T_p = 0.4589 \left( \frac{L \cdot L_c}{\sqrt{S}} \right)^{0.39} \quad (10)$$

Za področja s 100% urbanizacijo pa:

$$T_p = 0.2943 \left( \frac{L \cdot L_c}{\sqrt{S}} \right)^{0.39} \quad (11)$$

Obe enačbi temeljita na 50 % deležu neprepustne površine na urbaniziranih območjih. Pri izdelavi teh enačb so bile ugotovljene tudi hidrološke lastnosti, oziroma meje, v katerih naj bi le-te še ustrezale tovrstnemu izračunu:

1. površina povodja naj bo od 1.2 do 280 km<sup>2</sup>;
2. naklon povodja od 1.95 do 11.9 ‰;
3. dolžina povodja od 2.3 do 41.5 km;
4. dolžina toka do centroida povodja od 1.1 do 16 km.

Omenjeni enačbi nista predvideni za uporabo pri velikih porečjih oz. majhnih porečjih s površinami, manjšimi od 0.8 do 1.3 kvadratnega kilometra.

Tulsa District US A.C.E. je razvil tudi naslednjo enačbo za izračun maksimalnega pretoka:

$$q_p = 4.1515 T_p^{-0.92} [m^3 / s / km^2] \quad (12)$$

Koeficient  $C_p$  pa lahko v tem primeru dobimo iz znane enačbe:

$$C_p = \frac{q_p \cdot T_p}{6.992} \quad (13)$$

#### 6.1.4 Enačba Denver

V Denver Area Urban Drainage in Flood Control District so razvili enačbo za določanje vrednosti časa zakasnitve  $T_p$  (EMS-I, 2011):

$$T_p = 0.6333 \cdot C_t \left( \frac{L \cdot L_c}{\sqrt{S}} \right)^{0.48} \quad (14)$$

- $T_p$  čas zakasnitve od težišča histograma efektivnih padavin do pojava maksimalnih pretokov hidrograma [h],
- $L$  dolžina vodotoka od iztočnega profila do konca roba povodja [km],
- $L_c$  dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km],
- $S$  ocenjen vzdolžni padec celotnega vodotoka [m/m],
- $C_t$  koeficient refleksijskega časa pojava maksimalnega pretoka [-].

Vrednosti  $C_t$ , ki se uporabljajo v metodi Colorado Urban Hydrograph, so odvisne od odstotka neprepustne površine  $I$  in jih določamo s spodnjimi enačbami:

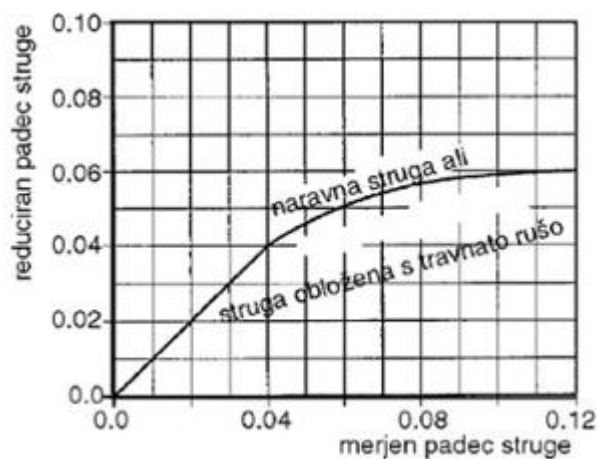
$$C_t = -0.00371 \cdot I + 0.163 \quad 0 \leq I \leq 10 \quad (15)$$

$$C_t = -0.000023 \cdot I^2 + 0.00224 \cdot I + 0.146 \quad 10 \leq I \leq 40 \quad (16)$$

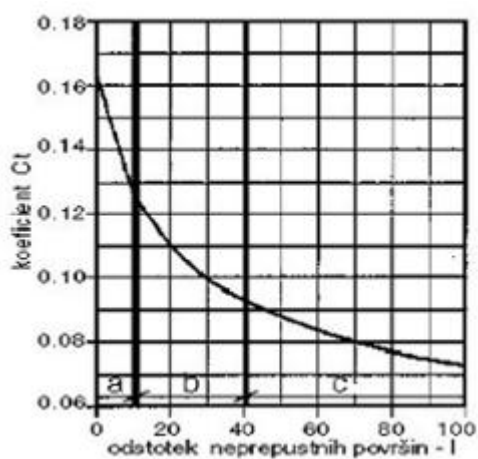
$$C_t = -0.0000033 \cdot I^2 + 0.000801 \cdot I + 0.120 \quad 40 \leq I \leq 100 \quad (17)$$

Za naravne kanale ali kanale obložene s travnato rušo, ki imajo enakomeren padec, je priporočljivo, da izvedemo korekcijo uporabljenega naklona povodja. Odnos med izmerjenimi in predlaganimi nakloni je razviden iz diagrama na sliki 15 (Brilly in Šraj, 2006).

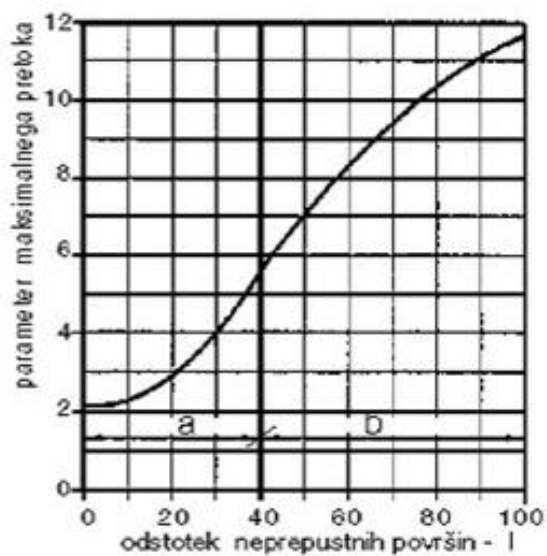
Lastnosti povodij, za katere veljajo enačbe, se gibljejo s površino povodja od 0.39 do 7.98 km<sup>2</sup> in za nagib povodja od 0.005 do 0.037 m/m.



Slika 15: Soodvisnost med merjenimi in priporočenimi nagibi povodja  
(Brilly in Šraj, 2006: str.60)



Slika 16: Določanje koeficienta Ct na podlagi odstotka neprepustnih površin I  
(Brilly in Šraj, 2006: str.60)



Slika 17: Določanje parametra P s pomočjo odstotka neprepustne površine  
(Brilly in Šraj, 2006: str.60)

Za izračun koeficienta  $C_p$  po obravnavani metodi uporabimo naslednji pomožni koeficient  $P$ , določen je v odvisnosti od odstotka neprepustne površine  $I$  (EMS-I, 2011) (Slika 17):

$$P = 0.002450 \cdot I^2 - 0.0120 \cdot I + 2.16 \quad 0 \leq I \leq 40 \quad (18)$$

$$P = -0.00091 \cdot I^2 - 0.228 \cdot I + 2.06 \quad 40 \leq I \leq 100 \quad (19)$$

S pomočjo koeficientov  $P$  in  $C_t$ , izračunanih na osnovi predhodnih enačb (enačbe 15 - 17), lahko določimo koeficient maksimalnega pretoka  $C_p$ :

$$C_p = 0.867 \cdot P \cdot C_t \cdot A^{0.15} \quad (20)$$

Pri čemer je:

- $C_t$  koeficient refleksijskega časa pojava maksimalnega pretoka,
- $P$  parameter nastopa konice hidrograma,
- $A$  površina povodja [ $\text{km}^2$ ].

### 6.1.5 Enačba Rao in Delleur

Povzela sta različne opredelitve za čas zakasnitve. Prav tako so povzete različne enačbe za povprečne časovne zamike, ki so odvisni od fiziografskih značilnosti porečja. Rao in Delleur sta sklenila, da povprečne vrednosti časovnega zamika ni mogoče uporabiti za napovedovanje odtoka, saj je odvisna od različnih fiziografskih značilnosti. Razvila sta tri nove enačbe iz regresijske analize. Vsaka naslednja enačba vsebuje najpomembnejše pojasnjevalne spremenljivke (Fang in sod., 2005a):

$$T_p = 0.414 A^{0.496} L^{0.073} S^{-0.075} (1 + U)^{-1.289} \quad (21)$$

$$T_p = 0.407 A^{0.542} S^{-0.081} (1 + U)^{-1.210} \quad (22)$$

$$T_p = 0.493 A^{0.512} (1 + U)^{-1.433} \quad (23)$$

Kjer je:

- $A$  površina povodja [ $\text{km}^2$ ],
- $L$  dolžina toka [km],
- $S$  naklon [%],
- $U$  faktor urbanizacije.

Ugotovljeno je bilo, da je čas zakasnitve odvisen od dveh značilnostih nevihte in sicer presežka padavin in trajanja padavin, zato sta podala še dve enačbi, ki vsebujeta meteorološke značilnosti ter fiziografske značilnosti (Fang in sod., 2005a):

$$T_p = 1.275 A^{0.458} (1 + U)^{-1.66} P_E^{0.267} T_R^{0.371} \quad (24)$$

$$T_p = 277.97 A^{0.943} (1 + U)^{-4.303} P_E^{-2.114} T_R^{0.238} \quad (25)$$

$P_E$  presežek padavin v [mm],

$T_R$  trajanje padavin [ur].

Ugotovila sta, da čas zakasnitve ni lastnost porečja, saj se razlikuje od nevihte do nevihte.

### 6.1.6 Enačba Simas in Hawkins

Razvila sta regresijsko enačbo za čas zakasnitve iz več kot 3100 padavinskih dogodkov in odtoka z 168 manjših povodjih in sicer velikosti od 0.003-34.9 km<sup>2</sup>, v Združenih državah Amerike (Simas in Hawkins, 2002 cit po Fang,2005a). Podala sta enačbo:

$$T_L = \frac{1.016 \cdot W^{0.594} \cdot S_{nat}^{0.313}}{S^{0.150}} \quad (26)$$

pri čemer je:

$W$  širina porečja [km],

$S$  naklon [m/m]; razmerje med največjo razliko v višini in najdaljšo dolžino poti pretoka,

$S_{nat}$  koeficient skladiščenja [mm], ki se uporablja v metodi »Curve Number (CN)«.

Čas zakasnitve je opredeljen kot razlika med osrednjo točko efektivnih padavin in osrednja točka neposrednega odtoka.

### 6.1.7 Enačba Wu

Povezal je parametre hidrograma, in sicer: čas do vrha hidrograma s površino povodja, povprečno dolžino toka in povprečni nagib glavnega toka (Wu, 1963 cit. po Fang in sod., 2005a). Predlagal je naslednjo regresijsko enačbo:

$$T_p = \frac{20.12 A^{1.085}}{L^{1.233} S^{0.668}} \quad (27)$$

Kjer je:

- $T_p$  je čas do vrha [ure],  
 $A$  površina povodja [ $\text{km}^2$ ],  
 $L$  povprečna dolžina [km],  
 $S$  povprečni nagib glavnega toka ( $S \times 10^{-4}$ ).

### 6.1.8 Enačba Espey in Drugi

Uporabili so regresijsko analizo podatkov iz 24 mestnih in 11 podeželskih povodji, ki so jih uporabili za izpeljevanje enačbe za določitev časa vzpona na hidrogramu, za določitev vpliva urbanizacije (Espey in sod., 1966 cit. Po Fang in sod., 2005a).

Za podeželske razmere s podatki iz Teksasa, Nova Mehika in Oklahoma, je regresijska enačba podana kot:

$$T_R = 3.056L^{0.12}S^{-0.52} \quad (28)$$

Prav tako so predstavljeni v enačbi  $T_R$  kot funkcija  $L / s$ :

$$T_R = 1.9(L/\sqrt{S})^{0.36} \quad (29)$$

Za mestna porečja, z neprepustnimi površinami, se je regresijska enačba enaka (Fang in sod., 2005a):

$$T_R = 29.36 \phi L^{0.29} S^{-0.11} I^{-0.61} \quad (30)$$

Kjer je:

- $T_R$  čas od začetka učinkovitih padavin do pojava konice na hidrogramu enote [min],  
 $L$  dolžina glavnega kanala [km],  
 $S$  glavni kanal pobočju [m/m],  
 $\Phi$  faktor 0.6 za urbana in industrijska področja.  
- 0.8 za odvodnjo v cestne kanale in kanalizirane površine  
- 1.0 za naravne razmere

Omejitve pri uporabi teh enačb imajo naslednje vrednosti (Brilly in Šraj, 2006):

Za podeželje:

- $L_f$  od 0.99 do 16.7 km,
- $S_f$  od 0.008 do 0.015 m/m,
- $T_r$  od 30 do 150 min,



- A od 0.347 do 18.156 km<sup>2</sup>.

Za urbana območja:

- $L_f$  od 0.061 do 54.8 km,
- $S_f$  od 0.0064 do 0.0104 m/m,
- I od 25 do 40 %,
- $T_r$  od 30 do 720 min,
- A od 0.0332 do 238.28 km<sup>2</sup>.

Upoštevati moramo, da čas naraščanja hidrograma  $T_r$  ni enak času zakasnitve  $T_p$ . Razlika med obema je v tem, da je  $T_r$  definiran kot čas od pričetka učinkovitih padavin do pojava konice na hidrogramu enote, medtem ko je  $T_p$  definiran kot čas od težišča učinkovitih padavin do pojava konice na hidrogramu. Espey podaja tudi enačbe za določanje konic hidrograma (Brilly in Šraj, 2006):

Za podeželje:

$$q_p = 20.835 A^{-0.12} T_r^{-0.30} \quad (31)$$

Za urbana območja:

$$q_p = 229.881 A^{-0.09} T_r^{-0.94} \quad (32)$$

Kjer so:

$q_p$  maksimalni pretok hidrograma enote [m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>],

A površina povodja [km<sup>2</sup>],

$T_r$  čas od začetka učinkovitih padavin do pojava maksimalnega pretoka [min].

Omejitve pri uporabi teh dveh enačb so (Brilly in Šraj, 2006):

Za podeželje:

- A od 0.35 do 18.16 km<sup>2</sup>,
- $T_r$  od 30 do 150 min.

Za urbana območja:

- A od 0.033 do 23.83 km<sup>2</sup>,
- $T_r$  od 30 min do 720 min.

### 6.1.9 Enačba Riverside Country

Metodo so razvili v Riverside County Food Control in Water Conservation District v Kaliforniji. Za izračun časa zakasnitve s porečja je bila izpeljana enačba, veljavna za podeželska območja Riverside v Kaliforniji. Ta enačba se zelo malo razlikuje od enačbe Tulsa District. Tu je čas zakasnitve definiran kot čas od začetka padavin do točke na enotnem hidrogramu, ki se ujema s polovico celotnega volumna odtoka. Enačba velja za porečja katerih površina meri med 6 in 1670 km<sup>2</sup> (Brilly in Šraj, 2006).

$$T_p = 0.5077 \cdot C \cdot \left( \frac{L \cdot L_{ca}}{\sqrt{S}} \right)^{0.38} \quad (33)$$

Kjer je:

$T_p$  čas zakasnitve [h], čas od začetka padavin do točke na enotnem hidrogram, ki se ujema s polovico celotnega volumna odtoka.

C koeficient, ki je odvisen od strmine terena:

C = 1.2 za strm teren;

C = 0.72 za srednje strm teren;

C = 0.38 za ravninski teren,

L dolžina povodja [km],

$L_c$  dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km],

S nagib povodja [m/m]

### 6.1.10 Enačba Colorado State University

Na državni univerzi v Koloradu je bila leta 1974 razvita metoda, ki vključuje vpliv prepustnosti tal povodja. Enačba je uporabna za povodja, ki imajo vsaj 10% neprepustne površine:

$$C_t = \frac{7.8}{I^{0.78}} \quad (34)$$

Kjer je:

I odstotek neprepustne površine povodja [%],

$C_t$  koeficient, ki določa topografske lastnosti povodja.

Koeficient  $C_t$  uporabimo v Snyderjevi enačbi za določitev časa zakasnitve:

$$T_p = 0.7516 \cdot C_t \cdot (L \cdot L_c)^{0.3} \quad (35)$$

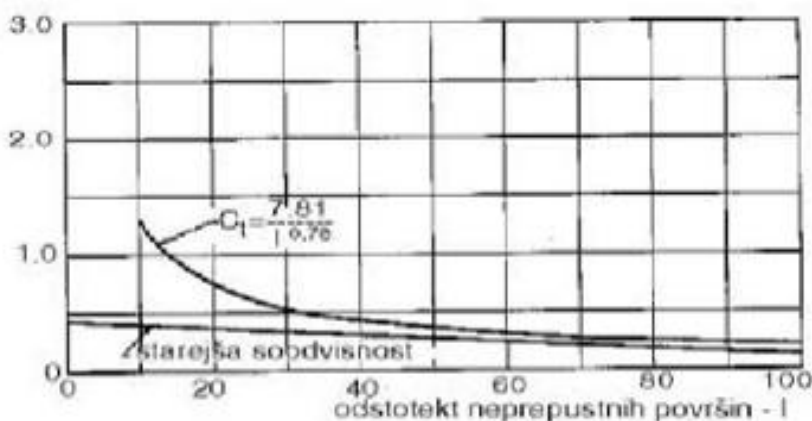
Kjer je:

$T_p$  čas zakasnitve [h],

$L$  dolžina povodja [km],

$L_c$  dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km],

$C_t$  koeficient, ki določa topografske lastnosti povodja.



Slika 18: Diagram določanja koeficienta  $C_t$

(Brilly in Šraj, 2006: str.66)

### 6.1.11 Enačba Putman

Enačbo za čas zakasnitve za urbana območja je Putman izdelal leta 1972. Enačba (Brilly in Šraj, 2009) je bila preverjena na vodotokih okraja Wichita v Kansasu, poizkuse pa je izvajal v U.S.Geological Survey.

$$T_p = 0.2548 \cdot \sqrt{\frac{L}{\sqrt{S}}} \cdot I^{-0.57} \quad (36)$$

Kjer je:

$T_p$  čas zakasnitve [h],

$L$  dolžina vodotoka [km],

$S$  nagib vodotoka [‰],

$I$  delež neprepustne površine [-].

Enačba velja za naslednje pogoje:

- za površine od 0.77 do 388.5 km<sup>2</sup>,
- za  $[L/\sqrt{S}]$  od 370 do 33278,
- za neprepustne površine od 0 do 0.3.

## 6.2 Metoda SCS

Parameter SCS hidrograma enote je čas zakasnitve. Čas zakasnitve pri SCS metodi je po definiciji enak kot pri Snyderjevi metodi. Tako lahko vrednosti časa zakasnitve povzamemo po že prikazanih postopkih (Brilly in Šraj, 2006). Za čas zakasnitve povodja je SCS podal še eno enačbo:

$$t_{pov} = L^{0.8} \frac{(S_r + 25.4)^{0.7}}{28.14 \cdot \sqrt{S}} \quad (37)$$

Kjer je:

$T_p$  Čas od težišča histograma efektivnih padavin do vrha enotnega hidrograma [h],

$L$  hidravlična dolžina povodja [km],

$S_r$  maksimalna retenzija povodja [mm],

$S$  naklon povodja [%].

Vrednost retenzije  $S_r$  se računa neposredno na osnovi koeficienta CN (curve number):

$$S_r = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} [mm] \quad (38)$$

Preglednica 1: Koeficienti CN za urbanizirane površine (Brilly in Šraj, 2006: str. 97)

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 <sup>2</sup>	65	77	85	90	92
povprečna velikost parcele 1000 m <sup>2</sup>	38	61	75	83	87
povprečna velikost parcele do 1300 m <sup>2</sup>	30	57	72	81	86
povprečna velikost parcele do 2000 m <sup>2</sup>	25	54	70	80	85
povprečna velikost parcele do 4000 m <sup>2</sup>	20	51	68	79	84
povprečna velikost parcele do 8000 m <sup>2</sup>	12	46	65	77	82

Preglednica 2: Koeficient CN za obdelana kmetijska zemljišča (Brilly in Šraj, 2006: str. 98)

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 <sup>1</sup>	76	85	90	93
	dobri <sup>2</sup>	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 3: Koeficient CN za ostala kmetijska zemljišča (Brilly in Šraj, 2006: str. 99)

Raba tal	Hidrol. pogoji	Vrednosti CN glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
Pašnik, prerija	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

### 6.3 Metoda Clark

Metoda Clark opredeljuje hidrogram enote za določeno območje z uporabo pojma trenutnega hidrograma enote (v nadaljevanju IUH). IUH je teoretični hidrogram, ki bi nastal, če bi bila ena enota dodatnega dežja enakomerna razporejena čez celotno območje in bi nato lahko odtekla s povodja. IUH se lahko pretvori v hidrogram enote z želenim trajanjem s konvencionalnimi načini za razvoj hidrogramov enote (Knox County, 2010).

Metoda Clark temelji na učinkih prevajanja in slabljenja pretoka vode skozi porečja kot primarna sila. Prevajanje je opredeljeno kot dolvodni tok vode zaradi sile težnosti. Slabljenje pa je opredeljeno kot upor pretoka, ki ga povzroča bodisi trenje v strugi ali skladiščenje vode. Po Clark-u lahko prevajanje na porečju opišemo s krivuljo čas-površina. Ta krivulja prikazuje odvisnost deleža območja porečja, ki prispeva k odtoku v odvisnosti od časa. Krivulja se začne v točki, kjer se začnejo učinkovite padavine. Učinkovite padavine so padavine, ki se ne infiltrirajo v tla in se ne skladiščijo na območju porečja (Knox County, 2010). Enačba predstavlja opisane pojme.

$$S = R \cdot O \quad (39)$$

- S      skladiščenje  
R      konstanta linearnega rezervoarja  
O      odtok

Sintetični hidrogrami se lahko izdelajo s sorazmernim usmerjanjem 1 mm neposrednega odtoka v kanal v skladu s krivuljo časovnega območja. Novejše študije so pokazale, da ni potrebno pripraviti natančne krivulje čas-površina za izdelavo natančnih sintetičnih hidrogramov. Brezrazsežna krivulja čas-površina, vključena v HEC-1 in HEC-HMS hidroloških modelih (ki ga je razvila United States Army Corps of Engineers) omogoča določitev natančnih sintetičnih hidrogramov. Da bi lahko uporabili metodo Clark v HEC-1 ali HEC-HMS modelu, so potrebni podatki o času koncentracije ( $T_c$ ) in konstanta skladiščenja padavin ( $R$ ). Raziskave so pokazale, da enačba 40, kar ustreza pogoju  $R = T_c$ , in podaja natančne ocene maksimalnega odtoka za manjša območja. Vendar morajo inženirji, ki izdelujejo poplavne študije določiti najustreznejšo enačbo za določitev vrednosti  $R$  (Knox County, 2010).

$$\frac{R}{t_c + R} = 0.5 \quad (40)$$

Kjer je:

$R$  konstanta linearnega rezervoarja

$T_c$  čas koncentracije

Clarkova metoda zahteva pri določanju hidrograma enote izračun treh parametrov oz. odvisnosti:

- $T_c$  (čas koncentracije),
- $R$  (akumulacijski koeficient) ter
- krivulja čas-površina.

Krivulja čas-površina, izražena v brezdimenzijski obliki, določa, kolikšen odstotek celotne površine prispeva k iztoku vode s porečja v določenem času (od časa  $t = 0$  do  $t = T_c$ ).

Za izračun časa koncentracije  $T_c$  po metodi Clark obstaja veliko emperičnih enačb, ki se med seboj razlikujejo glede na dolžino in vrsto odtoka. Nekatere enačbe nam podajo čas koncentracije le za površinski tok za prvih 100m. To velja predvsem za enačbe, ki so bile razvite na zelo majhnih porečjih. Druge enačbe računajo čas koncentracije za površinski tok zmanjšan za 100m ter tretja vrsta enačb, ki upošteva čas koncentracije toka po strugi. Predstavljeni sta tudi enačbi, ki upoštevatata čas koncentracije za celotnen odtok, tako površinski kot tok po strugi.



### 6.3.1 Enačba za določitev časa koncentracije površinskega toka

#### 6.3.1.1 Kerby-jeva enačba

Razširil je študijo Hathaway's za oblikovanje dranažnih objektov in razvil naslednji enačbi za izračun časa koncentracije na zelo majhnih povodjih, v katerih prevladujejo površinski tok (Kerby, 1959 cit po Fang in sod., 2005a):

$$T_c = 0.024 \left( \frac{n \cdot L}{\sqrt{S}} \right)^{0.467} \quad (41)$$

Kjer so:

- $T_c$  čas koncentracije površinskega toka povodja [h]  
 $S$  nagib povodja [m/m]  
 $n$  koeficient hrapavosti povodja  
 $L$  dolžina površinskega toka [m]

Kerbyjeva enačba je priporočljiva za izračun na razdaljah, ki ne presegajo od 100 do 150 metrov. Priporočila za uporabo koeficientov hrapavosti površine zemljišča so podana v preglednici 4.

Preglednica 4: Koeficient hrapavosti površine zemljišča  $n$  (Brilly in Šraj, 2006)

Vrsta pokritosti tal	Koeficient N
Cestišče	0,02
Gladka neporaščena gosta zemljina	0,10
slabo raščena trava, vzgojene kulture	0,20
Normalno raščena trava	0,40
Površine listopadnim rastjem	0,60
Površine z iglavci in listavci z globokim gozdom in gosto travo	0,80

Dolžina, ki se uporablja v enačbi, je linearna razdalja, merjena od najbolj oddaljene točke porečja v smeri vzporedno z naklonom do dobro določenega kanala.

(Fang in sod., 2005a)

#### 6.3.1.2 Kirpich-ova enačba

Kirpich je leta 1940 razvil enačbo za izračun časa koncentracije površinskega toka na majhnih agrikulturnih povodjih. Njegova enačba je izpeljana na osnovi raziskav mnogih merjenih hidrogramov. Ugotovil je, da je čas koncentracije površinskega toka enak času, ki ustreza naraščanju vode v vodotoku od najnižje do najvišje gladine (Fang in sod., 2006):

$$T_c = \frac{0.066 \cdot L^{0.77}}{S^{0.585}} \quad (42)$$

Kjer je:

- $T_c$  čas koncentracije površinskega toka povodja [h]  
 $L$  dolžina površinskega toka [km]  
 $S$  naklon površine [m/m]

Uporaba Kirpichove enačbe je priporočljiva v omenjeni obliki za površinske tokove na neporaščeni površini. Za travnate površine je treba  $T_c$  pomnožiti z 2, za betonske in asfaltne površine pa s 4. Kirpichova enačba je prav tako uporabna za vodotoke v odprtih kanalih.

Nekoliko prilagojene vrednosti se priporočajo za povodja v ZDA zahodno od 105 stopinj ali planinska območja oziroma z gozdom pokrite površine. Popravni faktorji so podani v preglednici 5.

Preglednica 5: Priporočene vrednosti  $T_c$  za planinska območja (Brilly in Šraj, 2006; Fang in sod., 2005a)

Številka SCS krivulje	80	70	60	50
Popravljen vrednost $T_c'$	1.0 $T_c$	1.4 $T_c$	1.8 $T_c$	2.2 $T_c$

### 6.3.2 Enačbe za določitev časa koncentracije površinskega toka

#### 6.3.2.1 SCS TR-55 enačba

Podana je bila naslednja enačba za določanje plitvih koncentriranih tokov (Knox County, 2010):

$$v = 4.981 \cdot \sqrt{S} \quad \text{Natlakovane površine} \quad (43)$$

$$v = 6.196 \cdot \sqrt{S} \quad \text{Tlakovane površine} \quad (44)$$

Kjer sta:

- $v$  hitrost toka [m/s],  
 $S$  nagib terena [m/m].

S hitrostmi, določenimi na osnovi omenjenih enačb, lahko izračunamo čas potovanja z enačbo (Green in sod., 2002):

$$T_t = \frac{L}{3600 \cdot v} \quad (45)$$

Kjer je:

- $T_t$  površinski čas potovanja [h],  
 $L$  razdalja površinskega toka [m],  
 $v$  hitrost površinskega toka [m/s].

### 6.3.2.2 Carter-jeva enačba

Carter je umeril enačbo za napovedovanje časa koncentracije za porečja, ki imajo naravno ali delno kanalizirano strugo (Carter, 1961 cit. po Fang in sod, 2005a).

$$T_c = 45.63 \left( \frac{L_m}{\sqrt{S_m}} \right)^{0.6} \quad (46)$$

Kjer je:

- $T_c$  čas koncentracije [min]  
 $L_m$  dolžina kanala [km]  
 $S_m$  naklon [‰]

Podatki, ki so bili uporabljeni za kalibracijo enačbe vključujejo porečja z manj kot 8 kvadratnimi kilometri površine, z dolžino struge, ki je krajša od 11 kilometrov. Naklon povodja je manjši od 2 odstotkov. Manningov koeficient za strugo se nahaja med 0,013 in 0,025. Vhodni parametri odražajo lastnosti vodotoka, koeficienti odražajo znatno količino cevne pretoka, ker so porečja v urbanih območjih (Fang in sod, 2005a).

### 6.3.2.3 Enačba Zvezna uprava za letalstvo

Uprava (Federal Aviation Administration, 1970 cit. po Fang, 2005a) je razvila naslednje enačbe iz podatka o drenažnem vzletišču:

$$T_c = 1.42(1.1 - C)L^{0.5}S^{-0.333} \quad (47)$$

kjer je:

- $C$  koeficient odtoka,  
 $L$  je dolžina toka [km],  
 $S$  je naklon [m/m],  
 $T_c$  je čas koncentracije [min]

Koeficient odtoka  $C$  je odvisen od vrste pokritosti porečja ter od drugih hidroloških dejavnikov. Koeficient se nanaša na oceno maksimalnega odtoka z največ 100% odtokom. Vrednosti  $C$  so podane v naslednji preglednici 6. Če porečje zajema različne vrste pokritosti, se koeficient izračuna po naslednji enačbi (Fang in sod., 2005a):

$$C = \frac{\sum(C_x A_x)}{A_{\text{celotni}}} \quad (48)$$

$x$  vrednost posameznega območja s stalno pokrovnost

Preglednica 6: Koeficient odtoka (Basham, 2006)

Vrsta drenažnega območja	Koeficient odtoka $C$
<b>Poslovno območje:</b>	
Središče mesta	0.70 - 0.95
Soseska	0.50 - 0.70
<b>Stanovanjska četrt:</b>	
Enodružinska območja	0.30 - 0.50
Samostojna	0.40 - 0.60
Vrstna	0.60 - 0.75
Predmestje	0.25 - 0.40
Apartmajsko območje	0.50 - 0.70
<b>Industrijsko območje:</b>	
Lahka	0.50 - 0.80
Težka	0.60 - 0.90
Parki	0.10 - 0.25
Igrišča	0.20 - 0.40
Območje železniških prog	0.20 - 0.40
Slabše razvita območja	0.10 - 0.30
<b>Travnate površine:</b>	
Peščena tla, ravna (2%)	0.05 - 0.10
Peščena tla, povprečna (2-7%)	0.10 - 0.15
Peščena tla, strma (7%)	0.15 - 0.20
Gosta zemljina, ravna (2%)	0.13 - 0.17
Gosta zemljina, povprečna (2-7%)	0.18 - 0.22
Gosta zemljina, strma (7%)	0.25 - 0.35
<b>Ulice:</b>	
Asfaltirane	0.70 - 0.95
Betonske	0.80 - 0.95
Tlakovane	0.70 - 0.85
Pločniki in ceste	0.75 - 0.85
Strehe	0.75 - 0.95

To najbolj velja za mala porečja, kjer prevladujejo ploskovni tok in tok po kopnem.

### 6.3.3 Enačbe za določitev časa koncentracije toka po strugi

#### 6.3.3.1 Enačba Van Sickle

Van Sickle je določil enačbo za čas do najvišje točke hidrograma, ki jo je umeril na Houstonova porečja s površino z manjšo kot 93 km<sup>2</sup> (Van Sickle, 1962 cit. po Fang in sod., 2005a). Enačba temelji na dveh spremenljivkah dolžin:

- $L_t$  (km) je skupna dolžina vseh dreniranih poti večje od 0.9 metra v premeru, medtem ko drugi,
- $L_m$  (km) je skupna dolžina porečja. Enačba odraža tako kanalski tok in tok v cevi, zato je to "mešana" metoda.

Enačba 80 vključuje faktor za pretvorbo časa do najvišje točke hidrograma v enačbo za napoved časa koncentracije:

$$T_c = 0.49(L_t L_m / \sqrt{S_f})^{0.13} \quad (49)$$

Kjer sta:

$S_f$       naklon povodja [m/m],

$T_c$       čas koncentracije [min].

#### 6.3.3.2 Ramser-jeva enačba

Enačbo za določanje časa koncentracije v umetnih kanalih je izpeljal Ramser (Ramser, 1927 cit. po Singh, 1984). Ta enačba določa čas koncentracije v odvisnosti od dolžine struge in povprečnega vzdolžnega padca:

$$T_c = 0.01997 \cdot L_k^{0.77} \cdot S_k^{-0.385} \quad (50)$$

Kjer so:

$T_c$       čas koncentracije [min]

$L_k$       dolžina struge [m]

$S_k$       povprečni nagib kanala [m/m]

Za tok v betonskih kanalih množimo  $T_c$  z 0.2 (po Kirpichu, 1942)

Enačba ne velja za porečja manjša od 5 km<sup>2</sup>, ker na tako majhnih porečjih prevladuje površinski tok. Ramserjevo enačbo pa lahko za izračun kombiniranega površinskega toka in toka v strugi za manjša porečja kombiniramo s Kerby-jevo enačbo:

$$T_c = 0.01997 \cdot L_k^{0.77} \cdot S_k^{-0.385} + 0.024 \left( \frac{n \cdot L}{\sqrt{S}} \right)^{0.467} \quad (51)$$

Celoten čas koncentracije izračunamo kot vsoto časov potovanja po površini povodja, v plitvem koncentriranem toku in po strugi.

$$T_c = T_v + T_p \quad (52)$$

### 6.3.4 Enačbe za določitev celotnega časa koncentracije $T_c$

#### 6.3.4.1 Metoda Clarkovega akumulacijskega koeficienta povodja $R$

Akumulacijski koeficienta povodja  $R$  ima ponavadi na enem geografskem območju konstanten odnos glede na čas koncentracije. Tako je npr. za celoten obalni del Teksasa Fort Bend  $R=3 \cdot T_c$ . Ponavadi je razmerje  $R/T_c$  med 1 in 6 (nižje vrednosti za strma in urbanizirana povodja ter višje vrednosti za ravna in naravna povodja) (Brilly in Šraj, 2006).

Po statičnih analizah padavin in odtoka na izbranih povodjih Teksasa so izpeljali naslednji enačbi (Fort Bend) za določanje parametrov Clarkovega hidrograma enote:

$$T_c = 19.22 \cdot \frac{\left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.57}}{S^{0.11} \cdot 10^I} \cdot (\log S + \log 5.28) \quad (53)$$

$$R = 50.58 \cdot \frac{\left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.57}}{S^{0.11} \cdot 10^I} \cdot (\log S + \log 5.28) - T_c \quad (54)$$

Kjer so:

- $T_c$  Clarkov čas koncentracije [h],
- $R$  Clarkov akumulacijski koeficient [h],
- $L$  Dolžine najdaljše vodne poti povodja [km],
- $S$  povprečni naklon vodne poti [%],
- $I$  delež neprepustne površine [-].

Meje hidroloških lastnosti, za katere veljajo omenjene enačbe:

- površina A: od 0,34 do 1060 km<sup>2</sup>,
- dolžina L: od 1 do 84 km,
- dolžina do težišča: od 0,4 do 43 km,
- naklon: od 0,38 do 6,25 ‰.

#### 6.3.4.2 Enačba Melching and Marquardt

Melching in Marquardt (Straub in sod., 2000) sta parametra  $T_c$  in  $R$  določila na poiskusih 66 neviht z debelino efektivnih padavin večjo od 10mm. Parametra sta določila na 9 povodjih površine med 0,15 do 95km<sup>2</sup>, naklonom med 3,13 in 55,3 ‰ in dolžino vodotoka 0,5 do 27km. Podatki 11 neviht na 8 povodjih so bili uporabljeni za preverjanje enačbe Melching and Marquardt. Pomembni parametri, ki vplivajo na določanje parametrov  $T_c$  in  $R$  so odstotek neprepustnih površin, naklon glavne struge in debelina efektivnih padavin. Enačbi za ocenjevanje parametrov  $T_c$  in  $R$  z glavno karakteristiko povodja tj. površino sta podani z naslednjima enačbama:

$$T_c = 1,81 \cdot A^{0,577} (I + 1)^{-1,146} D^{0,781} \quad (55)$$

$$R = 84,86 \cdot A^{0,390} (I + 1)^{-0,722} D^{-0,303} \quad (56)$$

Enačbi za ocenjevanje parametrov  $T_c$  in  $R$  z glavno karakteristiko povodja tj. dolžina glavne struge pa sta podala z naslednjima enačbama:

$$T_c = 4,64 \cdot L^{0,868} (I + 1)^{-1,563} D^{0,780} \quad (57)$$

$$R = 56,52 \cdot L^{0,759} (I + 1)^{-0,994} \quad (58)$$

- I je odstotek neprepustnih površin [%];  
 A površina povodja [km<sup>2</sup>]  
 D debelina efektivnih padavin [mm]  
 L dolžina vodotoka od iztoka do razvodnice [km]  
 S naklon vodotoka določen z razliko višin dveh točk, ki predstavljata 10 in 85% razdalje vzdolž struge iztoka razvodnice [‰]

## 7 NARAVNOGEOGRAFSKE ZNAČILNOSTI POREČJA TREBUŠČICE

### 7.1 Geografske značilnosti

Ozemlje Trebuše zaznamuje stičišče treh rek: Idrijce, Trebušice in Hotenje, ki se vključujejo v porečje reke Idrijce. Na bregovih rek so še danes vidne rečne terase, ki ležijo več deset metrov nad današnjo strugo. Na širšem območju jih je opaznih trinajst, nastale pa so zaradi spreminjanja pretoka rek v ledenih dobah. Zaradi stalnega delovanja voda in omenjene geološke zgradbe je za celotno območje značilen normalen rečni relief v obliki črke V. Površinsko tekoče vode, ki pritečejo s hribovitega in planotastega sosledstva, so v preteklosti ustvarile ozke, ponekod celo vintgarske soteske. S pobočij pogosto hrumijo krajši potoki, ki s svojim hudourniškim značajem intenzivno poglobljajo svoje struge in vplivajo tudi na razvoj in obliko večjih dolin. Reke so v lastne nasutine vrezale svojo strugo. Dolinama Trebušice in Hotenje pravijo domačini "grape", saj sta dolini v resnici tako ozki, da po njih razen vode ni mogoče speljati nič drugega. Ravnega sveta je nekoliko le na najmlajših akumulacijah nastalih v sotočju rek, to je pred izlivom Hotenje v Trebušico oz. le-te v Idrijco. Večina teras pod strmimi pobočji hribovja in planot (naklonine so tudi od 38° do 48°) v nekoliko širši dolini Idrijce je poseljena, vendar ozke doline in okoliške planote nudijo le malo možnosti za skromno kmetovanje. Zlasti velja to za dolino Trebušice, ki je mestoma globoko vrezana v dinarski kraški svet Banjšic in se na nekaterih mestih tako zoži, da tvori lepa korita. Človek si ni prilagajal naravnih oblik le pri cestnih povezavah, predvsem si je najprej poskusil ustvariti možnosti, da bi, v za kmetijstvo skoraj nemogočih pogojih, pridobil prostor za njivo ali vsaj vrt. Danes so večinoma te antropogene reliefne oblike zapuščene in prekrite z grmovjem ali gozdom. Ne le človek, tudi "težka" živina je prispevala k spreminjanju površja zlasti na nastanek grbinastih travnikov. Zaradi mehke sedimentne osnove in plitke prsti je tako površje težko urediti za košnjo (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).

Trebuščica in Hotenja so ugnezdene v območje Trnovskega gozda in Banjšic. Robovi teh planot se, kot hribovje zahodnega predalpskega sveta, dvigajo nad ozke in strme doline. Dolini Trebušice in Hotenje ločuje sleme, ki poteka od Janovega vrha (420 m), Čarjevega vrha (705 m), Gabrovega brda (1048 m), Stržnikarjevega vrha (1023 m) do Hudournika (1148 m). Sleme Skopica (863 m), Vojnačevbrdo (637 m), Male Vrše (888 m), Velike Vrše (909 m), preval Drnulk (761 m) Kobilica (929 m), Stador (1030 m) pa ločuje dolino Trebušice in Čepovansko dolino. Zgornja dolina Trebušice je vrezana med Vojskarsko planoto na vzhodu in strmim robom Trnovske planote in Čepovanskega dola na zahodu kjer se dvigujejo izraziti Stanov rob (1191m), Češevik (1349 m), trizobi Poldanovec (1299 m), Andrejev vrh, Zeleni rob, Jelenji vrh, Škrbina, Usadni rob in Bukov vrh (1314 m). Na severni strani se nad iztokom Trebuščice v reko Idrijco dviguje med 600 in 700 m visoka Šentviška (Šentviškogorska) planota. Celotno porečje Trebuščice je prikazano na sliki 19 (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).





Slika 19 : Porečje Trebušice (ARSO, 2007)

### 7.1.1 Tektonika

Po dolini Idrijce poteka od Mosta na Soči navzgor t. i. idrijski prelom, tektonska prelomnica v smeri severozahod-jugovzhod, to je v dinarski smeri. Ta prelomna cona se začne že v območju Žage v Soški dolini, teče po spodnji dolini Idrijce do Trebuše, kjer se od Idrijske doline usmeri po dolini Hotenje in preko Oblakovega vrha v dolino Kanomlje. To prelomno cono na obeh straneh spremljajo številni manj izraziti prelomi, ki dajejo svojevrsten pečat celotni pokrajini. Zlasti v dolini Hotenje poteka prečno na glavnega več manjših pokritih prelomov (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).

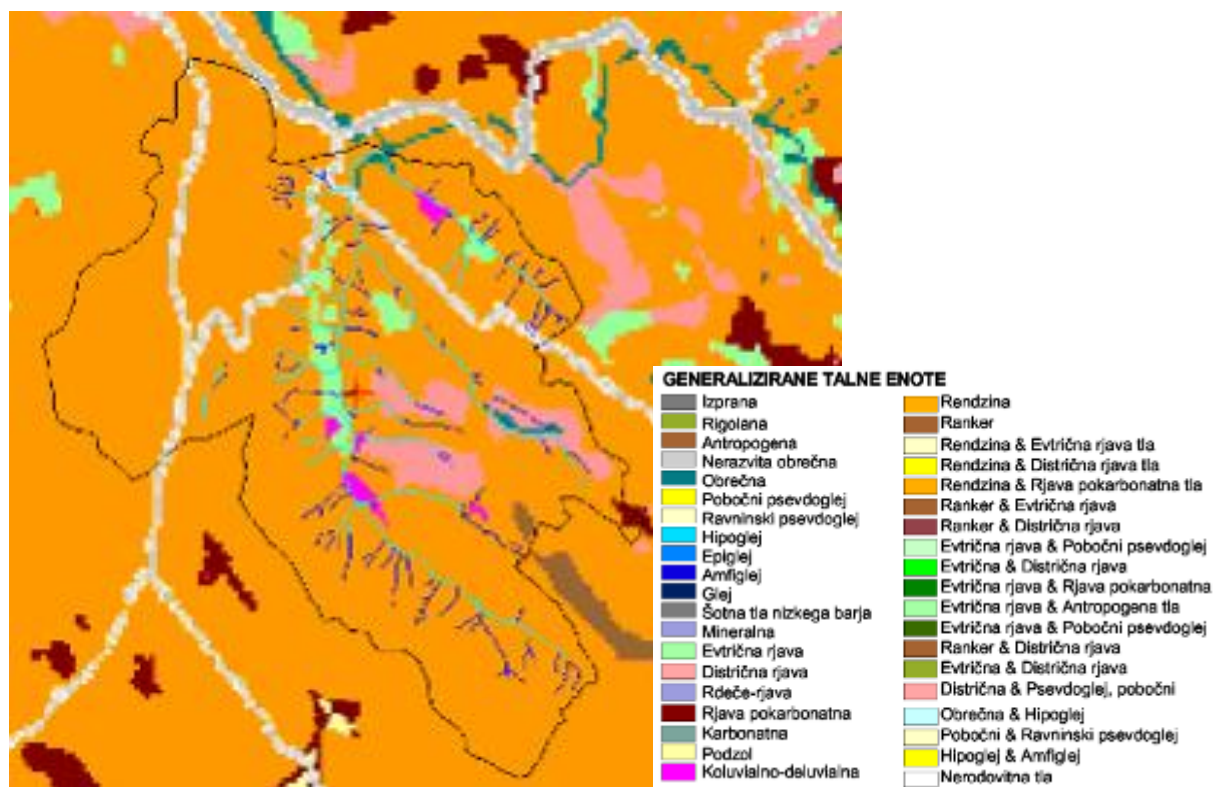
### 7.1.2 Geološka zgradba

Območje Trebuše, Hotenje in srednje Idrijce sestavljajo predvsem kamnine iz obdobja triasa. Območje na obeh straneh Idrijce, od izliva Trebušice približno dva kilometra v smeri proti Stopniku, sestavlja skladovit dachsteinski apnenec s plastmi in vložki triasnega dolomita. Temu sledi pas skladovitega

masivnega dolomita iz istega obdobja, ki v območju Stopnika preide v masivni debelozrnati dolomit. Vsi trije segajo preko Plešarskega vrha do idrijskega preloma. Pred gostilno v Stopniku sega v to zgradbo s severnih pobočij levega brega Idrijce jezik tufa, tufita ploščatega apnenca in konglomerata (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007). Levi breg Hotenje po kateri teče tudi idrijska prelomnica, sestavlja pas skladovitega in masivnega dolomita. Pod njim se v dolini pojavita lapornati apnenec in lapor, ki sega preko Oblakovega vrha na kanomeljsko stran. Geološka podlaga doline Trebušice so masivni debelozrnati dolomiti in apnenci, ki se menjavajo s skrilavci, peščenjaki in laporji predvsem v pobočju levega brega Trebušice. V srednjem delu pa se je pokazala izpod mezozojskih plasti skladovitega apnenca vododržna osnova permskih ter karbonskih skrilavcev in peščenjakov. Reke in rečice so prerezale apneniško mezozojsko odejo, dosegle vododržno podlago v kateri tečejo še danes. Tekoče vode so povzročile, da se je nekdanja enotna velika planota razkosala v več manjših, ozkih, srednje dolgih planot, z znatno nadmorsko višino, potekajočih od Idrije proti severozahodu spodnje Idrijce. Kamninsko zgradbo ozemlja dna dolin Trebuše zaznamuje torej pester razvoj sedimentnih kamnin, ki ga na nekaterih mestih prebadajo izlivi bazaltne lave in leče tufa. Znotraj teh sedimentnih kamnin lahko opazimo manjše količine črnega premoga, ki pa zaradi ekonomskih razlogov ni zanimiv za izkoriščanje.

### **7.1.3 Pedologija**

Večji del območja Trebuše je pokrit z dolomitno rendzino (Slika 20), ki je zelo plitva, suha, izprana prst, na kateri raste predvsem črni gaber in mali jesen. Rjava, srednje globoka, bolj sveža in rodovitnejša prst je na nekoliko višjih, manj strmih dolomitnih terasah. Te na položnejših pobočjih prekrivajo bukovi gozdovi. Najrodovitnejše so kisle rjave prsti na peščenjakih in skrilavcih. Najrevnejše prsti - plitve apnenčaste in dolomitne rendzine - so pod Stržnikarjem in nad cesto v Gorenjo Trebušo (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).



Slika 20: Pedološka karta s porečjem Trebušice (CPVO, 2011)

Preglednica 7: Tipi tal – Avtomorfna tla (Sovre, 2009: str. 36)

Avtomorfna tla			
Razred	Talni tip	Podtip	Opis
humusno akumulativna tla	rendzina	rendzine na mehkih karbonatnih tleh	Matična podlaga je lapor, fliš, mehki (lapomati) apnenci, lapomata sivica ali jezerska kreda. Rendzine na mehkih karbonatnih kamninah so zaradi strmega reliefa večinoma pod gozdno in travniško vegetacijo.
		rendzine na trdnih karbonatnih tleh	Matična podlaga je apnenec in dolomit. Je nestabilna talna tvorba in se navadno pojavlja v višjem gorskem svetu ter na strmih pobočjih z nagibi preko 50%. Zaradi plitvosti tal pa tudi zaradi strmega, vrtačastega in skalovitega reliefa so rendzine na apnencu v prvi vrsti gozdna tla. Tudi na dolomitni podlagi je gozd prevladujoča zarast, vendar so dokaj obsežna območja rendzin na dolomitu, ki so zaradi bolj umirjenega reliefa pod travinjem.
kambična tla	evtrična rjava tla	evtrična rjava tla, na miocenskih ilovnatih in kremenovih peskih	Tla se po globini zelo razlikujejo in segajo od 30 do preko 100 cm globine. Evtrična rjava tla so pretežno ilovnate, meljasto-ilovnate ali glinasto-ilovnate teksture, z običajno nekaj povečano količino gline. Evtrična rjava tla predstavljajo najboljša tla v kmetijstvu. Na njih lahko gojimo vse vrste kmetijskih kultur, ki uspevajo v našem klimatskem območju.
		evtrična rjava tla, na mešanih karbonatnih in nekarbonatnih kamninah	
		evtrična rjava tla, na mehkih karbonatnih kamninah (lapomati apnenci)	
		evtrična rjava tla, na mešanih karbonatnih in nekarbonatnih kamninah	
		evtrična rjava tla, na pobočnem grušču	
		evtrična rjava tla, na dolomitu	
	distrična rjava tla	distrična rjava tla, na permo-karbonskih skrilavcih in peščenjakih	To so tla nastala na kislih, nekarbonatnih kamninah, zastopana so zlasti v hribovitem svetu pa tudi v ravnini. Distrična rjava tla navadno variirajo od 60 – 80 cm globine, redkeje več kot 100 cm. Po globini profila je tekstura dokaj izenačena. Glede na teksturo so zemljišča v glavnem dobro propustna za vodo in dobro zračna.
		distrična rjava tla, na miocenskih peskih, peščenjakih in konglomeratih	
antropogena tla	rigolana tla (rigosol)	vinogradniška tla (vitisol), evtrična	Rigosol je tip antropogenih tal pri katerem je pomešanih več horizontov do globine 50 – 70 cm. Rigolana tla so v največji meri zastopana v vinogradniških okoliših, tla pa se navadno rigolajo tudi za plantažne nasade sadnega drevja in jagodičja, globoko prekopana in podrahljana pa so ponekod tudi njivska in vrtna tla.

Preglednica 8: Tipi tal – Hidromorfna tla (Sovre, 2009: str 37)

Hidromorfna tla			
Razred	Talni tip	Podtip	Opis
psevdooglejna tla	psevdooglej	ravninski, evtričen	Psevdoglej predstavlja površinsko oglejena tla. V Sloveniji so psevdogleji nastali predvsem na pleistocenskih in pliocenskih glinah in ilovicah, ki so nekarbonatne in za katere je značilno, da vsebujejo poleg zmerne količine gline (25 - 40%) še veliko melja, ki tla zgoščuje. Prekomerno vlaženje tal povzroča stojna voda, ki se v vlažni fazi zadržuje 30 – 60 cm globoko pod talnim površjem. Zastajanje vode povzročajo zgoščeni in slabo propustni horizonti, ki ovirajo odtok padavinske vode v globino. Glede na relief ločimo pobočne in ravninske psevdogleje.
oglejna tla	hipoglej	evtričen, mineralen	Oglejena tla predstavljajo trajno prekomerno vlaženje pretežno spodnjih horizontov zaradi visoke podtalnice. Tla glejev so se razvila na holocenskih in pleistocenskih nanosih, ki so po večini težje teksturni. V močno vlažnih legah se na površju glejev tvorijo pogosto tudi šotne plasti. Humusni horizont je okoli 20 – 30 cm debel. Po barvi je temno siv ali črn, po konsistenci nekoliko plastičen. Glede na vrsto zamočvirjenja ločimo naslednje 3 talne tipe (hipoglej, epiglej in amfiglej) Hipoglej - oglejevanje povzroča talna voda; stopnja oglejevanja z globino narašča.
nerazvita in slabo razvita obrečna tla	obrečna tla	evtrična, globoka, na ilovnatem aluviju	V razred slabo razvitih tal se uvrščajo talni tipi, ki so se razvili na poplavni holocenski rečni terasi in na jezerskih ali morskih usedlinah. Vlaženje zemljišč poteka na treh nivojih: iz atmosferskih padavin, iz poplavnih vod in iz podtalnice. Humusni horizont je dobro izražen, procesi oglejevanja se pojavljajo le v globljih horizontih. Ne glede na to, da so fluvisoli nerazvita zemljišča, imajo običajno zelo visoko proizvodno sposobnost. Zaradi velike variabilnosti nerazvitih obrečnih tal, se z klasifikacijo težko zajame vse varietete, ki jih srečujemo v naravi. Kljub temu je možno ta tla grupirati, če se za kriterij upoštevajo značilnosti profila do globine 100 – 150 cm.

Pedološko sestavo tal se je določilo s pomočjo pedološke karte porečja Trebuščice (Slika 20) in odtočnega potenciala, ki sem ga povzela po diplomski nalogi (2009) Katje Sovre z naslovom Hidrološka študija visokih voda Bistrice v porečju Sotle. Za vrsto zemljin je avtorica v diplomski nalogi določila odtočni potencial, katere se pojavljajo tudi na porečju Trebuščice. Otočni potencial potrebujemo za določitev koeficienta CN. Koeficient CN je parameter, ki zajema vplive pedologije, rabe tal in predhodne vlažnosti tal.

V preglednici 1 je prikazan odtočni potencial za vsako vrsto zemljine. Glede na površino vrste zemljine, se je določilo prevladujočo skupino zemljine za porečje Trebušice. Na porečju prevladuje rendzina ter pokarbonatna tla.

Preglednica 9: Pedološka sestava tal

Opis	Skupina zemljine	A [m <sup>2</sup> ]	A [km <sup>2</sup> ]
Distrična rjava tla na klastičnih kamninah	B	4701421,09	4,70
Obrečna evtrična tla	B	2472605,13	2,47
Koluialno- deluvialna	A	832095,88	0,83
Obrečna evtrična tla	B	438688,68	0,44
Ranker, evtričen	A	219053,26	0,22
Rendzina na apnencu in dolomitu in rjava pokarboatna tla	A	92595351,8	92,60
Rjava pokarboatna tla na apnencu in dolomitu	B	230784,16	0,23

A 93,65 m<sup>2</sup>

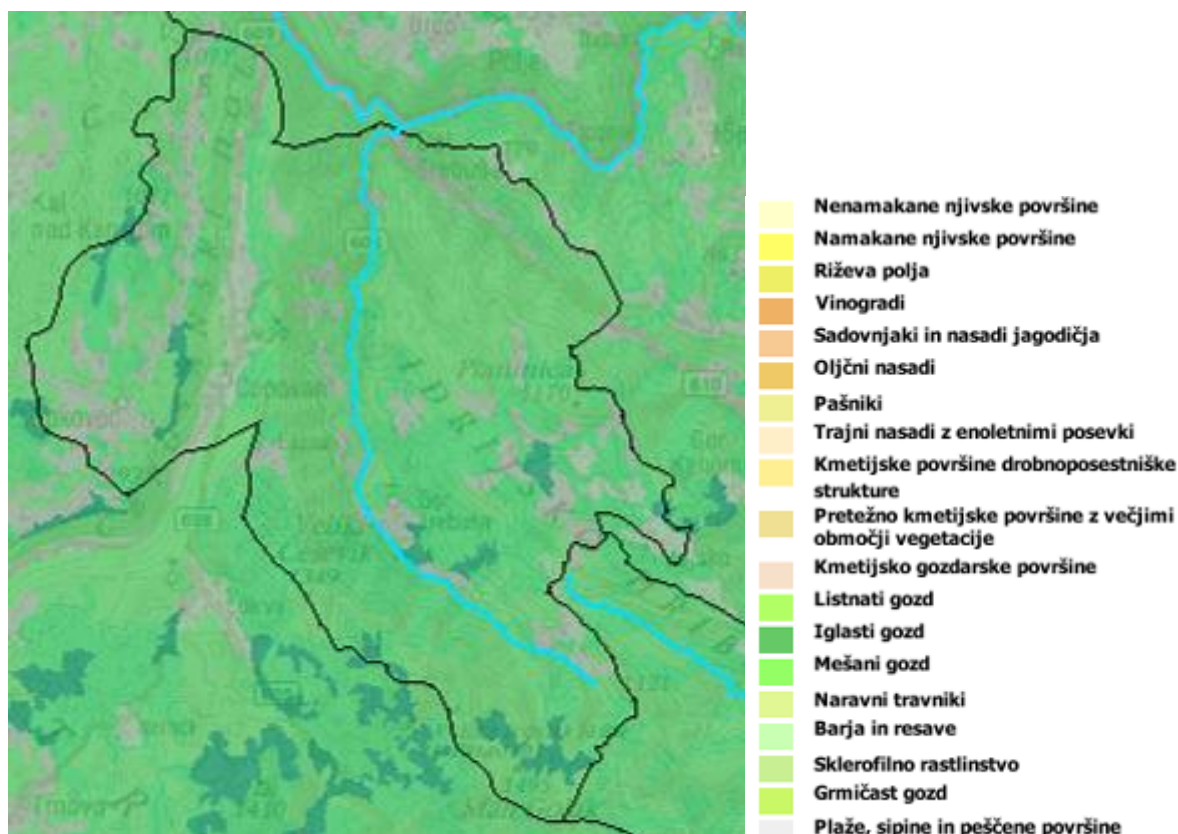
B 7,84 m<sup>2</sup>

}

povzamem da je skupina zemljine A

#### 7.1.4 Pokrovnost tal

Pobočja v dolini Idrijce so poraščena s pretežno mešanimi gozdovi trdih in deloma mehkih listavcev sestojev gabra in bukve. V njih rastejo črni in beli gaber, bukev, lipa, jesen in drugi listavci. Drugi sestoj je bukev s kresničevjem. V njem je približno polovico bukve, ostalo pa črni gaber, mali jesen, javor, nekaj posameznih smrek in borov. Poleg že omenjenih drevesnih vrst se pojavljajo še divja češnja, bela in črna lipa, jelka, rdeči bor, navadni srobot, rdeči dren, navadni glog in trdoleske. Ob hišah rastejo tudi orehi in drugo sadno drevje, predvsem jabolane in hruške. Ugotovimo lahko, da se delež iglavcev zmanjšuje, povečuje pa se delež listavcev (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).



Slika 21: Karta pokrovnosti tal (ARSO, 2007)

Na porečju Trebuščice prevladuje predvsem listnati gozd, ki ga je več kot polovica (Slika 21). Tako za listnatim gozdom, pa prevladuje mešani gozd. Relativno veliko je tudi kmetijskih površin z večjimi območji vegetacije. Kmetijske površine se nahajajo predvsem ob strugah vodotokov, kjer so nastali zaselki. Delež pokrovnosti za porečje Trebuščice prikazuje preglednica 10.

Preglednica 10: Pokrovnost tal na porečju Trebuščice

Opis 1	Opis 2	Opis 3	A [km <sup>2</sup> ]	%
Gozdne in deloma ohranjene naravne površine	Gozdovi	Listnati gozd	64,96	64,01
Gozdne in deloma ohranjene naravne površine	Gozdovi	Mešani gozd	18,18	17,91
Gozdne in deloma ohranjene naravne površine	Gozdovi	Iglasti gozd	2,98	2,94
Kmetijske površine	Pašniki	Pašniki	3,57	3,52
Kmetijske površine	Mešane kmetijske površine	Pretežno kmetijske površine z večjimi območji vegetacije	11,8	11,63

## 8 HIDROLOŠKA SLIKA POREČJA

### 8.1 Hidrografija

Reka Trebuščica, ki je največji pritok Idrijce, je dolga 16,16 km. Dolžina vseh njenih pritokov pa je 90,05 km. Celotno porečje Trebušice meri 101,49 km. Izvira pod Bukovim vrhom, na nadmorski višini 1125 m, in se izliva v Idrijco na višini 183 m. Struga je v večjem delu toka ozka in zajedena v sotesko, nad katero je 200 do 800 m strmih in prepadnih sten. Zaradi velikega in neenakomernega strmca teče voda v skočnikih in brzicah ter zastaja v velikih, globokih tolmunih. Trebuščica ima hudourniški odtočni režim, saj se ob velikih nalivih v strugi zbere ogromna količina vode, ki pa ob prenehanju dežja kmalu upade (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).

Največji desni pritok Trebušice je Hotenja, ki izvira pod Oblakovim vrhom, na nadmorski višini 728 m, in se izliva v Trebušico v Dolenji Trebuši, na nadmorski višini 189m. Dolina Hotenje se je izoblikovala ob močnem idrijskem prelomu v dinarski smeri severovzhod-jugovzhod. Spada med tipične manjše vodotoke predalpskega hribovja in je zelo dobro ohranjen kljub večji poseljenosti v dolini. Odlikuje se po slikovitem toku, čisti vodi in bogati favni (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).

### 8.2 Hidrografske karakteristike porečja

Hidrografske karakteristike porečja predstavljajo površina porečja v km<sup>2</sup>, povprečni padec terena v %, dolžina vodotoka v km ter povprečni padec vodotoka v %. Površina porečja predstavlja površino, ki jo obdaja orografska razvodnica do hidrološkega profila. Povprečni padec terena predstavlja padec terena merjen pravokotno na vodotok, medtem ko povprečni padec vodotoka predstavlja padec premice, ki veže začetek in konec odseka vodotoka tako, da je površina trikotnika, ki ga tvorita premica in horizontala enaka površini med podolžnim profilom in horizontalo. Dolžina vodotoka pa pomeni dolžino vodotoka od razvodnice do hidrološkega profila (Sovre, 2009).

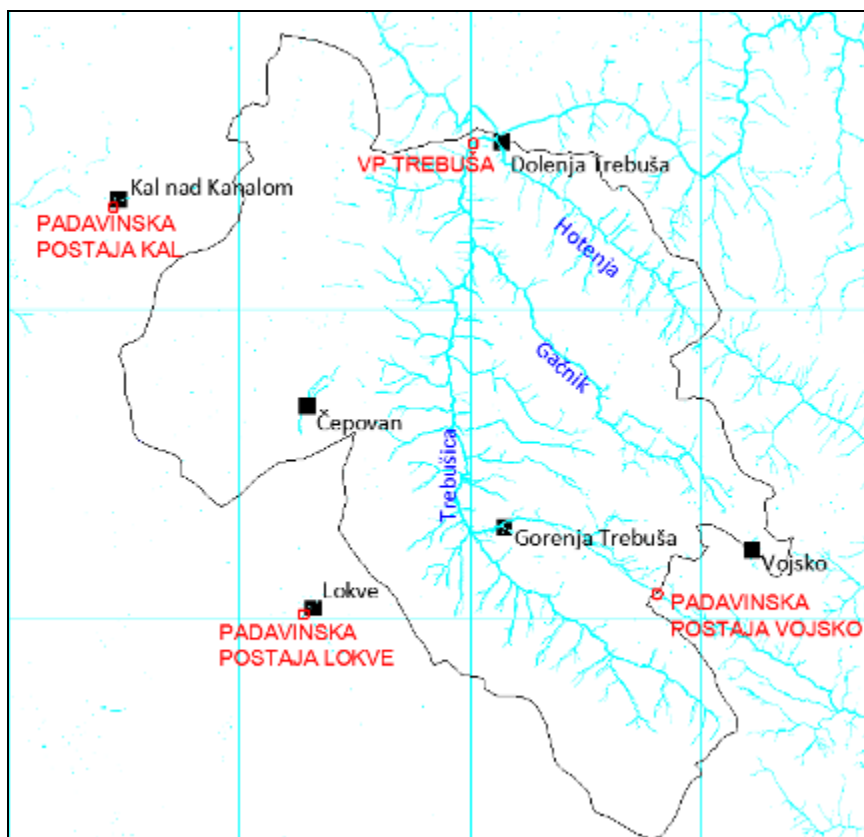
Velikost vodozbirnega območja porečja Trebušice se je določilo na podlagi spletne aplikacije Atlas okolja. Velikost je določena na osnovi mreže hidrografskih razvodnic, ki je osnovana na izohipsah. Izohipse so črte, ki povezujejo točke z enako nadmorsko višino. Celotno porečje Trebušice sem vzela kot en hidrološki profil. Velikost prispevne površine porečja znaša 101,49 km<sup>2</sup> (Slika 22). Celotno prispevno območje porečja Trebušice je prikazano na spodnji sliki 22. Prikazani so še večji kraji ter vodomerna in padavinska postaja. Izračunani povprečni padec terena znaša 29,7%, saj prevladuje zelo strm teren. Struga Trebušice je v zgornjem delu precej soteskasta. Struga Trebušice, ki izvira pod Oblakovim vrhom na nadmorski višini 1125 m, in se izliva v Idrijco na višini 183 m,



meri v dolžini 16,16km. Padec struge od izvira do izliva pa znaša 3,8%. Karakteristike so za lažji pregled podane tudi v preglednici 11.

Preglednica 11: Karakteristike porečja Trebušnice

Površina porečja	101,49 km <sup>2</sup>
Dolžina struge	16,16 km
Naklon struge	3,8%
Naklon porečja	29,7%



Slika 22: Prispevno območje Trebušnice s padavinskimi in vodomernimi postajami

### 8.3 Pretočne karakteristike reke Trebušnice

Rečni pretočni režim opisuje povprečno sezonsko gibanje pretoka reke, na katerega najbolj vpliva odvisnost pretoka od padavin, temperature tal in drugih podnebnih dejavnikov. Zavedati se moramo tudi vpliva drugih fizičnogeografskih dejavnikov, zlasti reliefa, rastlinstva ter človeka. Pretočni režim je torej rezultat geografskih značilnosti porečja in podnebne dinamike. Ugotovimo lahko, da je glavna sila pri spremembah pretočnih režimov podnebje (in njegova spremenljivost), kajti reliefu kot drugemu najpomembnejšemu dejavniku režima lahko pripišemo vlogo konstante. V zmerno toplem

pasu ima največji vpliv na pretočni režim temperature, katere odvisnost uvršča pretočni režim med hidrološko nevihtne indikatorje klimatskih sprememb (Frantar, 2005).

Za merjenje pretokov Trebuščice je postavljena ena vodomerna postaja. Vodomerna postaja dnevno beleži pretoke in se nahaja tik nad vtokom Hotenje v Trebušico (GKX: 5410105 GKY: 5106265), na nadmorski višini 186,23 in deluje že od leta 1954.

Na sliki 23 je prikazana mreža vodomernih postaj. Vodomerna postaja Dolenja Trebuša (Slika 24) je opremljena z limnigrafom, torej je beleženje pretokov avtomatsko.



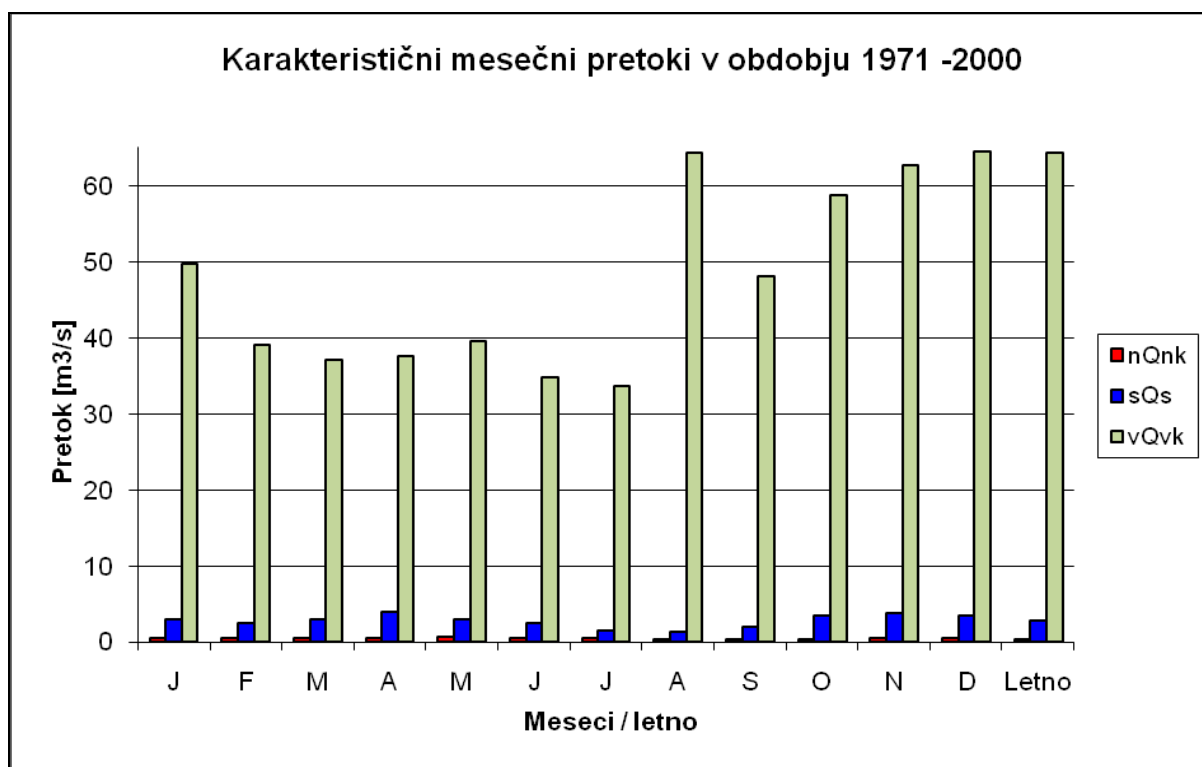
Slika 23: Mreža vodomernih postaj l.1997 (MOP ARSO, 1998)



Slika 24: Vodomerna postaja Dolenja Trebuša

Na spodnjem grafu (Slika 25) so predstavljeni karakteristični pretoki Trebuščice. Pretoki so merjeni na vodomerni postaji Dolenja Trebuša. Na sliki so predstavljeni najmanjši mali, srednji in največji veliki pretoki v obdobju med letoma 1971 in 2000. Iz grafa lahko razberemo, da so največji veliki pretoki

nižji v poletnih mesecih, medtem ko so nizki in srednji pretoki povišani v pomladnih in jesenskih mesecih. Iz sledečega lahko ugotovimo, da za porečje Trebušnice velja dežno-snežni rečni režim. Osnovne poteze dežno-snežnega režima so v primarnem višku, ki običajno nastopi aprila, lahko pa v marcu ali celo v maju. Sekundarni višek je vedno v novembru, ki mu sledi december. Primarni nižek nastopi poleti, običajno avgusta, redkeje septembra. Sekundarni nižek je pozimi, ne traja dolgo in je večji od poletnega.



Slika 25: Karakteristični pretoki Trebušnice v obdobju 1971-2000

#### 8.4 Podnebje in padavine

Podnebje v porečju Trebušnice je tako kot v večjem delu zgornjega posočja prehodno gorsko s pridihom sredozemskih značilnosti. Kaže se izrazit prehod med značilnostmi submediteranskega in celinskega tipa podnebja. Po dolini Soče in Idrijce prihajajo z zahoda dokaj tople in vlažne zračne gmote, ki prinašajo tudi večino padavin. Blažilni vpliv morja je čutiti predvsem v podaljšani jeseni in v kratkih zimah. Nizke temperature zraka oz. ostrejša zime z občasnimi snežnimi padavinami pa kažejo na vpliv celinskega oz. gorskega podnebja (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).

Na splošno lahko povemo, da je jesen nekoliko toplejša od pomladi, kar kaže na vpliv submediteranskega tipa podnebja. Trebuša leži namreč na stičišču dolin, ki so nekoliko bolj zaprte vplivu morja. Poleg tega pa po dolini Idrijce navzdol segajo z vzhoda tudi vplivi celinskega podnebja. To je zlasti čutiti po večji vetrovnosti doline. Hladnejši zrak se, zlasti spomladi in jeseni, spušča z

Idrijsko-Cerkljanskega hribovja in ustvarja občutek večjega mraza (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).

Na območju porečja Trebuše letno pade več kot 2000 mm padavin in je tako eno najbolj namočenih območji v Sloveniji. Razporeditev preko leta je povsod dokaj enakomerna, saj mesečna vrednost ne pade pod 120 mm (Krajevna skupnost Gorenja Trebuša, 2007).

### 8.5 Padavinske postaje na porečju Trebuščice

Na samem območju porečja Trebuščice se nahaja samo ena vodomerna postaja, ki beleži urne pretoke. Padavinskih postaj, ki bi beležile podatke na samem porečju Trebuščice ni. Padavinske postaje, ki sem jih uporabila za primerjavo padlih količin ter analizo, se nahajajo v bližnji okolici porečja in sicer na Lokvah in Kalu nad Kanalom. Klimatološko postajo pa imamo na Vojskem. V spodnji preglednici 12 so prikazane padavinske postaje s pripadajočimi podatki; nadmorska višina postaje, tip postaje, lokacija (koordinate) postaje ter obdobje izvajanja meritev.

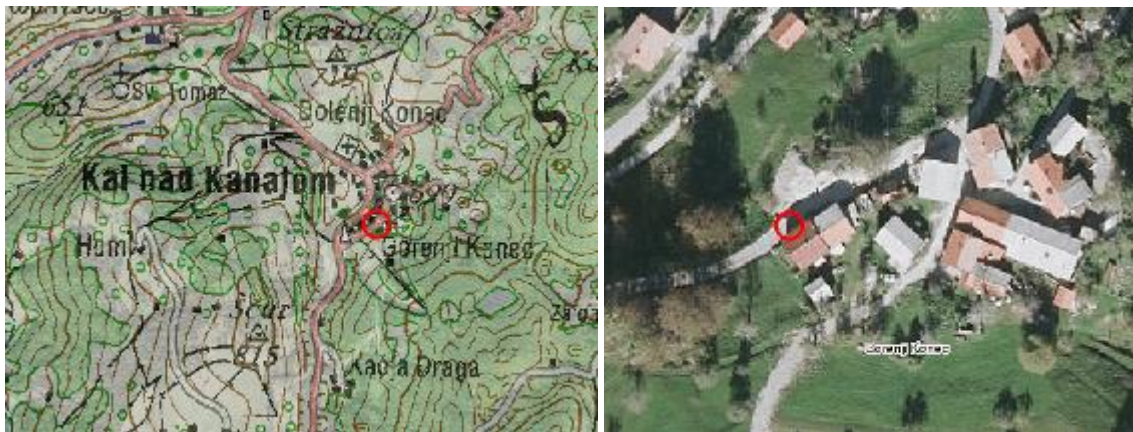
Preglednica 12: Padavinski postaji in klimatološka postaja

<b>Postaja</b>	<b>Nadmorska višina [m]</b>	<b>Tip postaje</b>	<b>Obdobje meritev</b>	<b>Koordinata GKX</b>	<b>Koordinata KGY</b>
Kal nad Kanalom	688	P, OG	1947 - 2009	5104977	5403035
Vojsko	1067	T,OG	- 2011	5098481	5415384
Lokve	965	P,OG	- 2011	5096923	5406952

Na spodnjih slikah (slike 26-32) so prikazane lokacije padavinskih postaj ter klimatološka postaja.



Slika 26: mreža postaj z registracijo padavin 2009 (MOP ARSO, 2009)



Slika 27: Lokacija padavinske postaje Kal nad Kanalom (ARSO, 2007)



Slika 28: Padavinska postaja Kal nad Kanalom



Slika 29: Lokacija padavinske postaje Lokve (ARSO, 2007)



Slika 30: Padavinska postaja Lokve



Slika 31: Lokacija klimatološke postaje Vojsko (ARSO, 2007)



Slika 32: Klimatološka postaja Vojsko

## **9 MODEL POREČJA TREBUŠČICE**

Na območju porečja Trebuščice imamo eno samo vodomerno postajo (VP Trebuščica), ki vsako uro beleži pretok vode. Poleg tega pa imamo dve padavinski postaji na obrobju porečja Trebuščice in eno klimatološko postajo, na katerih se izvajajo avtomatske meritve padavin. Merjeni podatki so nam služili za umerjanje in verifikacijo modela. Oblika visokovodnega vala je odvisna tudi od predhodnih pogojev (predhodnih padavin in vlažnosti zemljine, časa trajanja padavin, jakosti in razporeditve padavin, rabe tal, in tipa zemljine, lokalnega naklona terena, itd.) oziroma samega dogodka, ki je v vsakem primeru edinstven. Vsi ti različni dejavniki delujejo istočasno v različnih kombinacijah.

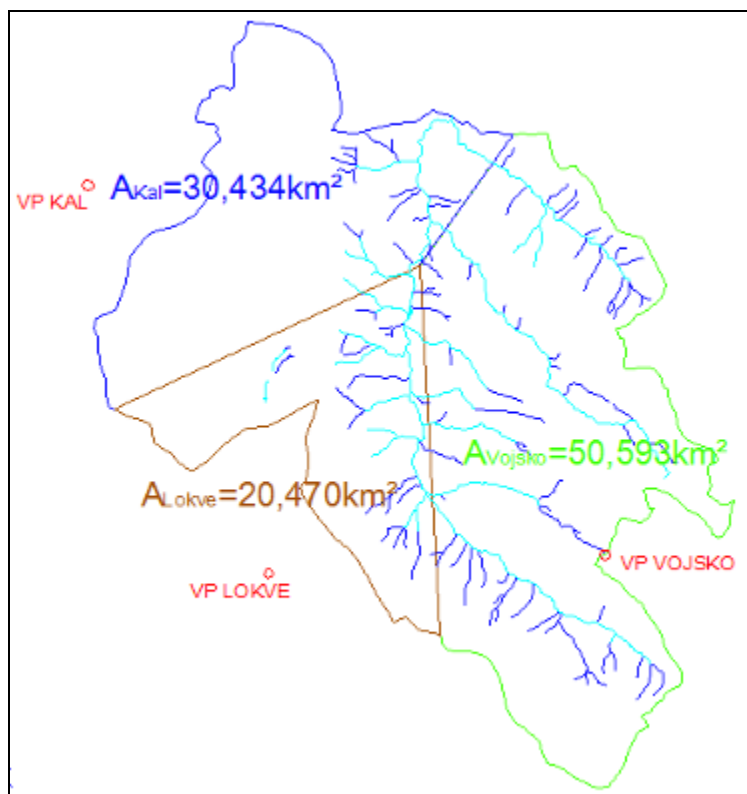
V diplomski nalogi sem model umerila na osnovi merjenih padavin, iz meritev določenega hidrograma enote in merjenih pretokov na območju porečja Trebuščice. Model lahko umerjamo ročno ali pa avtomatsko s programom. Pri postopku umerjanja program primerja izračunani hidrogram odtoka z opazovanim hidrogramom.

### **9.1 Vhodni podatki**

#### **9.1.1 Padavine**

Vhodni podatek v model so padavine. V model smo podali 10-minutne vrednosti padavin za izbrani padavinski situaciji iz leta 2008 in 2000, preračunane iz 5-minutnih meritev padavin (ARSO, 2011). Program omogoča vnos padavin z več padavinskih postaj in pri tem upošteva vpliv posamezne postaje po metodi uteži. Uteži (Preglednica 13) za vsako padavinsko postajo sem določila s pomočjo Thiessenivih poligonov, ki so prikazani na sliki 33.





Slika 33: Vpliv padavinskih postaj s Thiessonovi poligoni

Preglednica 13: Uteži izračunane s pomočjo Thiessenovih poligonov

$W_{kal}$	=	0,299
$W_{lokve}$	=	0,201
$W_{vojsko}$	=	0,498

Za boljše razumevanje hidrološkega dogajanja na porečju Trebuščice sta bili izbrani in obdelani dve padavinski situaciji. Prva izbrana padavinska situacija je bila od 11. 7. 2000 z maksimalno višino padavin 3,77 mm ter vsoto padlih padavin 31,44 mm. Druga izbrana situacija je trajala 18. 7. 2008 z maksimalno višino padavin 2,57 mm ter vsoto padavin 38,45 mm.

### 9.1.1.1 Padavinska situacija 11. 7. 2000

Prve padavine so bile zabeležene 11. 7. ob 23:10. uri in so trajale do 12. 7. do 2:30 ure. Na grafu histograma padavin (Slika 34) in v preglednici 10-minutnih padavin (Preglednica 17) so prikazane padavine, ki so povzročile visokovodni val julija 2000. Pred padavinami 11. 7. 2000 ni bilo padavin, prav tako jih ni bilo daljši čas po tem obdobju. Tla na povodju predhodno niso bila namočena.

Preglednica 14: 5-minutne padavine na padavinski postaji Kal za padavinsko situacijo 11.7.2000

Čas	23:00	23:05	23:10	23:15	23:20	23:25	23:30	23:35	23:40	23:45	23:50	23:55	00:00	00:05	00:10
Padavine [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Čas	00:15	00:20	00:25	00:30	00:35	00:40	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10	01:15	01:20	
Padavine [mm]	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.9	0.4	2.2	0.4	0.1	0	0	0	
Čas	01:25	01:30	01:35	01:40	01:45	01:50	01:55	02:00	02:05	02:10	02:15	02:20	02:25	02:30	
Padavine [mm]	0.1	0	0	0	1.8	3.7	0	8.8	8.8	0	1.8	0.1	0.3	0	

Preglednica 15: 5-minutne padavine na padavinski postaji Vojsko za padavinsko situacijo 11.7.2000

Čas	23:00	23:05	23:10	23:15	23:20	23:25	23:30	23:35	23:40	23:45	23:50	23:55	00:00	00:05	00:10
Padavine [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.7	0.7	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1
Čas	00:15	00:20	00:25	00:30	00:35	00:40	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10	01:15	01:20	
Padavine [mm]	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	1.6	2.2	1.9	1.9	1.9	1.4	1.3	1.2	1.8	
Čas	01:25	01:30	01:35	01:40	01:45	01:50	01:55	02:00	02:05	02:10	02:15	02:20	02:25	02:30	
Padavine [mm]	3.8	3.7	2.3	0	0.1	0	0	1.7	0.4	1.2	1.2	0.5	1.4	0	

Preglednica 16: 5-minutne padavine na padavinski postaji Lokve za padavinsko situacijo 11.7.2000

Čas	23:00	23:05	23:10	23:15	23:20	23:25	23:30	23:35	23:40	23:45	23:50	23:55	00:00	00:05	00:10
Padavine [mm]	0	0.6	0.5	0.1	0	0	0	0	0.1	0	0	0.2	0.2	0.2	0.8
Čas	00:15	00:20	00:25	00:30	00:35	00:40	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10	01:15	01:20	
Padavine [mm]	0.8	0.1	0.1	0.3	0.1	0.9	1.4	1.3	1.4	3.8	3.9	4.1	2.6	0	
Čas	01:25	01:30	01:35	01:40	01:45	01:50	01:55	02:00	02:05	02:10	02:15	02:20	02:25	02:30	
Padavine [mm]	0	0	0.1	0	0	0.2	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	

Preglednica 17: 10- minutne padavine za vse tri padavinske postaje z upoštevanimi utežmi za padavinsko situacijo 11.7.2000 (preglednica 11)

Čas	23:00	23:10	23:20	23:30	23:40	23:50	00:00	00:10	00:20	00:30	00:40
Padavine [mm]	0.00	0.22	0.02	0.00	0.62	0.75	0.18	0.30	0.39	0.28	1.13
Čas	00:50	01:00	01:10	01:20	01:30	01:40	01:50	02:00	02:10	02:20	02:30
Padavine [mm]	2.98	3.72	2.99	2.02	3.77	1.17	1.74	3.53	3.44	1.42	0.79



Preglednica 19: 5-minutne padavine na padavinski postaji Vojsko za padavinsko situacijo 18.7.2008

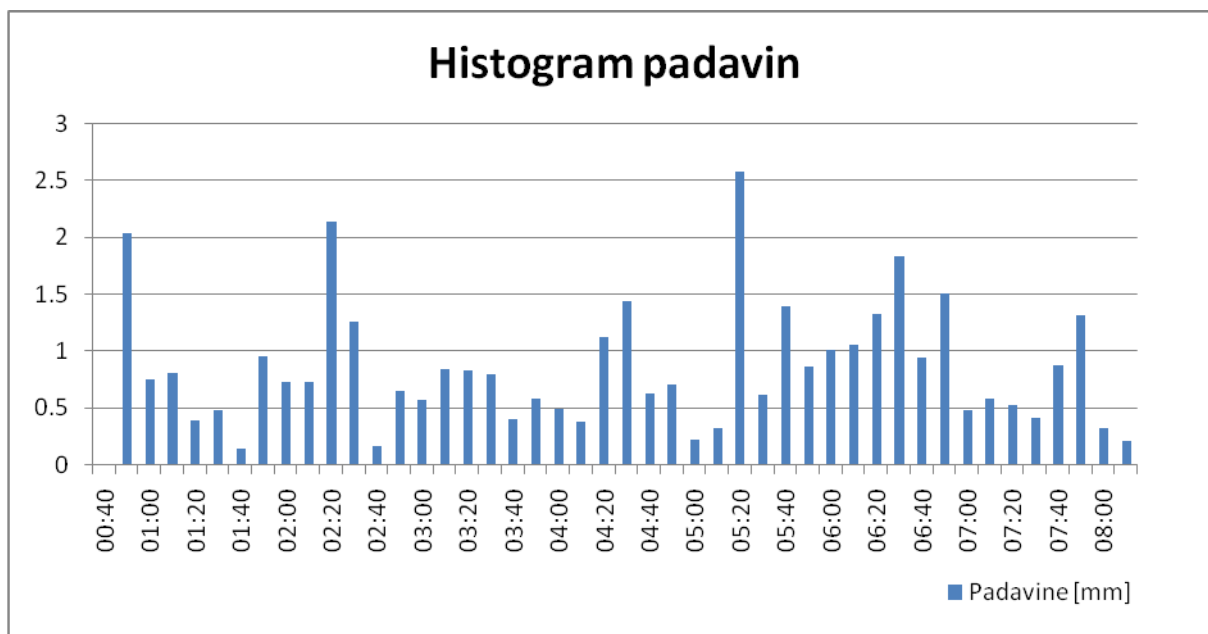
Čas	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10	01:15	01:20	01:25	01:30	01:35	01:40	01:45	01:50	01:55
Padavine [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	0	0,7	0,8	0,5
Čas	02:00	02:05	02:10	02:15	02:20	02:25	02:30	02:35	02:40	02:45	02:50	02:55	03:00	03:05	03:10
Padavine [mm]	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0,1	0	0,3	0,4	0,3	0,5	0,6	0,6
Čas	03:15	03:20	03:25	03:30	03:35	03:40	03:45	03:50	03:55	04:00	04:05	04:10	04:15	04:20	04:25
Padavine [mm]	0,7	0,7	0,6	0,7	0	0,1	0,3	0,6	0,5	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,1
Čas	04:30	04:35	04:40	04:45	04:50	04:55	05:00	05:05	05:10	05:15	05:20	05:25	05:30	05:35	05:40
Padavine [mm]	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,5	0,6	0,3	0,3	0,7	0,7
Čas	05:45	05:50	05:55	06:00	06:05	06:10	06:15	06:20	06:25	06:30	06:35	06:40	06:45	06:50	06:55
Padavine [mm]	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
Čas	07:00	07:05	07:10	07:15	07:20	07:25	07:30	07:35	07:40	07:45	07:50	07:55	08:00	08:05	08:10
Padavine [mm]	0,1	0,8	0,2	0,2	0,7	0,4	0,3	0,5	0,6	0,9	0,8	0,2	0	0,2	0,1

Preglednica 20: 5-minutne padavine na padavinski postaji Lokve za padavinsko situacijo 18.7.2008

Čas	00:45	00:50	00:55	01:00	01:05	01:10	01:15	01:20	01:25	01:30	01:35	01:40	01:45	01:50	01:55
Padavine [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	1
Čas	02:00	02:05	02:10	02:15	02:20	02:25	02:30	02:35	02:40	02:45	02:50	02:55	03:00	03:05	03:10
Padavine [mm]	0,6	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,8	0	0	0	0	0,1	0	0	0
Čas	03:15	03:20	03:25	03:30	03:35	03:40	03:45	03:50	03:55	04:00	04:05	04:10	04:15	04:20	04:25
Padavine [mm]	0,1	0,1	0,2	0,4	0,4	1,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0	0	0,6	0,1	0,1
Čas	04:30	04:35	04:40	04:45	04:50	04:55	05:00	05:05	05:10	05:15	05:20	05:25	05:30	05:35	05:40
Padavine [mm]	0	0,3	0	0,1	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,5	0,3	0,2
Čas	05:45	05:50	05:55	06:00	06:05	06:10	06:15	06:20	06:25	06:30	06:35	06:40	06:45	06:50	06:55
Padavine [mm]	0,5	0,3	0,1	0,2	1,2	1,2	1,2	1,3	0,9	0,7	0,4	1	1,2	3,3	0,2
Čas	07:00	07:05	07:10	07:15	07:20	07:25	07:30	07:35	07:40	07:45	07:50	07:55	08:00	08:05	08:10
Padavine [mm]	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0	0,2	0,5	1,1	1,2	1,1	1	0,1	0,1	0,2

Preglednica 21: 10-minutne padavine za vse tri padavinske postaje z upoštevanimi utežmi za padavinsko situacijo 18.7.2008 (preglednica 11)

Čas	00:40	00:50	01:00	01:10	01:20	01:30	01:40	01:50	02:00	02:10	02:20	02:30	02:40	02:50	03:00	03:10
Padavine [mm]	0	2,04	0,75	0,81	0,39	0,48	0,15	0,96	0,73	0,73	2,14	1,26	0,17	0,65	0,57	0,84
Čas	03:20	03:30	03:40	03:50	04:00	04:10	04:20	04:30	04:40	04:50	05:00	05:10	05:20	05:30	05:40	
Padavine [mm]	0,83	0,8	0,4	0,59	0,5	0,38	1,12	1,44	0,63	0,71	0,22	0,33	2,57	0,62	1,4	
Čas	05:50	06:00	06:10	06:20	06:30	06:40	06:50	07:00	07:10	07:20	07:30	07:40	07:50	08:00	08:10	
Padavine [mm]	0,87	1,01	1,05	1,32	1,83	0,94	1,51	0,48	0,58	0,53	0,42	0,87	1,31	0,32	0,21	



Slika 35: Histogram padavin vseh treh padavinskih postaj za padavinsko situacijo 18.7.2008

### 9.1.2 Koeficienti CN in začetne izgube Ia

Na podlagi preglednic 1 in 2 sem določila povprečen CN, ki znaša 70. Posamezni koeficienti CN in začetne izgube Ia, ki smo jih uporabili za vhodne podatke v hidrološki model Trebušnice so prikazani v preglednici 22 ter 23.

Preglednica 22: Skupina zemljine za porečje Trebušnice

Opis 1	Opis 2	Opis 3	A [km <sup>2</sup> ]	%	Skupina zemljine	
					A	B
Gozdne in deloma ohranjene naravne površine	Gozdovi	Listnati gozd	64,96	0,64		73
Gozdne in deloma ohranjene naravne površine	Gozdovi	Mešani gozd	18,18	0,18	57	
Gozdne in deloma ohranjene naravne površine	Gozdovi	Iglasti gozd	2,98	0,03	45	
Kmetijske površine	Pašniki	Pašniki	3,57	0,04	68	
Kmetijske površine	Mešane kmetijske površine	Pretežno kmetijske površine z večjimi območji vegetacije	11,8	0,12		81

$$\text{CN} = 70,07$$

Preglednica 23: Izračun  $I_a$  s pomočjo dobljenega CN

CN=	70,07
S=	$(25400-254*CN)/CN$
S=	108,49 mm
Ia=	$0,2*S$
Ia=	21,70

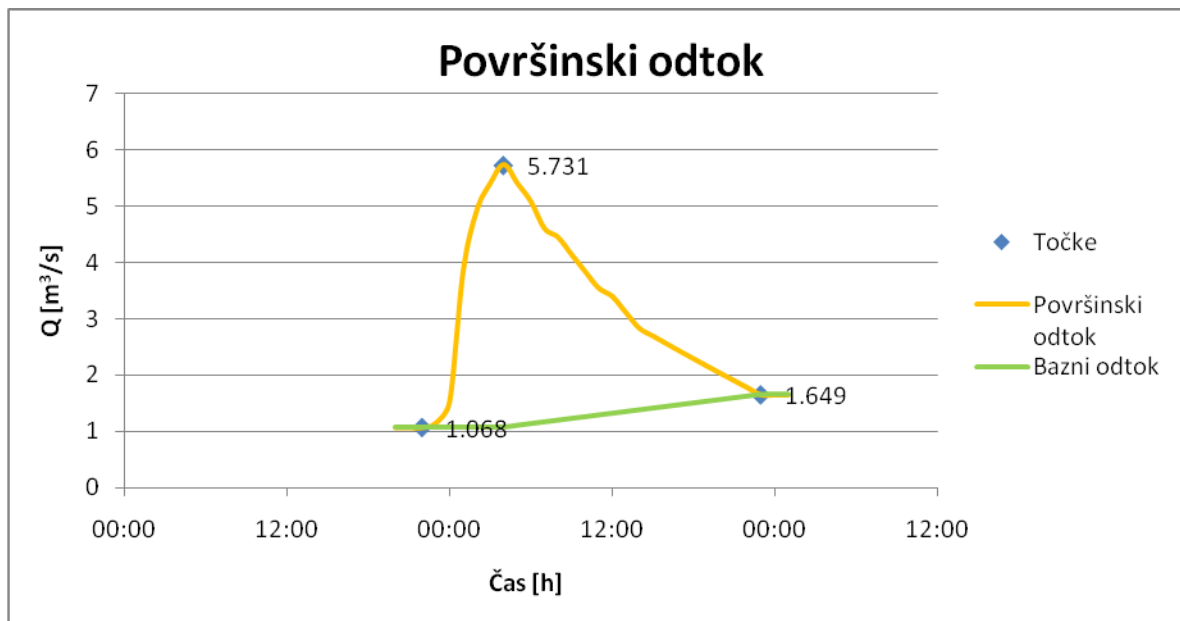
### 9.1.3 Pretoki

Za merjene pretoke na porečju Trebušnice je bila na voljo ena vodomerna postaja. Vodomerna postaja se nahaja tik pred vtokom Trebušnice v reko Idrijco. Meritve se izvajajo avtomatsko s pomočjo limnigrafa. Za izdelavo modela smo pridobili in uporabili urne podatke o pretokih Trebušnice (ARSO, 2011). Ker imamo dve padavinski situaciji, jima pripadata tudi dve pretočni situaciji. Prva pretočna situacija se je zgodila med 10. / 11.7 .2000, druga pa med 18. / 19.7.2008. Obe pretočni situaciji sta podrobneje obravnavani in opisani v nadaljevanju. Pri analizi podatkov in izdelavi modela je bilo ugotovljeno, da je čas meritev pretokov zelo verjetno napačen, saj se je merjeni odtok začel pred pojavom padavin. Enako je pokazal tudi model, zato so bile vse meritve pretokov časovno zamaknjene za 4 ure naprej.

#### 9.1.3.1 Pretok za padavinsko situacijo 11. 7. 2000

Merjeni hidrogram odtoka zabeležen med 10. 7. in 11. 7. 2000 je dosegel maksimum dne 11. 7. ob 4:00 uri zjutraj in je znašal  $5,73 \text{ m}^3/\text{s}$ . Od tega trenutka dalje je le ta začel zopet upadati in se umiril ob 23:00.

Na podlagi pridobljenih podatkov o merjenih pretokih smo določili površinski in bazni odtok. Bazni odtok smo določili s pomočjo grafične tri točkovne metode (Slika 36).



Slika 36: Hidrogram odtoka ter določen bazni odtok na podlagi treh točk za padavinsko situacijo 11.7.2000.

S pomočjo programa HEC-HMS smo določili trajanje učinkovitih padavin, po katerem dobimo ime hidrograma enote. Iz površinskega odtoka smo izračunali volumen površinskega odtoka za porečje Trebuščice ter s pomočjo podatka o površini povodja izračunali debelino vodne plasti. Tako smo na podlagi vseh dobljenih rezultatov določili hidrogram enote (Slika 36) za obravnavani merjeni hidrogram odtoka. V preglednici 24 so podani izračuni, ki so bili potrebni za določitev hidrograma enote.

Preglednica 24: Določanje hidrograma enote za pretočno situacijo 11.7.2000

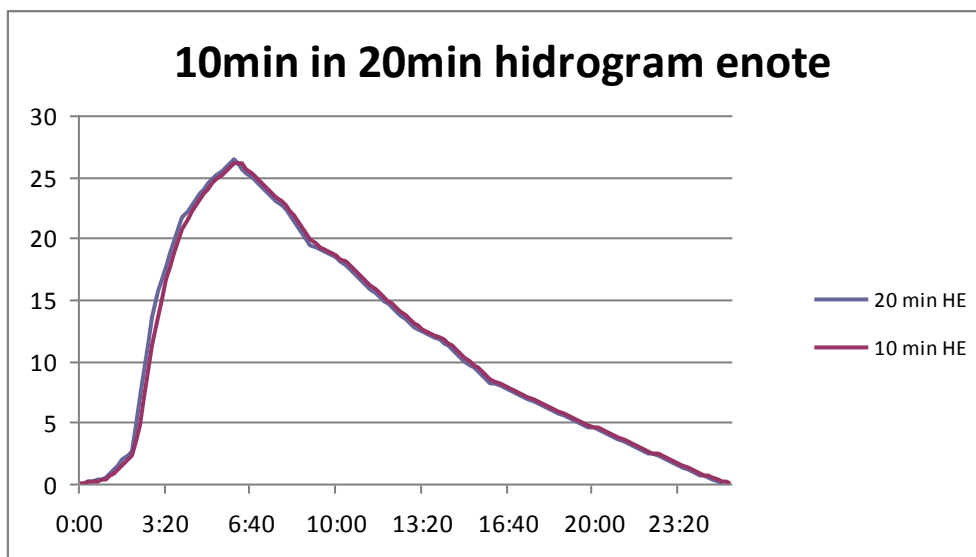
Čas[h]	Dan	Pretok [m3/s]	Površinski odtok [m3/s]	Bazni odtok [m3/s]	PO*3600 sec [m3]	ordinata 20 min - HE (volumen vala/debelina vodne plasti)
20:00	10.7.2000	1,068		1,068		
21:00	10.7.2000	1,068		1,068		
22:00	10.7.2000	1,068	0	1,068	0	0
23:00	10.7.2000	1,153	0,085	1,068	306	0,480
0:00	11.7.2000	1,526	0,458	1,068	1648,8	2,588
1:00	11.7.2000	3,836	2,768	1,068	9964,8	15,641
2:00	11.7.2000	4,915	3,847	1,068	13849,2	21,738
3:00	11.7.2000	5,4	4,332	1,068	15595,2	24,479
4:00	11.7.2000	5,731	4,663	1,068	16786,8	26,349
5:00	11.7.2000	5,4	4,301	1,099	15485,1	24,306
6:00	11.7.2000	5,075	3,946	1,129	14205,0	22,297
7:00	11.7.2000	4,599	3,439	1,160	12381,3	19,434
8:00	11.7.2000	4,443	3,253	1,190	11709,7	18,380
9:00	11.7.2000	4,136	2,915	1,221	10494,4	16,472
10:00	11.7.2000	3,836	2,585	1,251	9304,3	14,604
11:00	11.7.2000	3,541	2,259	1,282	8132,2	12,765
12:00	11.7.2000	3,396	2,083	1,313	7500,1	11,772
13:00	11.7.2000	3,11	1,767	1,343	6360,4	9,984
14:00	11.7.2000	2,83	1,456	1,374	5242,4	8,229
15:00	11.7.2000	2,693	1,289	1,404	4639,1	7,282
16:00	11.7.2000	2,557	1,122	1,435	4039,4	6,340
17:00	11.7.2000	2,423	0,957	1,466	3446,9	5,410
18:00	11.7.2000	2,29	0,794	1,496	2858,0	4,486
19:00	11.7.2000	2,158	0,631	1,527	2272,7	3,567
20:00	11.7.2000	2,029	0,472	1,557	1698,3	2,666
21:00	11.7.2000	1,901	0,313	1,588	1127,4	1,770
22:00	11.7.2000	1,774	0,156	1,618	560,1	0,879
23:00	11.7.2000	1,649	0	1,649	0	0
0:00	12.7.2000	1,649		1,649		
<b>Volumen vala=</b>					<b>179607,6 m<sup>3</sup></b>	



Preglednica 25: Debelina vodne plasti

A =	101490473,17	m <sup>2</sup>
-----	--------------	----------------

debelina	0,0018	m
vodne	0,1770	cm
plasti	1,7697	mm



Slika 37: 10- in 20-minutni hidrogram enote za padavinski dogodek 11.7.2000

Dobljeni 20-minutni HE smo zaradi zahtev programa HEC-HMS pretvorili v 10-minutni HE, saj program trajanje HE privzame enako časovnemu koraku podanih padavin, temu pa mora biti prilagojen tudi časovni korak izračuna.

10-minutni HE (Slika 37) se je v nadaljevanju naloge uporabil za umerjanje modela porečja Trebušnice. Umerjanje modela se je namreč izvedlo na osnovi znanih padavin s pomočjo podanega hidrograma enote in merjenih pretokov na območju porečja Trebušnice.

### 9.1.3.2 Pretok za padavinsko situacijo 18. 7. 2008

Merjeni hidrogram odtoka zabeležen med 18. 7. in 19. 7. 2008 je dosegel maksimum 18. 7. ob 9:00 uri zjutraj in je znašal 13,17 m<sup>3</sup>/s. Od tega trenutka dalje je le ta začel zopet upadati in se umiril 19. 8. 2008 ob 8:00.

Na podlagi pridobljenih podatkov o merjenih pretokih, smo najprej določili površinski in bazni del odtoka. Bazni odtok smo določili s pomočjo grafa s tri točkovno metodo (Slika 38).



Slika 38: Hidrogram odtoka ter določen bazni odtok na podlagi treh točk za padavinski dogodek 18.7.2008.

Tako dobljeni površinski odtok smo v nadaljevanju uporabili za verifikacijo modela.

Preglednica 26: Pretočna situacija 18.7.2008

Čas[h]	Dan	Pretok [m3/s]	Površinski odtok [m3/s]	Bazni odtok [m3/s]	PO*3600sec [m3]
0:00	18.jul.08	1,424		1,424	
1:00	18.jul.08	1,424		1,424	
2:00	18.jul.08	1,424	0	1,424	0
3:00	18.jul.08	1,736	0,312	1,424	1123,2
4:00	18.jul.08	2,293	0,869	1,424	3128,4
5:00	18.jul.08	2,73	1,306	1,424	4701,6
6:00	18.jul.08	5,349	3,925	1,424	14130
7:00	18.jul.08	8,8	7,376	1,424	26553,6
8:00	18.jul.08	12,108	10,684	1,424	38462,4
9:00	18.jul.08	13,169	11,745	1,424	42282,0
10:00	18.jul.08	12,108	10,663	1,445	38386,5
11:00	18.jul.08	10,741	9,275	1,466	33389,4
12:00	18.jul.08	9,114	7,627	1,487	27456,3
13:00	18.jul.08	7,583	6,075	1,508	21868,7
14:00	18.jul.08	6,713	5,184	1,529	18660,8
15:00	18.jul.08	6,155	4,604	1,551	16576,1

... nadaljevanje Preglednice 26

16:00	18.jul.08	5,349	3,777	1,572	13598,6
17:00	18.jul.08	4,835	3,242	1,593	11672,3
18:00	18.jul.08	4,338	2,724	1,614	9807,2
19:00	18.jul.08	4,097	2,462	1,635	8863,7
20:00	18.jul.08	3,629	1,973	1,656	7103,0
21:00	18.jul.08	3,402	1,725	1,677	6209,8
22:00	18.jul.08	3,18	1,482	1,698	5334,7
23:00	18.jul.08	2,962	1,243	1,719	4474,0
0:00	19.jul.08	2,962	1,222	1,740	4398,1
1:00	19.jul.08	2,73	0,969	1,761	3487,0
2:00	19.jul.08	2,73	0,948	1,782	3411,1
3:00	19.jul.08	2,505	0,701	1,804	2525,2
4:00	19.jul.08	2,505	0,680	1,825	2449,3
5:00	19.jul.08	2,293	0,447	1,846	1610,1
6:00	19.jul.08	2,095	0,228	1,867	821,4
7:00	19.jul.08	2,095	0,207	1,888	745,5
8:00	19.jul.08	1,909	0,000	1,909	0,0
9:00	19.jul.08	1,909			
10:00	19.jul.08	1,909			
11:00	19.jul.08	1,909			
Volumen vala = 353782,33m <sup>3</sup>					

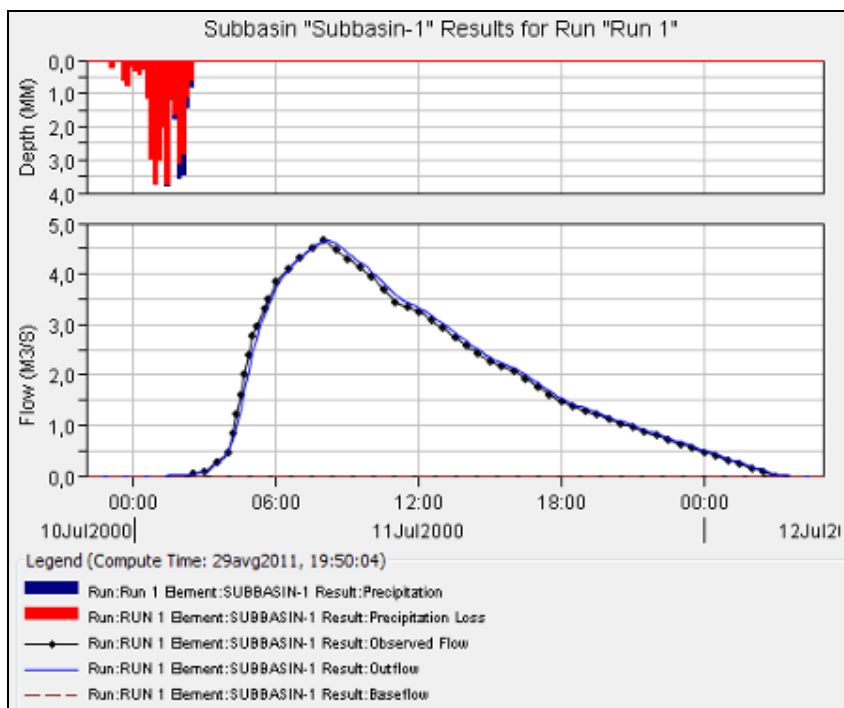
Preglednica 27: Debelina vodne plasti

A =	101490473 m <sup>2</sup>
-----	--------------------------

debelina vodne plasti	0,0034859 m
	0,3485867 cm
	3,4858674 mm

## 9.2 Umerjanje modela porečja Trebušnice

Za umerjanje osnovnega modela smo povzeli podatke za padavinsko situacijo 11. 7. 2000. Model smo umerili s pomočjo programa HEC–HMS. Rezultat umerjenega hidrološkega modela Trebušnice prikazuje slika 39. Slika prikazuje graf merjenega odtoka in graf izračunanega odtoka s pomočjo vstavljenega hidrograma enote. Na grafu so poleg odtoka prikazane tudi efektivne padavine in izgube.



Slika 39: Umerjen graf odtoka 11.7.2000

Rezultati umerjanja so prikazani tudi v preglednici 28.

Preglednica 28: Rezultati umerjanja merjenega in izračunanega odtoka

	Merjeni odtok		Izračunani odtok		Odstopanje [%]
Čas pojava konice	11.jul.00	8:00	11.jul.00	8:10	
Konica [m <sup>3</sup> /s]	4,66		4,7		0,86
Volumen enote [mm]	1.77		1.80		1,69
RMSE [m <sup>3</sup> /s]	0,10				

Na podlagi analize rezultatov ugotovimo, da se konica hidrograma pri merjenem odtoku pojavi le 10 minut prej kot pri izračunanem. Višina konice pri izračunanem odtoku je za 0,86 % višja kot pri merjenemu odtoku. Prav tako je volumen odtoka pa sta pri izračunanem odtoku za 1,69 % večji kot pri merjenem.

Ujemanje med izračunanim in merjenim hidrogramom odtoka smo ovrednotili tudi s srednjim kvadratom odstopanj RMSE (Root mean square error) (enačba 59), ki se ga pogosto uporablja pri primerjavi modelov.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(dQ_{izr} - dQ_{izm})^2}{n}} \quad (59)$$

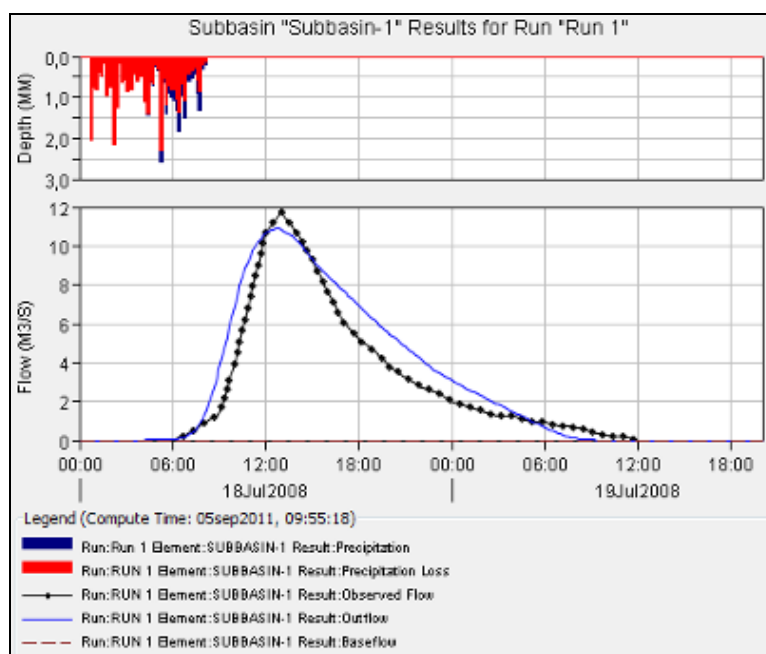
RMSE ... srednji kvadratični pogrešek

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

n ... število časovnih intervalov

### 9.3 Verifikacija

Za umerjen osnovni model z dne 11. 7. 2000 smo izvedli še verifikacijo modela s padavinsko in pretočno situacijo z dne 18. 7. 2008 (Slika 40). Verifikacijo se je prav tako izdelalo s pomočjo programa HEC-HMS. V model smo vstavili merjene pretoke ter padavine za dogodek 18. 7. 2008 (preglednica 18 in 24), hidrogram enote z dne 11. 7. 2000 pa je vstavljen kot osnova modela in je ostal enak. Rezultat verifikacije hidrološkega modela Trebuščice prikazuje slika 40.



Slika 40: Verifikacija hidrograma odtoka 18.7.2008 s pomočjo hidrograma enote 11.7.2000

Preglednica 29: Rezultati umerjanja merjenega in izračunanega odtoka

	Merjeni odtok		Izračunani odtok		Odstopanje [%]
čas pojava konice	18.jul.98	13:00	18.jul.98	12:40	
Konica [m <sup>3</sup> /s]	11,74		10,9		-7,16
Volumen [mm]	3,68		4,37		18,75
RMSE [m <sup>3</sup> /s]	0,15				

Analiza rezultatov je pokazala, da se konica hidrograma pri merjenem odtoku pojavi 20 minut kasneje kot pri izračunanem (preglednica 29). Višina konice je pri izračunanem hidrogramu za 7,16 % nižja

kot pri merjenemu, med tem ko je volumen izračunanega hidrograma odtoka večji za 18,75 % od merjenega odtoka. Iz preglednice 18 je razvidno, da znaša vrednost RMSE 0,15 m<sup>3</sup>/s kar kaže na dobro ujemanje.

## 10 IZRAČUN PARAMETROV SINTETIČNEGA HIDROGRAMA ENOTE

V diplomski nalogi smo na primeru porečja Trebuščice modelirali hidrogram enote s pomočjo merjenih podatkov in padavin. Umerjen model porečja Trebuščice pa smo primerjali z različnimi sintetičnimi hidrogrami enote. Na ta način smo poskušali ovrednotiti primernost posameznih metod in enačb sintetičnih hidrogramov enot na primeru slovenskega porečja.

### 10.1 Metoda Snyder

Snyder-jev hidrogram enote je verjetno najbolj razširjen in raziskan postopek za določanje hidrograma enote. Zato obstaja veliko empiričnih enačb za določanje parametrov Snyder-jevega HE. V diplomski nalogi se je primerjalo sintetični hidrogram enote z merjenim na podlagi le nekaj od Snyder-jevih enačb.

#### 10.1.1 Snyder-jeva enačba

V preglednici 30 so prikazani pripadajoči parametri določeni na podlagi značilnosti porečja Trebuščice. S pomočjo določenih parametrov se je z enačbo Snyder-ja izračunalo čas zakasnitve, ki znaša 6,08 ure.

Preglednica 30: Izračunani parametri po enačbi Snyder

$T_p$	čas zakasnitve [h],	6,08	h
$C_t$	koeficient povodja [1.8 – 2.2],	2	
$L$	dolžina glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice [km],	18,45	km
$L_c$	dolžina glavnega toka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje centroidu povodja [km].	5,7	km

Parameter  $C_p$  in  $C_t$  nima fizikalne razlage in ju je priporočljivo določiti s kalibracijo v modelu HEC-HMS. Večje vrednosti  $C_p$  so povezane z manjšimi vrednostmi  $C_t$ .

#### 10.1.2 Enačba Bell in Kerr

V preglednici 31 so prikazani pripadajoči parametri, ki se jih je določilo na podlagi značilnosti porečja in struge Trebuščice. S pomočjo določenih parametrov se je s z enačbo Bell-a in Kerr-a izračunalo čas zakasnitve, ki znaša 6,29 ure.

Preglednica 31: Izračunani parametri po enačbi Bell in Kerr

$T_L$	je kritični čas zakasnitve [ure],	6,29	h
$L$	je razdalja od iztoka s povodja do najbolj oddaljenega dela povodja vzdolž poti toka [km],	6,5	km
$S$	je naklon toka [m/m],	0,038	m/m
$M$	je konstantna glede na vrsto območja poplav [od 1 do $3.4 \times 10^{-4}$ ]	0,6	

### 10.1.3 Enačba Tulsa District

V preglednici 32 so prikazani pripadajoči parametri, ki se jih je določilo na podlagi značilnosti porečja in struge Trebušnice. S pomočjo določenih parametrov se je s z enačbo Tulsa District izračunalo čas zakasnitve ter maksimalni pretok. Koeficient  $C_p$  pa se je izračunalo iz izračunanega časa zakasnitve ter maksimalnega pretoka. Čas zakasnitve znaša 2,25 ure, maksimalni pretok  $1,97 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ , koeficient vrha hidrograma  $C_p$  pa 0,63.

Preglednica 32: Izračunani parametri po enačbi Tulsa District

$T_p$	čas zakasnitve [h],	2,25	h
$L$	dolžina glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice [km],	18,45	km
$L_c$	dolžina glavnega toka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje centroidu povodja [km],	6,5	km
$S$	padec povodja [%].	38,07	%
$q_p$	maksimalni pretok	1,97	$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$
$C_p$	koeficient vrha	0,63	

### 10.1.4 Enačba Denver

Vrednosti  $C_i$ , ki se uporabljajo v metodi Colorado Urban Hydrograph, so odvisne od odstotka neprepustne površine  $I$ . Za izračun  $C_i$  sem uporabila enačbo 15, saj je odstotek neprepustnih površin na porečju Trebušnice zelo majhen. Na porečju prevladujejo gozdovi in kmetijske površine.

Struga Trebušnice ima sicer brežine obložene s travnato rušo, vendar pa je padec na različnih odsekih različen. V zgornjem delu struge je ta veliko bolj strm kot v spodnjem delu, kjer se Trebušnica izliva v reko Idrijco. Zato se korekcijo uporabljenega naklona povodja ni izvedlo.

Lastnosti povodij, za katere veljajo enačbe, se gibljejo s površino povodja od 0.39 do 7.98 km<sup>2</sup> in za nagib povodja od 0.005 do 0.037 m/m. Iz tega podatka je razvidno, da je porečje Trebušnice veliko večje, kot dovoljuje enačba.



Za izračun koeficienta P sem uporabila enačbo 18, saj je odstotek neprepustnih površin na porečju Trebušnice zelo majhen. Na porečju prevladujejo gozdovi in kmetijske površine (preglednica 5).

V preglednici 33 so prikazani pripadajoči parametri, ki se jih je določilo in izračunalo na podlagi značilnosti porečja in struge Trebušice. S pomočjo določenih parametrov se je z enačbo Denver izračunalo najprej koeficient  $C_t$  (Preglednica 34), nato pa s pomočjo koeficienta  $C_t$  še čas zakasnitve. S pomočjo koeficientov P in  $C_t$ , izračunanih na osnovi predhodnih enačb (enačbe 15 – 18), smo lahko določili koeficient maksimalnega pretoka  $C_p$ . Koeficient  $C_t$  znaša 0,163, saj faktor urbanizacije lahko zanemarimo. Čas zakasnitve znaša 2,25 ure, maksimalni pretok  $1,97 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ , koeficient vrha hidrograma  $C_p$  pa 0,63.

Preglednica 33: Izračunani parametri po enačbi Denver

$T_p$	čas zakasnitve od težišča histograma efektivnih padavin do pojava maksimalnih pretokov hidrograma [h],	2,25 h
L	dolžina vodotoka od iztočnega profila do konca roba povodja [km]	18,45 km
$L_c$	dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km],	6,5 km
S	ocenjen vzdolžni padec celotnega vodotoka [m/m]	0,038 m/m
$C_t$	koeficient refleksijskega časa pojava maksimalnega pretoka [-].	0,163

Preglednica 34: Izračunani parametri po enačbi Denver

$C_p$	koeficient maksimalnega pretoka	0,61
$C_t$	koeficient refleksijskega časa pojava maksimalnega pretoka,	0,163
P	parameter nastopa konice hidrograma,	2,16
A	površina povodja [ $\text{km}^2$ ].	101,49

### 10.1.5 Enačba Rao in Delleur

V preglednici 35 so prikazani pripadajoči parametri, ki se jih je določilo in izračunalo na podlagi značilnosti porečja in struge Trebušnice. S pomočjo določenih parametrov se je z enačbo Rao in Delleur izračunalo koeficient časa zakasnitve. Faktor urbanizacije je za porečje Trebušnice minimalen. Po enačbi Rao in Delleur (enačba 23) znaša vrednost koeficienta časa zakasnitve 5,18 ure.

Preglednica 35: Izračunani parametri po enačbi Rao in Delleur

$T_p$	Čas zakasnitve	5,18	h
A	površina povodja [km <sup>2</sup> ]	101,49	km <sup>2</sup>
L	dolžina toka [km]	16,16	km
S	naklon [‰]	38,07	‰
U	faktor urbanizacije	0,01	

#### 10.1.6 Enačba Simas in Hawkins

V preglednici 36 so prikazani pripadajoči parametri za porečje Trebuščice. Izračunan je bil čas zakasnitve, ki je opredeljen kot razlika med osrednjo točko efektivnih padavin in osrednja točka neposrednega odtoka. Enačba je bila za razvita za manjša povodja. Izračunani čas zakasnitve za porečje Trebuščice znaša 0,49 ure.

Preglednica 36: Izračunani parametri po enačbi Simas in Hawkins

$T_L$	razlika med osrednjo točko efektivnih padavin in osrednja točka neposrednega odtoka [h]	31,20	h
W	širina porečja [km]	13,1	km
S	naklon [m/m]; razmerje med največjo razliko v višini in najdaljšo dolžino poti pretoka	0,038	m/m
$S_{nat}$	koeficient skladiščenja [mm], ki se uporablja v metodi »Curve Number (CN)«.	89,24	mm

#### 10.1.7 Enačba Wu

V preglednici 37 so prikazani pripadajoči parametri za porečje Trebuščice, ki so potrebni za izračun časa zakasnitve. Izračunani čas zakasnitve po metodi Wu znaša 8ur.

Preglednica 37: Izračunani parametri po enačbi Wu

$T_p$	je čas do vrha [h]	8,00	h
A	površina povodja [km <sup>2</sup> ]	101,49	km <sup>2</sup>
L	povprečna dolžina [km]	16,16	km
S	povprečni nagib glavnega toka ( $S \times 10^{-4}$ )	38,07	

#### 10.1.8 Enačba Espey in Drugi

V preglednici 38 so prikazani pripadajoči parametri za porečje Trebuščice, ki so potrebni za izračun koeficienta  $T_r$ . Za izračun se je uporabilo enačbo 28, ki velja za podelželjske površine. Izračunani čas

zakasnitve po metodi Espey znaša 53,54 min. Enačba vsebuje določene omejitve, ki so prikazani v poglavju 6.1.8.

Preglednica 38: Izračunani parametri po enačbi Espey in drugi

	čas od začetka učinkovitih padavin do pojava		
$T_r$	konice na hidrogramu enote (min)	53,54	min
L	dolžina glavnega kanala [km]	16,16	km
S	glavni kanal pobočju [m/m].	0,038	m/m
$\Phi$	faktor 1,0 za naravne razmere	1,0	

Ko smo imeli izračunan čas zakasnitve, pa smo izračunali še maksimalni pretok hidrograma enote. Uporabili smo enačbo 31. Maksimalen pretok je odvisen od velikosti porečja Trebušnice ter od časa zakasnitve. Tudi ta enačba vsebuje določene omejitve, ki so opisani v poglavju 6.1.8. Maksimalni pretok (Preglednica 39) v tem primeru znaša  $3,63 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$

Preglednica 39: Izračunani maksimalni pretok po enačbi Espey in drugi

$q_p$	maksimalni pretok hidrograma enote [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ],	3,63	$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$
A	površina povodja [ $\text{km}^2$ ],	101,49	$\text{km}^2$

Tako določeni maksimalni pretok hidrograma enote se lahko uporabi z Espey-jevim časom naraščanja za določanje Snyderjevega koeficienta  $C_p$ . Najprej določimo čas zakasnitve, s pomočjo izračunanega koeficienta  $T_r$  in  $q_p$ , pa se je izračunalo Snyderjev koeficient, ki znaša 0,23 (Preglednica 40)

Preglednica 40: Izračunani parametri po enačbi Espey in drugi

$T_p = 26,77 \text{ min} = 0,45 \text{ h}$
$C_p = 0,23$

### 10.1.9 Enačba Riverside Country

Z določenimi parametri, ki veljajo za porečje Trebušnice se je izračunalo čas zakasnitve. Čas zakasnitve, izračunan s pomočjo enačbo Riverside Country, je čas od začetka padavin do točke na enotnem hidrogram, ki se ujema s polovico celotnega volumna odtoka. Čas zakasnitve znaša 6,65 ure. Rezultat je prikazan v preglednici 41.

Preglednica 41: Izračunani parametri po enačbi Riverside Country

$T_p$	čas zakasnitve [h],	6,65	h
C	koeficient, ki je odvisen od strmine terena: $C = 1.2$ za strm teren; $C = 0.72$ za srednje strm teren; $C = 0.38$ za ravninski teren,	1,2	
L	dolžina povodja [km],	18,45	km
$L_c$	dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km],	5,7	km
S	nagib povodja [m/m]	0,038	m/m

#### 10.1.10 Enačba Colorado State University

V preglednicah 42 in 43 so prikazani pripadajoči parametri, ki se jih je določilo na podlagi značilnosti porečja in struge Trebušnice. S podatkom o odstotku neprepustnih površin se je določilo koeficient  $C_t$ . Za porečje Trebušnice se je ocenilo, da je odstotek neprepustnih površin 5%. Enačba za izračun koeficienta  $C_t$  velja le za povodja, ki imajo najmanj 10% neprepustnih površin.

Preglednica 42: Izračunani koeficient  $C_t$  po enačbi Colorado State University

$C_t$	koeficient, ki določa topografske lastnosti povodja	2,22
I	odstotek neprepustne površine povodja [%],	5%

Čas zakasnitve se je izračunalo na podlagi izračunanega koeficienta  $C_t$  ter parametrov dolžine vodotoka L in  $L_c$ . Za porečje Trebušnice je čas zakasnitve izračunan po metodi Colorado State University 6,75 ure.

Preglednica 43: Izračunani parametri po enačbi Colorado State University

$T_p$	čas zakasnitve [h],	6,75	h
L	dolžina povodja [km]	18,45	km
$L_c$	dolžina vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka [km],	5,7	km
$C_t$	koeficient, ki določa topografske lastnosti povodja.	2,22	

#### 10.1.11 Enačba Putman

V preglednici 44 je prikazan rezultat časa zakasnitve izračunan z enačbo Putmana. Enačba vključuje parametra dolžine in padec struge ter parameter deleža neprepustne površine. Enačba Putman velja

predvsem za velika in malo prepustna porečja. Čas zakasnitve izračunan po metodi Putma-a za porečje Trebuščice znaša 5,69 ure.

Preglednica 44: Izračunani parametri po enačbi Putman

$T_p$	čas zakasnitve [h],	5,69	h
L	dolžina vodotoka [km],	16,16	km
S	nagib vodotoka [‰]	38,07	‰
I	delež neprepustne površine [-].	0,01	

## 10.2 Metoda SCS

Čas zakasnitve pri SCS metodi je enak kot pri Snyderjevi metodi. Tako lahko vrednosti časa zakasnitve izračunamo na podlagi parametrov dolžine in naklona povodja in maksimalne retenzije povodja. Vrednost izračunanega časa zakasnitve je prikazan v preglednici 45. Čas zakasnitve je v tem primeru odvisen od parametra dolžine in naklona povodja. Pomemben člen je tudi parameter maksimalne retenzije povodja, ki je odvisen od koeficienta CN (Preglednica 46)

Preglednica 45: Izračunani parametri po enačbi SCS

Čas od težišča histograma efektivnih padavin			
$T_p$	do vrha enotnega hidrograma [h]	5,18	h
L	hidravlična dolžina povodja [km]	18,45	km
$S_r$	maksimalna retenzija povodja [mm]	89,2	mm
S	naklon povodja [%]	3,8	%

$S_r$  se računa neposredno na osnovi vrednosti koeficienta CN.

Preglednica 46: Izračunani koeficient  $S_r$  po enačbi Colorado State University

CN ...	74
$S_r$ ...	89,2 mm

## 10.3 Metoda Clark

Pri Clarkovem modelu imamo prav tako na voljo veliko emepričnih enačb za izračun potrebnih parametrov, ki jih model vključuje. Z empiričnimi enačbami je bilo potrebno izračunati čas koncentracije  $T_c$  in akumulacijski koeficient R. Enačbe, ki smo jih uporabili, se medseboj razlikujejo glede na vrsto odtoka. Nekatere enačbe nam podajo čas koncentracije le za določeno pot dežja in sicer

površinski tok za prvih 100m, čas koncentracije za površinski tok zmanjšan za 100m ter za čas koncentracije toka po strugi. Dve enačbi, ki so bili uporabljeni pa upoštevata celoten čas koncentracije, to pomeni, tako površinski tok kot tok po strugi.

Za primer modeliranja sinetičnega hidrograma enote na porečju Trebuščice, smo za celoten čas koncentracije sešteli vrednosti parametrov  $T_c$  izračunani po enačbi Kerby (enačba 41) in Van Sickle (enačba 49). Vrednosti časa koncentracije za površinski tok zmanjšan za 100m pa smo uporabili enačbe Carter (enačba 46), SCS-TR55 (enačba 45) in enačbo zvezne uprave za letalstvo (enačba 47). Rezultati različnih kombinacij oziroma seštevka enačb za izračun celotnega časa koncentracije so prikazani v preglednici 54.

### 10.3.1 Enačba za določitev časa koncentracije površinskega toka – 100m

#### 10.3.1.1 Kerby-jeva enačba

Kerby-jeva enačba se uporablja za izračun časa koncentracije površinskega toka dolžine 100-150m. V nalogi smo za primer Trebuščice upoštevali površinski tok dolžine 100m. Enačba računa čas koncentracije z upoštevanjem nagiba povodja, koeficienta hrapavosti ter dolžino površinskega toka. Vrednost koeficienta hrapavosti smo določili s pomočjo preglednice 4. Dolžina, ki se uporablja v enačbi, je linearna razdalja, merjena od najbolj oddaljene točke porečja v smeri vzporedno z naklonom do dobro določenega kanala.

Preglednica 47: Izračunani parametri po enačbi Kerby

	čas koncentracije površinskega toka		
$T_c$	povodja [h]	0,23	h
S	nagib povodja [m/m]	0,094	m/m
n	koeficient hrapavosti povodja	0,4	
L	dolžina površinskega toka [m]	100	m

### 10.3.2 Enačbe za določitev časa koncentracije površinskega toka – 6363m

#### 10.3.2.1 Kirpich-ova enačba

Kirpich-ova enačba se uporablja lahko za izračun časa koncentracije površinskega toka dolžine 100-150m ali pa za preostalo dolžino površinskega toka, tj. dolžina zmanjšana za 100-150m kot ostale enačbe obravnavane v poglavju 10.3.2. Poleg dolžine površinskega toka je še pomemben parameter

naklon porečja. Za primer Trebuščice smo Kirpich-ovo enačbo uporabili za površinski tok zmanjšan za dolžino 100m.

Preglednica 48: Izračunani parametri po enačbi Kirpich

$T_c$	čas koncentracije povodja [h]	0,86	h
L	dolžina površinskega toka [km]	8,61	km
S	naklon površine [m/m]	0,094	m/m

Za travnate površine je treba  $T_c$  pomnožiti z 2

Za betonske in asfaltne površine pa s 4

$$T_c = 0,86h \times 2 = 1,72h$$

### 10.3.2.2 SCS TR-55 enačba

Enačba SCS TR-55 upošteva površinski tok zmanjšan za prvih za 100 – 150 m. Poleg osnovnih parametrov, kot sta dolžina površinskega toka in naklon porečja, je pomemben še parameter hitrosti površinskega toka, ki se ga izračuna po enačbi 43.

Preglednica 49: Izračunani parametri po enačbi SCS-TR55

$T_t$	površinski čas potovanja [h],	1,16	h
L	razdalja površinskega toka [m],	6363	m
v	hitrost površinskega toka [m/s].	1,53	m/s
s	nagib terena [m/m]	0,094	m/m

### 10.3.2.3 Carter-jeva enačba

Carter-jeva enačba prav tako določa čas koncentracije v odvisnosti od celotne dolžine struge vodotoka ter od naklona vodotoka. Enačba je bila razvita za manjša porečja in velja le pod pogoji, ki so opisani v poglavju 4.2.7.

Preglednica 50: Izračunani parametri po enačbi Carter

$T_c$	čas koncentracije [min]	46,47	min
$L_m$	dolžina površinskega toka [km]	6,36	km
$S_m$	naklon [%]	38,07	%

#### 10.3.2.4 Enačba zvezne uprave za letalstvo

Enačba za izračun časa koncentracije vsebuje poleg osnovnih parametrov dolžine vodotoka in naklon struge še koeficient odtoka. Koeficient odtoka  $C$  je odvisen od vrste pokritosti porečja ter od drugih hidroloških dejavnikov. Za izračun smo koeficient odčitali iz preglednice 6.

Preglednica 51: Izračunani parametri po enačbi Zvezne uprava za letalstvo

$T_c$ je čas koncentracije [min]	33,10	min
$C$ koeficient odtoka,	0,25	
$L$ je dolžina toka [km],	16,16	km
$S$ je naklon [m/m],	0,038	m/m

#### 10.3.3 Enačbe za določitev časa koncentracije toka po strugi – 16160m

##### 10.3.3.1 Enačba Ramser

Ramserjeva enačba določa čas koncentracije  $T_c$  v odvisnosti od celotne dolžine struge ter od povprečnega naklona struge. Enačba ne velja za porečja manjša od  $5 \text{ km}^2$ , ker na tako majhnih porečjih prevladuje površinski tok. Vrednost izračunanega koeficienta  $T_c$  so je podana v preglednici 52.

Preglednica 52: Izračunani parametri po enačbi Ramser

$T_c$	čas koncentracije [min]	122,37	min
$L_k$	dolžina struge [m]	16160	m
$S_k$	povprečni nagib kanala [m/m]	0,038	m/m

##### 10.3.3.2 Enačba Van Sickle

Enačbo Van Sickle smo v nalogi uporabili za izračun časa koncentracije toka po strugi. Enačba za izračun časa koncentracije povzema poleg skupne dolžine vodotoka še skupno dolžino vse dreniranih poti, v premeru večjih od 0,9m. Za izračun koeficienta  $T_c$  je bilo potrebno sešteti dolžine vseh pritokov glavne struge, ki so širši od 0,9m.



Preglednica 53: Izračunani parametri po enačbi Van Sickle

$T_c$	čas koncentracije [min]	240,54	min
$L_t$	skupna dolžina vseh dreniranih poti večje od 0.9 metra v premeru [km]	21,51	km
$L_m$	skupna dolžina porečja [km]	18,45	km
$S_f$	naklon povodja [m/m]	0,038	m/m

### 10.3.3.3 Prikaz izračuna celotnega časa koncentracije $T_c$

V preglednici 54 so prikazani celotni časi koncentracij  $T_c$ , ki smo jih dobili s pomočjo seštevka rezultatov zgornjih enačb. Pri izračunu smo upoštevali, da za tok po strugi dolžine 100m upoštevamo enačbo Kerby-ja, za tok po strugi preostale dolžine enačbe SCS-TR55, Carter-ja in Zvezne uprave za letalstvo. Za tok po strugi pa smo upoštevali enačbo Van Sickle. Iz spodnje preglednice 54 lahko vidimo, da so si časi zelo podobni

Preglednica 54: Kombinacije seštevkov enačb za izračun celotnega časa koncentracije

Kerby+SCS-TR55+Van Sickle	5,40	h
Kerby+Carter+Van Sickle	5,02	h
Kerby+Zvezna upr. za letalstvo+Van Sickle	4,79	h

### 10.3.3 Enačbe za določitev celotnega časa koncentracije

#### 10.3.3.1 Enačba Clark-ovega akumulacijskega koeficienta porečja

Enačbo Clarkovega akumulacijskega koeficienta porečja uporabimo za izračun celotnega časa koncentracije. Poleg enačbe za izračun koeficienta  $T_c$ , je podana tudi enačba za izračun koeficienta skladiščenja R. Enačbo za izračun koeficienta R smo uporabili pri vseh metodah, kjer nam le-te niso že same po sebi podale enačbe za izračun koeficienta R.

Preglednica 55: Izračunani parametri po enačbi Clark-ovega akumulacijskega koeficienta porečja

$T_c$	Clarkov čas koncentracije [h]	6,55	h
R	Clarkov akumulacijski koeficient [h]	10,69	h
L	Dolžina najdaljše vodne poti povodja [km]	24,77	km
S	povprečni naklon vodne poti [%o]	38,07	%o
I	Delež neprepustne površine [%]	1	%

### 10.3.3.2 Enačba Melching and Marquardt

Melching and Marquardt sta razvila dve enačbi za izračun časa koncentracije  $T_c$  in koeficienta skladiščenja  $R$ . Enačba velja za povodja manjša od  $95\text{km}^2$  in naklonom manjšim od  $55\%$ . Za izračun časa koncentracije za primer Trebušnice smo uporabili enačbi 55 in 56. Rezultati so podani v preglednici 56.

Preglednica 56: Izračunani parametri po enačbi Melching in Marquardt

$T_c$	čas koncentracije	18,61	h
$R$	koeficient skladiščenja	103,50	h
$L$	je dolžina vodotoka od iztoka do razvodnice [km]	24,77	km
$S$	$S$ je naklon vodotoka določen z razliko višin dveh točk, ki predstavljata 10 in 85% razdalje vzdolž struge od iztoka razvodnice [%]	38,07	%
$I$	je odstotek neprepustnih površin [%];	1	%
$A$	je površina povodja [ $\text{km}^2$ ]	101,49	$\text{km}^2$
$D$	debelina efektivnih padavin [mm].	1,8	mm

## 10.4 Analiza rezultatov

### 10.4.1 Model Snyder

Za modeliranje Snyder-jevega sintetičnega hidrograma enote smo v diplomski nalogi uporabili model HEC-HMS. S pomočjo empiričnih enačb smo izračunali parametre Snyder-jevega modela, čas zakasnitve  $T_p$  ter koeficient vrha hidrograma  $C_p$ .

Oba zahtevana parametra Snyderjevega HE smo vstavili v umerjen osnovni model. Parametra se je toliko časa spreminjalo, da smo dobili optimalni vrednosti obeh parametrov oz. ko se je odtok dobljen s pomočjo sintetičnega Snyder-jevega hidrograma enote najbolj približal merjenemu odtoku in odtoku dobljenim z uporabniško določenim hidrogramom enote.

Preglednica 57 prikazuje optimalne vrednosti parametrov, s katerimi se Snyder-jev hidrogram najbolj približa merjenemu odtoku in odtoku, dobljenim z uporabniško določenim HE. V isti preglednici so prikazane tudi vrednosti parametrov izračunanih s pomočjo podanih empiričnih enačb. Za nekatere empirične enačbe je bilo potrebno koeficient vrha hidrograma kalibrirati s pomočjo programa HEC-HMS.

Preglednica 57: Vrednosti parametrov  $T_p$  in  $C_p$ 

Parametra	$T_p$ [h]	$C_p$
Optimalne vrednosti	6,09	0,54
Snyder	6,08	določen s kalibracijo = 0,53
Bell in Kerr	6,29	določen s kalibracijo = 0,55
Tulsa District	2,25	0,63
Denver	2,25	0,63
Rao in Delleur	5,18	določen s kalibracijo = 0,47
Simas in Hawkins	31,2	določen s kalibracijo = 0,8
Wu	8	določen s kalibracijo = 0,71
Espey in drugi	0,45	0,23
Riverside Country	6,65	določen s kalibracijo = 0,59
Colorado state university	6,75	določen s kalibracijo = 0,59
Putman	5,69	določen s kalibracijo = 0,51

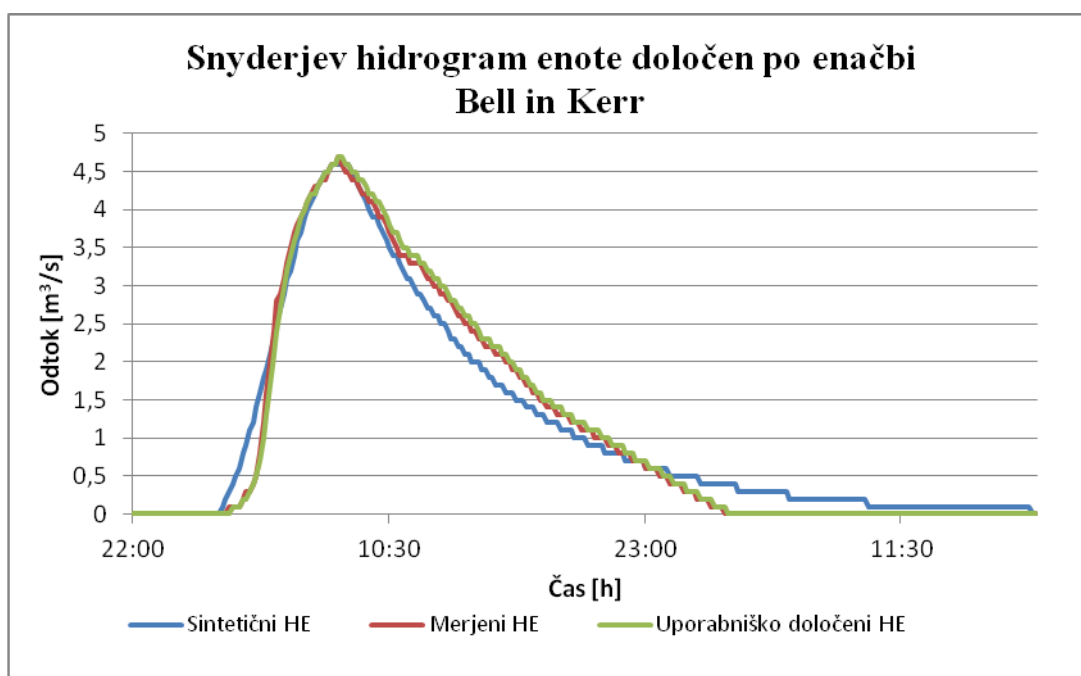
Iz preglednice 58 je razvidna primerjava sintetičnega in merjenega hidrograma. Primerjali smo čas pojava konice, maksimalni odtok ter volumen odtoka.

Preglednica 58: Primerjava rezultatov odtoka, dobljenega s pomočjo različnih sintetičnih HE, z merjenim hidrogramom

	Čas pojava konice [h]	max odtok [m <sup>3</sup> /s]	Volumen odtoka [mm]	RMSE [m <sup>3</sup> /s]	
Sintetični hidrogram enote	Optimalne vrednosti	8:00	4,7	1,8	0,27
	Snyder	7:50	4,7	1,8	0,27
	Bell in Kerr	8:10	4,6	1,8	0,26
	Tulsa District	4:10	14,4	1,8	3,92
	Denver	4:10	14,4	1,8	3,92
	Rao in Delleur	7:00	4,7	1,8	0,39
	Simas in Hawkins	7:40	1,4	1,42	1,36
	Wu	9:40	4,7	1,8	0,37
	Espey in drugi	2:40	21,6	1,8	5,13
	Riverside Country	8:30	4,7	1,8	0,25
	ColoradoState University	8:30	4,6	1,8	0,25
	Putman	7:30	4,7	1,8	0,32
	<b>MERJENI HIDROGRAM</b>	<b>8:00</b>	<b>4,66</b>	<b>1,77</b>	

Snyderjeva enačba je ena izmed najbolj preprostih enačb. Čas zakasnitve je odvisen od dolžine glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice ter dolžine glavnega toka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližje centroidu povodja. Parameter  $C_p$  se je določilo s kalibracijo v modelu HEC-HMS. Iz rezultatov vidimo, da s to metodo dobimo zelo dobro ujemanje z merjenim hidrogramom (RMSE je 0.27 m<sup>3</sup>/s) (preglednica 28).

Enačba Bell in Kerr računa čas zakasnitve s pomočjo podatkov kot je razdalja od iztoka s povodja do najbolj oddaljenega dela povodja vzdolž poti toka ter naklon toka. Pomemben dejavnik, ki tudi vpliva na rezultat izračuna časa zakasnitve je konstantna določena glede na vrsto območja poplav. Ker podatkov o vrsti poplav na porečju Trebuščice nimamo, smo vrednost konstante izbrali tako, da smo se čim bolj približali času zakasnitve za uporabniško določen HE. Iz rezultatov lahko vidimo, da se s enačbo Bell in Kerr-a najbolj približamo merjenemu odtoku. RMSE vrednost znaša 0,26 m<sup>3</sup>/s, kar kaže na malenkost slabše prilagajanje merjenemu hidrogramu kot z enačbama Riverside Country in Colorado State University (preglednica 28). Vendar zaradi boljšega časovnega ujemanja vrhov hidrogramov, lahko rečemo, da enačba Bell in Kerr podaja najboljše rezultate (slika 42).



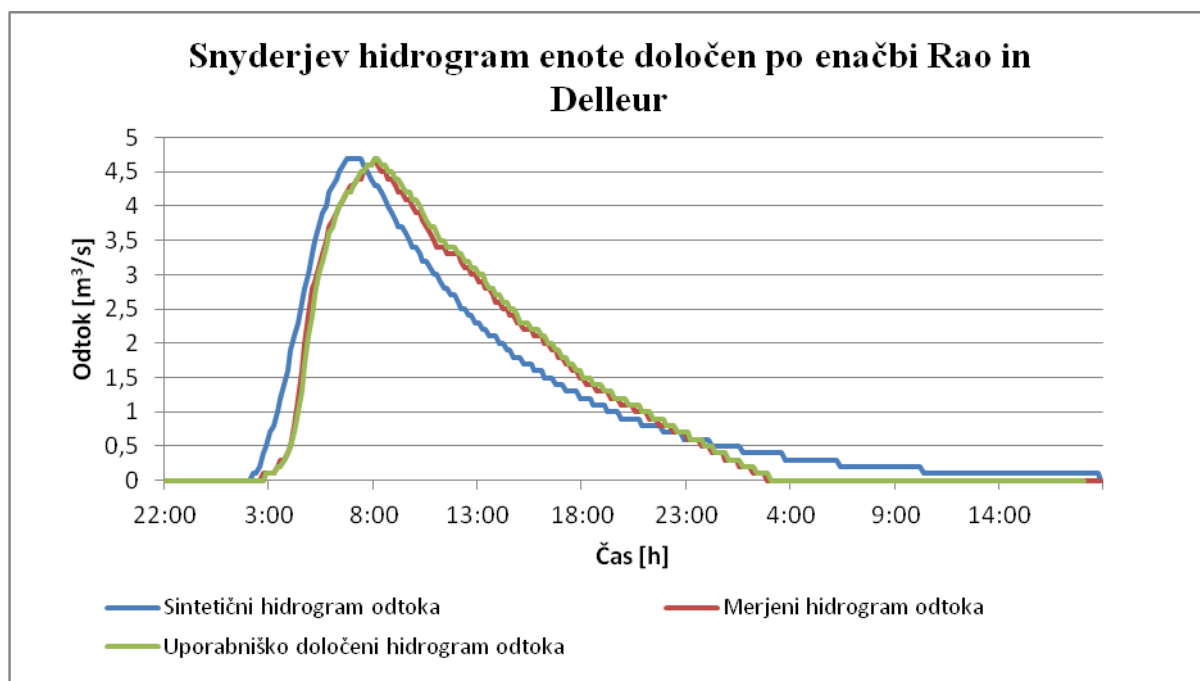
Slika 41: Primerjava Snyderjevega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametrov  $T_p$  in  $C_p$  izračunana po enačbi Bell-a in Kerr-a

Enačba Tulsa District je zelo preprosta za uporabo. Prav tako je lahko določiti potrebne vrednosti parametrov za obravnavano porečje. Z uporabo enačbe pa so podane še določene omejitve, ki jih je potrebno upoštevati. V našem primeru so vsi parametri znotraj pogojev, razen naklon struge je večji, kot predvideva enačba. Zato se ocenjuje, da prihaja do tako velikih razlik med rezultati (RMSE = 3,92 m<sup>3</sup>/s) uporabniško določenega HE in sintetičnega HE.

Denver je podal enačbo za izračun časa koncentracije, ki vključuje dolžino vodotoka od iztočnega profila do konca roba povodja, dolžino vodotoka od iztočnega profila do prereza na vodotoku, ki je najbližja težišču vodotoka in ocenjen vzdolžni padec celotnega vodotoka. Koeficient  $C_p$  smo izračunali

s pomočjo koeficienta  $C_t$ , ki je odvisen od odstotka neprepustnih površin na porečju. Tudi Denvar-jeva enačba velja le ob določenih pogojih. Upoštevati je potrebno površino porečja ter padec struge. Za naš primer so omenjeni pogoji neizpolnjeni, namreč tako površina porečja kot tudi naklon struge presegata omejeni vrednosti. Vse skupaj pa se kaže tudi v podanih rezultatih, kjer so vrednosti rezultatov ( $RMSE = 3,92 \text{ m}^3/\text{s}$ ) enake kot jih poda enačba Tulsa District (preglednica 28).

Z enačbo Rao in Delleur se vrh grafa sintetičnega hidrograma enote zelo dobro ujema z merjenim hidrogramom enote. Vendar pa nastopi maksimalni odtok eno uro prehitro v primerjavi z izmerjenim. Enačba uporablja poleg osnovnih parametrov, ki se pojavljajo pri največ enačbah (naklon in dolžina struge, površina porečja) še faktor urbanizacije. V našem primeru je ta odstotek zelo majhen. Pri tej metodi sem dobila vrednost koeficienta  $RMSE = 0,39 \text{ m}^3/\text{s}$  (preglednica 28).



Slika 42: Primerjava Snyderjevega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom ente – vrednost parametrov  $T_p$  in  $C_p$  izračunana po enačbi Rao in Delleur

Enačba Simas in Hawkis je bila razvita za manjša povodja, zato naš primer ni najboljši za primerjavo z merjenim hidrogramom enote. Enačba, za razliko od ostalih, uporablja naklon struge, širino porečja ter koeficient skladiščenja. Na vrednost koeficienta skladiščenja vpliva koeficient CN. Rezultati dobljeni s to enačbo so precej slabi. Maksimalni odtok sintetičnega hidrograma enote se pojavi skoraj en dan kasneje kot maksimalni pretok merjenega hidrograma enote.  $RMSE$  koeficient znaša  $1,36 \text{ m}^3/\text{s}$  (preglednica 28).

Z Wu-jevo enačbo se maksimalni odtok sintetičnega hidrograma enote pojavi skoraj dve uri kasneje kot pri merjenem odtoku. Vrednosti maksimalnega odtoka se razlikujeta za  $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$  (preglednica 28).

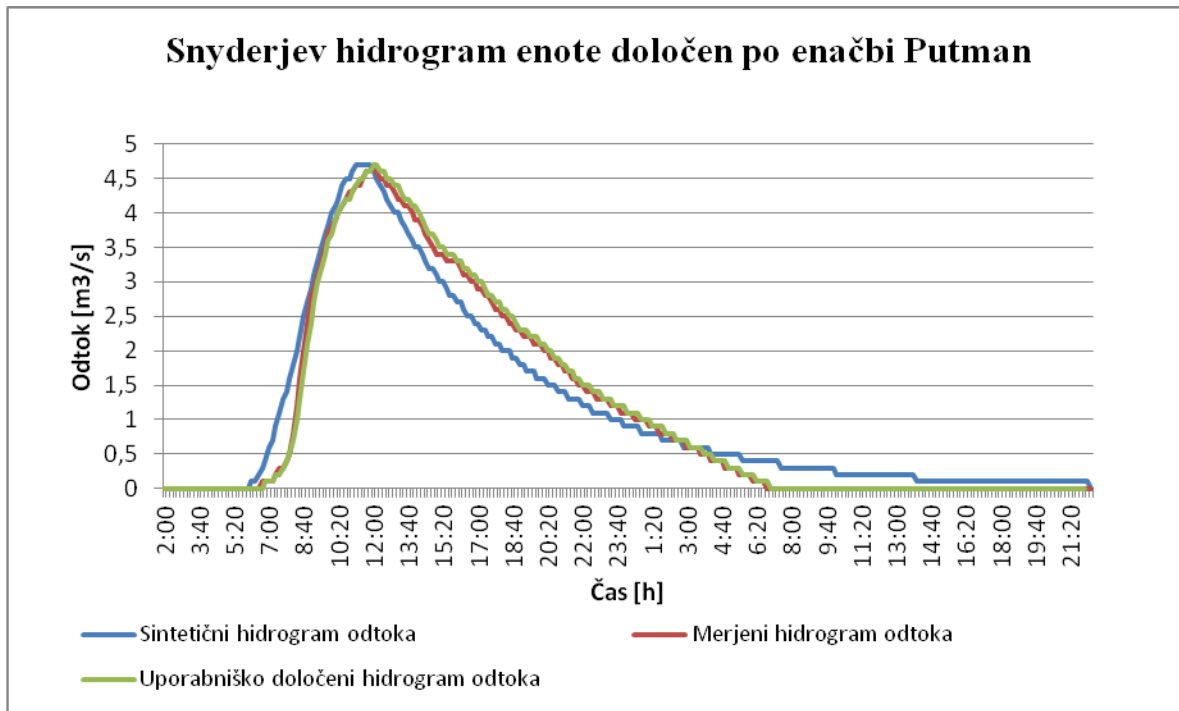
Enačba upošteva skoraj enake parametre kot enačba Rao in Delleur. Ne upošteva pa parametra neprepustnosti površin. To se kaže tudi v zelo podobnem koeficientu RMSE. Z Wu-jevo enačbo je leta malenkost boljši in znaša  $0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Z enačbo Espey in drugi se izračunana vrednost maksimalnega odtoka in volumna odtoka se zelo slabo ujemata z izmerjenima vrednostima. Maksimalni odtok v tem primeru nastopi več kot pet ur prej kot pri izmerjenem odtoku (preglednica 28). Ti rezultati so verjetno posledica omejitev oziroma pogojev, ki jih je potrebno pri uporabi te enačbe upoštevati. Za naš primer nobeden od pogojev ni bil izpolnjen. Tudi na podlagi rezultata koeficienta  $\text{RMSE} = 5,13 \text{ m}^3/\text{s}$ , enačba Espeya daje najslabše rezultate.

Enačba Riverside Country je bila izdelana izključno za podeželska območja. Maksimalni odtok merjenega hidrograma enote se je zgodil le pol ure pred maksimalnim odtokom, dobljenim s pomočjo sintetičnega hidrograma enote. Enačba poleg že osnovnih parametrov, ki jih vključujejo tudi ostale enačbe, vsebuje tudi koeficient, ki je odvisen od strmine terena. V kolikor bi upoštevali le rezultat koeficienta RMSE, ki znaša  $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ , bi lahko rekli, da je ta metoda najboljši približek merjenemu hidrogramu enote (preglednica 28). Pri natančnejši analizi pa polurni zamik konice pomeni nekoliko slabši rezultat, kot ga dobimo po metodi Bella in Kerra. Ker metoda Riverside Country ne podaja nobene enačbe za izračun koeficienta vrha hidrograma, je bil ta kalibriran.

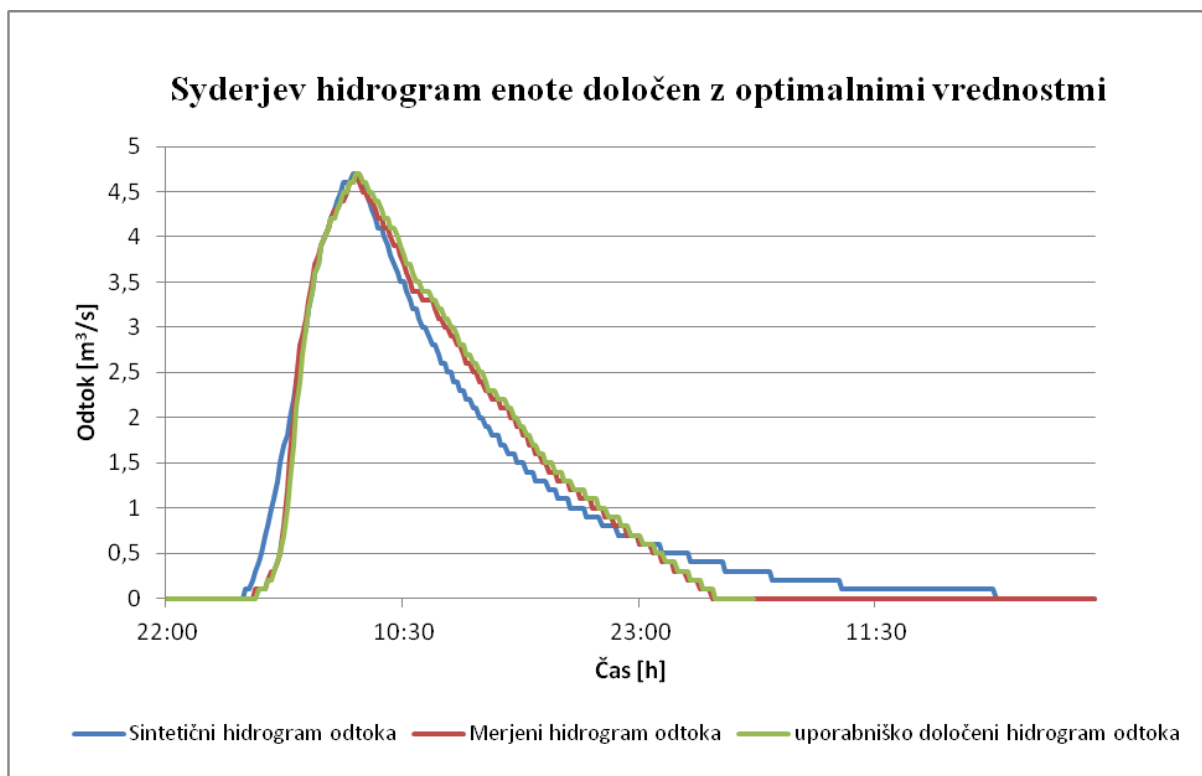
Metoda Colorado State University se skoraj popolnoma ujema z enačbo Snyderja. Razlika med enačbama je le v tem, da je Snyder za koeficient topografskih lastnosti povodja podal vrednost v nekem intervalu, metoda Colorado State University pa podaja enačbo za izračun omenjenega koeficienta, ki je odvisen od odstotka neprepustnih površin. Enačba velja za porečja, ki imajo najmanj 10 odstotkov neprepustnih površin, kar v našem primeru ne pride v poštev, saj se ocenjuje, da je ta odstotek precej manjši. Tudi s to metodo je bil koeficient  $C_p$  kalibriran s pomočjo programa. Tako kot enačba Riverside Country tudi ta enačba daje dokaj dober rezultat ( $\text{RMSE} = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ ) v primerjavi z merjenim hidrogramom (preglednica 28).

Tudi enačba Putman-a za izračun časa zakasnitve upošteva odstotek neprepustnih površin. Enačba nam poda dobre vrednosti koeficienta  $\text{RMSE} = 0,32 \text{ m}^3/\text{s}$ . Maksimalni odtok sintetičnega hidrograma enote se pojavi pol ure prej kot izmerjeni (preglednica 28). V primerjavi z merjenim hidrogramom odtoka je vrh konice le  $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$  manjši. Iz slike 43 je razvidno, da nam enačba dokaj dobre rezultate. Tudi pri tej metodi je potrebno vrednost koeficienta vrha hidrograma kalibrirati.



Slika 43: Primerjava Snyderjevega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametrov  $T_p$  in  $C_p$  izračunana po enačbi Putman

S programom HEC-HMS smo določili še optimalno vrednost časa zakasnitve  $T_p$  ter koeficient maksimalnega odtoka  $C_p$ . Koeficienta se je umerjalo toliko časa, da sta si postala merjeni in sintetični hidrogram odtoka najbolj podobna. Optimalna vrednost koeficienta časa zakasnitve tako znaša 6,09 ur in optimalna vrednost koeficienta  $C_p = 0,54$ . Na podlagi optimalnih vrednosti omenjenih koeficientov znaša vrednost koeficienta  $RMSE = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$ . (preglednica 28). Slika 44 prikazuje graf Snyderjevega sintetičnega hidrograma z optimalnimi vrednostmi parametrov  $T_p$  in  $C_p$ . Na grafu so za primerjavo ujemanja prikazani tudi merjeni in uporabniško določen hidrogram enote. Pri optimalnih vrednostih koeficientov se maksimalni odtok sintetičnega hidrograma enote pojavi točno takrat kot izmerjeni.



Slika 44: Primerjava odtoka Snyderjevega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – optimalna vrednost parametrov  $T_p$  in  $C_p$

#### 10.4.2 Model SCS

Za modeliranje SCS sintetičnega hidrograma enote smo prav tako uporabili model HEC-HMS. S pomočjo empirične enačbe smo izračunali parameter SCS modela, čas zakasnitve  $T_p$ , ki je potreben za modeliranje hidrograma enote.

Poleg rezultata z enačbo SCS, smo z modelom SCS kalibrirali čas zakasnitve, tako da smo dobili najboljšo primerjavo med merjenim in sintetičnim hidrogramom. S tem smo dobili optimalno vrednost koeficienta časa zakasnitve (preglednica 59). V preglednici 59 je prikazan tudi rezultat parametra izračunanega s pomočjo podane empirične enačbe SCS.

Preglednica 59: Vrednosti parametra  $T_p$  za SCS HE

Parametra	$T_p$ [min]
Optimalna vrednost	352
SCS	311,08

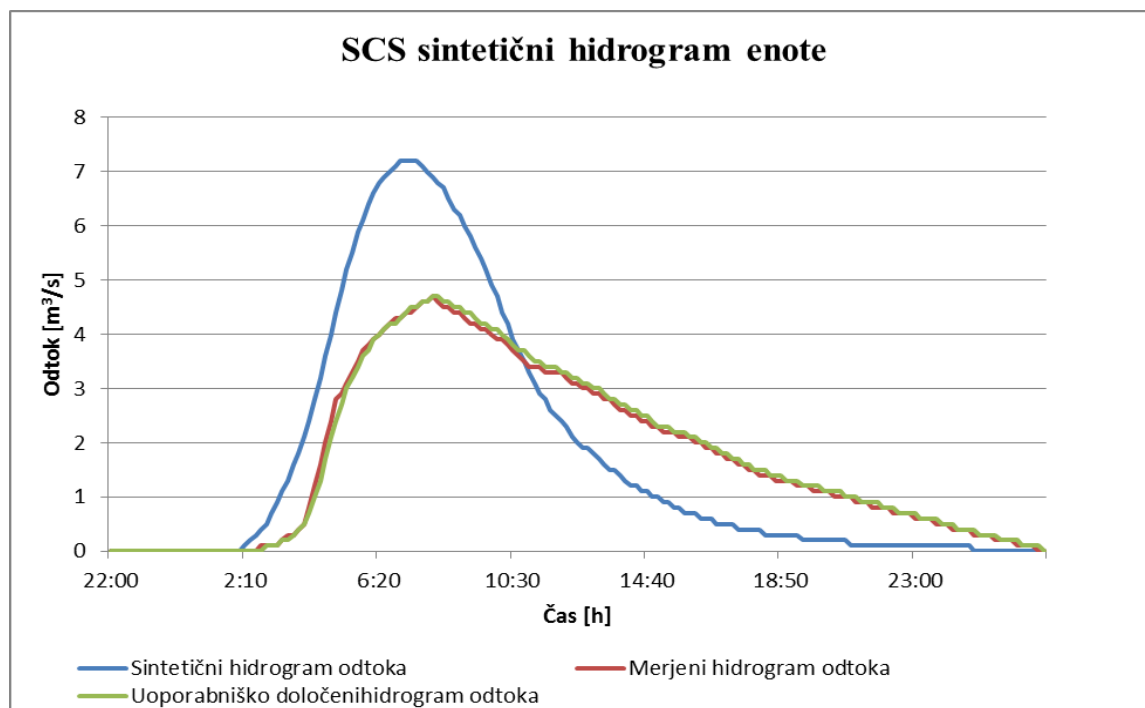


Iz preglednice 60 je razvidna primerjava merjenega odtoka in odtoka, dobljenega s pomočjo SCS sintetičnega hidrograma enote. Primerjalo se je čas pojava konice, maksimalni odtok ter volumen odtoka.

Preglednica 60: Primerjava rezultatov odtoka za SCS sintetični HE

	Čas pojava konice [h]	max odtok [m <sup>3</sup> /s]	Volumen odtoka [mm]	RMSE
Optimalne vrednosti	8:00	6,4	1,8	0,92
SCS – sintetični HE	7:10	7,2	1,8	1,32
MERJENI HIDROGRAM	8:00	4,66	1,77	

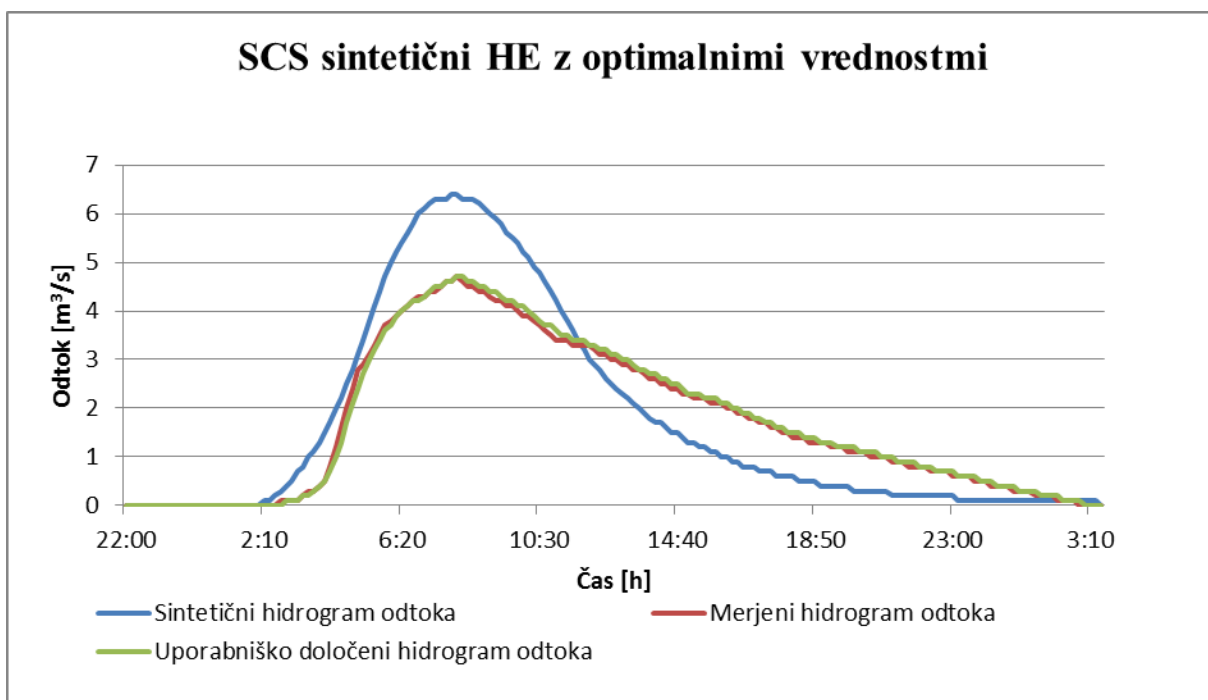
Pri metodi SCS uporabljamo koeficient CN, s pomočjo katerega opišemo lastnosti povodja. V tem koeficientu imamo tako zajeto pokrovnost tal in tip zemljine. Vrednost koeficienta CN smo predhodno umerili, postopek je opisan v poglavju 9.2. Za izračun vrednosti časa zakasnitve pa je potreben parameter dolžine in naklon vodotoka. Maksimalna retenzija povodja pa se izračuna iz koeficienta CN. Maksimalni odtok merjenega hidrograma enote se zgodi 50 minut kasneje kot izračunani hidrogram enote. vrednost koeficienta je RMSE 0,92 m<sup>3</sup>/s. Rezultat je v primerjavi z najboljšo Snyderjevo enačbo Bell in Kerr precej slabši.



Slika 45: Primerjava sintetičnega SCS hidrograma enote z merjenim odtokom in odtokom, z uporabniško določenim hidrogramom enote

Optimalna vrednost koeficienta  $T_p$  pa znaša 352 minut. S tem bi se maksimalni odtok merjenega hidrograma zgodil ob enakem času kot maksimalni odtok uporabniško določenega hidrograma enote.

Konici hidrogramov pa bi se kljub temu še vedno precej razlikovali (Slika 46), saj je maksimalni odtok optimalnega hidrograma za  $1,74\text{m}^3/\text{s}$  večji od merjenega hidrograma.



Slika 46: Primerjava SCS hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim HE – optimalna vrednost  $T_p$

### 10.4.3 Model Clark

Clarkov sintetični hidrogram enote smo modelirali s pomočjo modela HEC-HMS. Z empiričnimi enačbami je bilo potrebno izračunati čas koncentracije  $T_c$  in akumulacijski koeficient  $R$ . Za primer modeliranja sinetičnega hidrograma enote na porečju Trebuščice, smo za celoten čas koncentracije sešteli vrednosti parametrov  $T_c$  izračunane po enačbi Kerby (enačba 41), ki upošteva površinski tok dolžine 100 m in Van Sickle (enačba 49), ki upošteva tok po strugi. Vrednosti časa koncentracije za površinski tok zmanjšan za 100 m pa smo uporabili enačbi Carter (enačba 46), SCS-TR55 (enačba 45) in enačbo Zvezne uprave za letalstvo (enačba 47). Za izračun koeficienta  $R$  pa smo v vseh primerih uporabili enačbo 54. V preglednici 61 so prikazani rezultati vrednosti parametrov celotnega časa koncentracije  $T_c$  in akumulacijskega koeficienta  $R$ .

Preglednica 61: Vrednosti parametra  $T_c$  in  $R$  za Clarkov HE

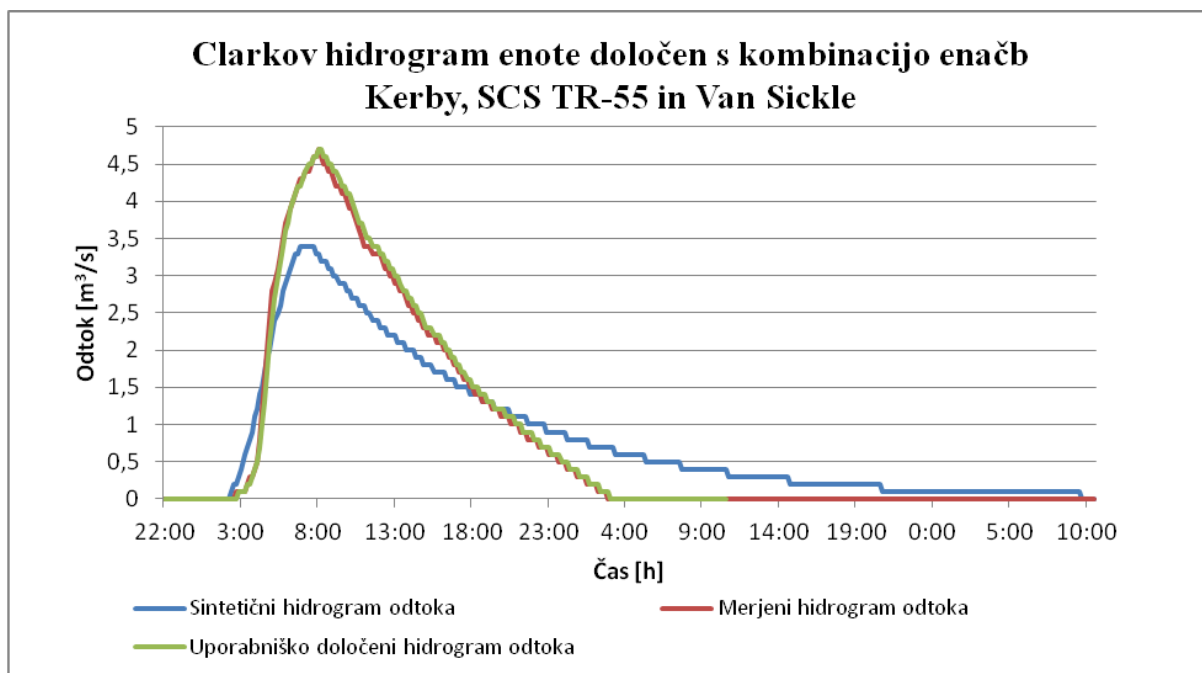
Parametra	$T_c$ [h]	$R$ [h]
Optimalne vrednosti	6,50	7,30
Kerby+SC-TR55+Van Sickle	5,40	11,84
Kerby+Carter+Van Sickle	5,02	12,22
Kerby+Zvezna up. za let.+Van Sickle	4,79	12,45
Clarkov akumulacijski koeficient	6,55	10,69
Melching and Marquardt	18,61	103,50

Iz preglednice 62 je razvidna primerjava merjenega odtoka in odtoka, dobljenega s pomočjo Clarkovega sintetičnega hidrograma enote. Primerjalo se je čas pojava konice, maksimalni odtok ter volumen odtoka.

Preglednica 62: Primerjava rezultatov odtoka za Clarkov sintetični HE

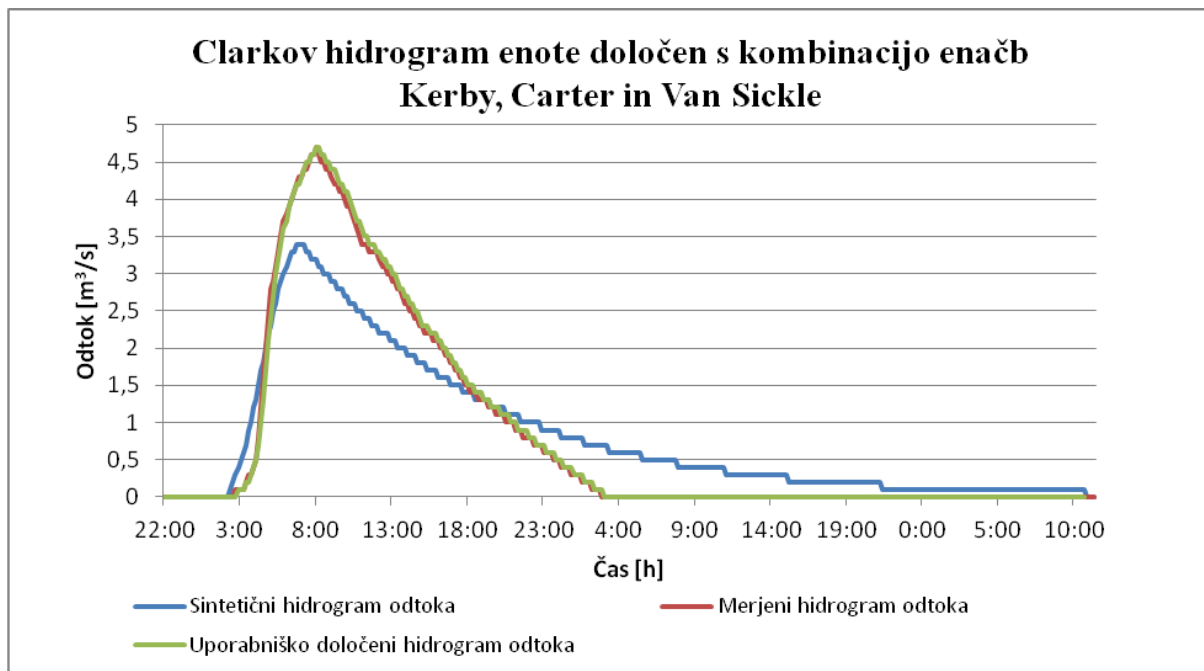
	Čas pojava konice [h]	max odtok [m <sup>3</sup> /s]	Volumen odtoka [mm]	RMSE [m <sup>3</sup> /s]	
Optimalne vrednosti	8:00	4,7	1,80	0,26	
SINETIČNI HIDROGRAM ENOTE	Kerby+SCS-TR55+Van Sickle	7:20	3,4	1,80	0,50
	Kerby+Carter+Van Sickle	7:00	3,4	1,80	0,52
	Kerby+Zvezna up. za let.+Van Sickle	6:40	3,4	1,80	0,55
	Clarkov akumulacijski koeficient	8:20	3,6	1,80	0,46
	Melching and Marquardt	20:30	0,4	0,78	0,76
	MERJENI HIDROGRAM	8:00	4,66	1,77	

Celoten čas koncentracije izračunan z enačbami Kerby, SCS TR-55 in Van Sickle nam poda vrednost koeficienta  $RMSE = 0,50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Maksimalni odtok sintetičnega hidrograma se zgodi 40 minut pred maksimalni odtokom merjenega hidrograma. Maksimalni odtok sintetičnega hidrograma pa je za  $1,26 \text{ m}^3/\text{s}$  manjši v primerjavi z merjenim hidrogramom. Glede na dobljene rezultate lahko rečemo, da nam kombinacija zgoraj naštetih enačb poda najboljše rezultate v primerjavi z ostalimi kombinacijami, ki so prikazane v preglednici 62. Ujemanje sintetičnega in merjenega hidrograma enote je grafično prikazana na sliki 47.



Slika 47: Primerjava Clarkovega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametra  $T_c$  izračunana po kombinaciji enačb Kerby, SCS TR-55 in Van Sickle

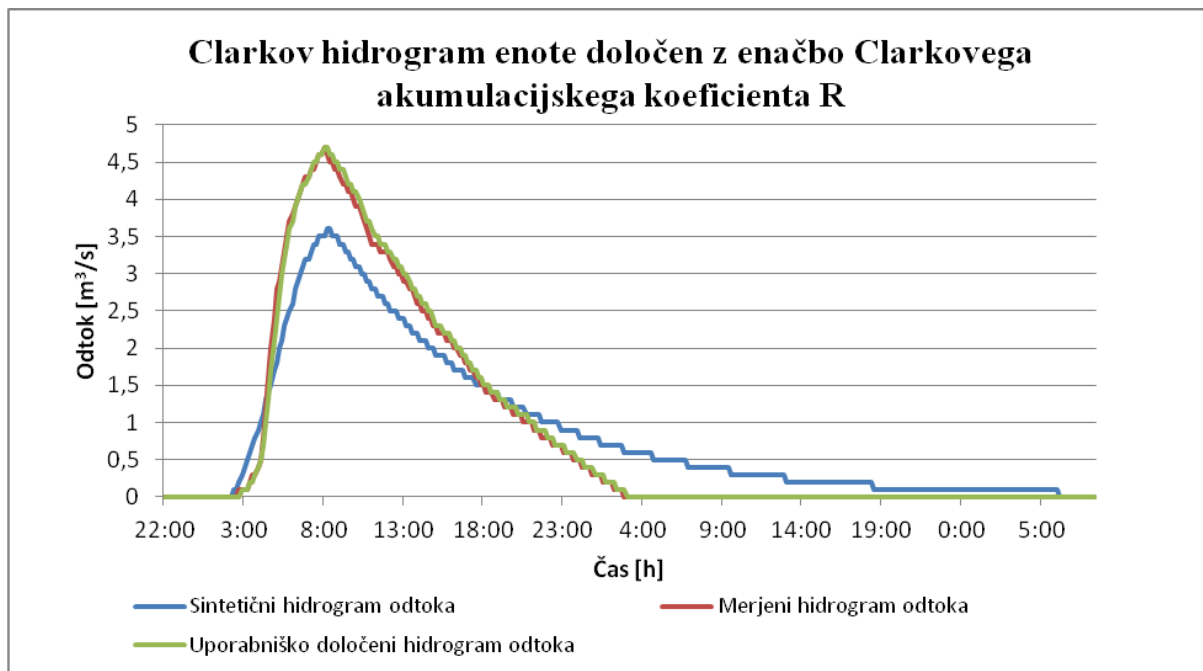
Z seštevkem enačb Kerby, Carter in Van Sickle smo izračunali celoten čas koncentracije. Vrednost koeficienta  $RMSE = 0,52m^3/s$ , kar je malenkost slabše od zgoraj opisane kombinacije. Maksimalni odtok sintetičnega hidrograma se zgodi eno uro pred maksimalni odtokom merjenega hidrograma in je za  $1,26 m^3/s$  manjši. Poleg vrednosti koeficienta  $RMSE$  so v preglednici 62 prikazani tudi čas in vrednost maksimalnega pretoka ter volumen sintetičnega hidrograma enote. Primerjava sintetičnega in merjenega hidrograma enote je grafično prikazana na sliki 48. Na grafu je prikazan tudi uporabniško določeni hidrogram odtoka.



Slika 48: Primerjava Clarkovega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametra  $T_c$  izračunana po kombinaciji enačb Kerby, Carter in Van Sickle

Primerjava sintetičnega hidrograma enote z merjenim s pomočjo seštevka enačb za izračun koeficienta  $T_c$  Kerby, Zvezna uprava za letalstvo in Van Sickle nam ne poda dobrih rezultatov. Vrednost koeficienta  $RMSE = 0,55\text{m}^3/\text{s}$ . Iz vrednosti koeficienta  $RMSE$  razberemo, da je obravnavana kombinacija slabša od ostalih dveh, ki smo jih opisali v zgornjih dveh odstavkih. Maksimalni odtok sintetičnega hidrograma se zgodi ob 6:40 pred merjenim hidrogramom odtoka. Maksimalni odtok sintetičnega hidrograma je tudi v tem primeru za  $1,26\text{ m}^3/\text{s}$  manjši v primerjavi z merjenim hidrogramom.

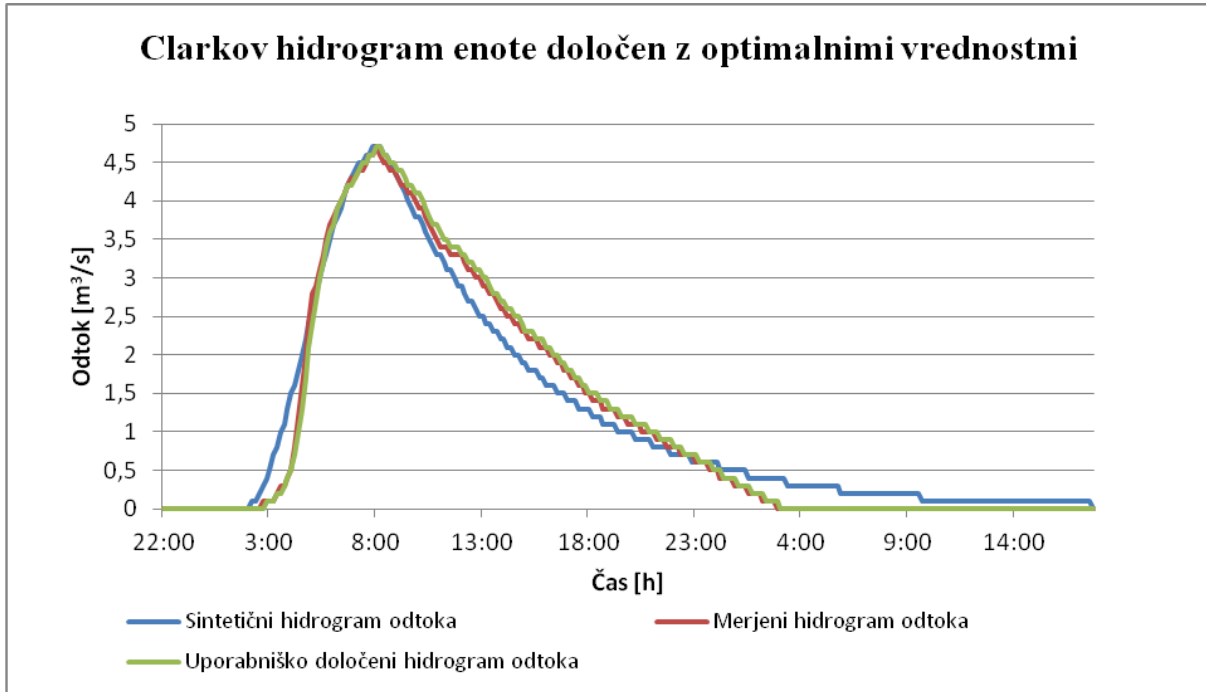
Metoda Clark-ovega akumulacijskega koeficienta povodja  $R$  za izračun parametra časa koncentracije je ena izmed najbolj enostavnih. Izmed Clark-ovih enačb, ki so obravnavane v diplomski nalogi, omenjena enačba računa celoten čas koncentracije, tj. tako površinski kot kanalski tok. Enačba poleg parametra najdaljše poti po povodju vsebuje še parameter padeč struge ter koeficient neprepustnosti. Iz preglednice 62 je razvidno, da se je zgodil maksimalni odtok sintetičnega hidrograma enote le dvajset minut kasneje kot maksimalni odtok merjenega hidrograma. Z izračunom vrednosti koeficienta  $RMSE = 0,46\text{m}^3/\text{s}$  lahko kaj hitro ugotovimo, da nam metoda Clarkovega akumulacijskega koeficienta  $R$  podaja najboljše rezultate, kar je razvidno iz preglednice 62 in grafičnega prikaza na sliki 49.



Slika 49: Primerjava Clarkovega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim hidrogramom enote – vrednost parametra  $T_c$  izračunana z enačbo Clarkovega akumulacijskega koeficienta R

Najslabšo primerjavo sinetičnega hidrograma enote z merjenim dobimo v primeru, ko izračunamo celotni čas koncentracije  $T_c$  s pomočjo enačbe Melching in Marquardt. Melching in Marquardt sta podala dve enačbi, za primerjavo pa smo uporabili enačbo 55. Enačba poleg parametrov površine povodja in odstotek neprepustnih površin, vključuje še debelino efektivnih padavin. Maksimalni odtok se v tem primeru zgodi kar 12:30 ur kasneje kot merjeni odtok. Prav tako je zelo velika razlika maksimalnega odtoka, ki za odtok sinetičnega hidrograma znaša  $0,4\text{m}^3/\text{s}$ , za odtok merjenega hidrograma enote pa kar  $4,66\text{m}^3/\text{s}$ . Vrednost koeficienta RMSE znaša  $0,76\text{m}^3/\text{s}$ .

S pomočjo modela HEC-HMS smo modelirali tudi optimalni sinetični hidrogram enote (Slika 50). V tem primeru se je optimalno vrednost koeficienta  $T_c$  in R določilo s kalibracijo. Optimalna vrednost koeficienta  $T_c$  znaša 6,5 ur ter akumulacijskega koeficienta R je 7,3 ure. RMSE koeficient znaša  $0,26\text{m}^3/\text{s}$ . Z optimalnimi vrednostmi parametrov se maksimalni odtok pojavi ob enakem času kot odtok merjenega hidrograma. Maksimalni odtok sinetičnega hidrograma je za  $0,04\text{m}^3/\text{s}$  večji, volumen pa za 0,03 mm večji v primerjavi z merjenim hidrogramom.



Slika 50: Primerjava Clarkovega hidrograma enote z merjenim in uporabniško določenim HE – optimalna vrednost  $T_c$  in  $R$

V vseh primerih se je za izračun koeficienta  $R$  izračunalo s pomočjo enačbe 54. Le v primeru modeliranja sintetičnega hidrograma enote z enačbo Melching in Marquardt, se je uporabilo enačbo 56, ki sta jo razvila prav Melching in Marquardt (Straub in sod., 2000).

## 11 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi je predstavljena uporaba in primerjava merjenega in sintetičnega hidrograma enote pri hidrološkem modeliranju. Izdelan in umerjen je hidrološki model za primer porečja Trebuščice.

V prvem delu naloge so predstavljene teoretične osnove hidrograma enote. Podan je natančen pregled vplivnih dejavnikov in metode izdelave hidrograma enote. Hidrogram enote je lahko izdelan iz meritev, ob pomanjkanju le-teh pa se poslužujemo metod sintetičnih hidrogramov enote. V nalogi so sistematično predstavljene najpogosteje uporabljene metode sintetičnega hidrograma enote

V drugem delu naloge je izdelan in umerjen hidrološki model Trebuščice. Model je bil umerjen glede na izbrane podatke o izmerjenem vodostaju na vodomerni postaji Trebuša ter padavinskih podatkih izmerjenih na padavinskih postajah Vojsko, Kal nad Kanalom in Lokve. Za umerjanje sta bili izbrani dve padaviski situaciji 11. 7. 2000 in 18. 7. 2008. Pri samem umerjanju modela lahko območja, na katerih imamo na razpolago dobre podatke o padavinah in pretokih, zelo natančno umerimo. Z umerjenim modelom se je nato izdelala natančna anlaiza in primerjava različnih sintetičnih hidrogramov enote. Tako kot obstajajo različna porečja, so tudi podatki za modeliranje zelo različni oz. je obseg le teh od porečja do porečja drugačen. Na porečjih, kjer imamo merjene podatke, lahko hidrogram enote določimo iz meritev. V kolikor pa želenih podatkov nimamo na voljo, kar je pogost pojav predvsem pri manjših, nemerjenih porečjih, pa se za transformacijo efektivnih padavin v odtok uporabijo metode sintetičnih hidrogramov enote. Za izdelavo sintetičnih hidrogramov enote smo uporabili metode Snyder, SCS in Clark.

Če povzamemo, se lahko s sintetičnimi metodami, ki so podane v nalogi določi čas zakasnitve in čas koncentracije, ki sta ključnega pomena za določanje hidrograma enote. Njuna določitev je v nekaterih primerih precej komplicirana zaradi velike potrebe po podatkih. Poleg tega imajo posamezni modeli določene omejitve (velikost porečja, naklon itd.), ki ustrezajo pogojem porečij, za katere so bile določene empirične enačbe izdelane. Sintetični modeli so zato primerni le za nemerjena porečja ter za merjenje vplivov površinskih sprememb na pretočne lastnosti. Veliko enostavneje in natančneje je določiti hidrogram enote na podlagi meritev padavin in odtoka, vendar pa ti podatki velikokrat niso na voljo.

Primerjavo merjenega hidrograma enote s pomočjo uporabniško določenega hidrograma in sintetičnega hidrograma enote se je izvedlo s pomočjo hidrološkega modela HEC-HMS. Iz rezultatov vidimo, da se hidrogrami enote za primer porečja Trebuščice z uporabo različnih metod med seboj razlikujejo. Razlike so posledica različnih vhodnih podatkov ter pogojev, ki jih določene enačbe zajemajo in na osnovi katerih so bile enačbe tudi izdelane. Lahko rečemo, da sta si metodi Snyderja in



---

Clarka podobni. Če pogledamo Snyderjev in Clarkov hidrogram enote z vnešenimi optimalnimi vrednostmi parametrov vidimo, da se grafa popolnoma lepo skladata. Grafa imata tako skupen vrh in volumen odtoka. SCS hidrogram odtoka pa glede na ostala dva precej izstopa. Znotraj Snyderjeve metode poda najboljše rezultate enačba Bell in Kerr. Med Clarkovimi metodami pa nam najboljše rezultate ujamenja merjenega in sintetičnega hidrograma poda enačba Clarkovega akumulacijskega koeficienta porečja.

Za primer Trebuščice je model Snyderjevega sintetičnega hidrograma enote najbolj primeren in natančen za izvajanje transformacije učinkovitih padavin v odtok, ko nimamo na voljo dovolj podatkov in sicer z enačbo Bella in Kerra. Dobre rezultate dobimo tudi z metodo Clarka in sicer z enačbo Clarkovega akumulacijskega koeficienta  $R$ . Seveda pa teh ugotovitev ne moremo posploševati, saj lastnosti porečij bistveno vplivajo na hidrogram enote in obnašanje samega odtoka. V ta namen bi bilo potrebno podobne študije izdelati za več podobnih primerov in potem skušati iskati skupne značilnosti.

## 12 VIRI:

### 12.1 Seznam uporabljene literature

ARSO, 2007, Atlas okolja.

[http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas\\_Okolja\\_AXL@Arso](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso) (Pridobljeno 7. 5. 2011.)

Basham, D. L., Dr. Wright, J. W., Ferguson, K. I., Dr. Moy, G. W. 2006. Surface drainage design, Advisory Circular 150/5320-56: 416 str.

Brilly, M. in Šraj, M. 2006. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC – HMS. Ljubljana, UL, FGG: 172 str.

Bruen, M., Asce, M., Yang, J. 2006. Combined Hydraulic and Black-Box Models for Flood Forecasting in Urban Drainage Systems. Journal of hydrologic engineering, Vol. 9/10: 589-596.

Center za pedologijo in varstvo okolja (CPVO), Pedološka karta Slovenije 1:25.000.

[http://stari.bf.uni-lj.si/cpvo/Novo/SF\\_PodatkiTalSlovenije.htm](http://stari.bf.uni-lj.si/cpvo/Novo/SF_PodatkiTalSlovenije.htm) (Pridobljeno 23. 4. 2011.)

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, W. L. 1988. Applied Hydrology. Civil engineering series: 588 str.

<http://www.scribd.com/doc/29283580/Applied-Hydrology-by-Ven-Te-Chow-David-R-maidment-Larry-W> (Pridobljeno 25. 9. 2010.)

Cretu, G., Nagy, C., Boncia, F. Hydrograph/Hydrological processes: Chapter 8.

[http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod\\_1a/chapt\\_8/main.htm](http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1a/chapt_8/main.htm) (Pridobljeno 2. 11. 2009.)

Environmental Modeling Systems, Inc. (EMS-I), 2011. South Jordan.

[http://www.ems-i.com/wmshelp/Hydrologic\\_Models/Calculators](http://www.ems-i.com/wmshelp/Hydrologic_Models/Calculators) (Pridobljeno 12. 2. 2011.)

Fang, X., Cleveland, T., Garcia, C. A., Thompson, D., Malla, R. 2005. Literature review on timing parameters for hydrographs. Report 0-4696-1, Lamar Univeristy, Beamont, Texas: 72 str.

Fang, X., Pradhan, P., Malla, R., Cleveland, T., Thompson, D. 2006. Estimating time of concentration for Texas watersheds. Lamar Univerity, University of Huston, Texas Tech University. Chapter 3: Str. 465-476.

Frantar P. 2005. Pretočni režimi slovenskih rek in njihova spremenljivost. Ujma, revija za vprašanja varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami 2005, Vol. 19: 145-153.

Green, J. I. in Nelson, E. J. 2002. Journal of Hydroinformatics. Calculation of time of concentration for hydrologic design and analysis using geographic information system vector objects. Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, Provo: 75-81.

Knox County, Knox County Tennessee Stormwater Management Manual. Knoxville, TN 37917. Vol. 2: Chapter 3: 76 str.

<http://www.knoxcounty.org/stormwater/pdfs/vol2/Vol2%20Chap%203%20Stormwater%20Hydrology.pdf> (Pridobljeno 15. 7. 2010.)

Krajevna skupnost Gorenja Trebuša. 2007.

<http://www.trebusa.si/GorenjaTrebu%C5%A1a/Predstavitev/Fizi%C4%8Dnogeografskaoznaka/tabid/907/Default.aspx> (Pridobljeno 06. 04. 2011.)

McCuen, R. H., Johnson, P. A., Ragan, R. M. 2002. Highway Hydrology: 392 str.

<http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013248.pdf> ( Pridobljeno 22. 4. 2010)

Melching, C. S., Marquardt, J. S. 1997. Equations for Estimating Synthetic Unit-Hydrograph Parameter Values for Small Watersheds in Lake County. Illinois, U.S. Geological Survey, Open file report 96-474: 49 str.

MOP ARSO. 2009. Meterološki letopis 2009

[http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/meteorolo%C5%A1ki%20letopis/meteoroloski\\_letopisi.htm](http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/meteorolo%C5%A1ki%20letopis/meteoroloski_letopisi.htm)

(Pridobljeno 3. 7. 2011.)

MOP ARSO. 2008. Vodna bilanca Slovenije 1971–2000: 89 str.

[http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodotoki\\_bilanca.html](http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodotoki_bilanca.html)

(Pridobljeno 28. 5. 2011.)

MOP ARSO. 2011. Podatki o padavinah in pretokih (online). Sporočilo za: Tinta, T. 18. 1. 2011. Osebna komunikacija.

Ramírez, J. A. 2000. Prediction and modeling of flood hydrology and hydraulics. V: Wohl, E. E. [Inland Flood Hazards](#). Human, Riparian, and Aquatic Communities. Colorado, Colorado State University, Hydrologic and Environmental Sciences Civil Engineering Department: str. 1-53 str.

Singh, V. P. 1984. Mathematical models for ungaged watersheds with potential for quantifying the effect of land use changes on streamflow. Technical completion report, Louisiana State University Baton Rouge: 143 str.

Sovre, K. 2009. Hidrološka študija visokih voda Bistrice v porečju Sotle. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva: 113 str.

Straub, T. D., Melching, C. S., in Kocher, K. E. 2000. Equations for estimating Clark Unit-Hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois. Water-Resources Investigations Report 00-4184, Urbana, Illinois, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey: 30 str.

The COMET<sup>®</sup> Program, 2005. Basic Hydrologic Science Course; Unit Hydrograph Theory [http://www.meted.ucar.edu/hydro/basic/UnitHydrograph/print\\_version/print\\_index.htm](http://www.meted.ucar.edu/hydro/basic/UnitHydrograph/print_version/print_index.htm) (Pridobljeno 12. 3. 2010.)

## 12.2 Seznam ostale literature

Doodge, J. C. I. 1959. A general theory of the unit hydrograph, Journal of Geophysical Research, Vol. 64,2: 241-256.

Fang, X., Prakash, K., Cleveland, T., Thompson, D., Pradhan, P. 2005. Revisit of NRCS unit hydrograph procedures. V: Proceeding of the American Society of Civil Engineers Texas Section Spring Meeting in Austin: 21 str.

Han, D. 2010. Concise Hydrology: 145 str.  
<http://bookboon.com/en/textbooks/energy-environment/concise-hydrology> (Pridobljeno 17. 5. 2010)

Harm, C. T., Barfield, B. J., Hayes, J. C. 1994. Design hydrology and sedimentology for small chatcments. San Diego, Academic: 588 str.

Hecker., E. G. 1996. Handbook hydrology, ManagementGroup D of the American Society of Civil Engineers Technical Activitiey Commitee, USA, American society of Civil Engineers: 786 str.

---

McCuen, R. H. 1998. Hydrology analysis and design, University of Maryland, Prentice Hall: 814 str.

Nash, J. E. 1959. Synthetic determination of unit parameters, J.Geogys. Res., Vol. 64,1: 111-115.

Ardis, C. V. 1972. A storm-hydrograph model for the response and variation of small rural watersheds. Doktorska naloga. Madison, Wisconsin, The university of Wisconsin.

Bernard, M. 1935. An approach to determinate stream flow. Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 68: 115-139.

Commons, G. G. 1942. Flood hydrographs. Civil Engineering, Vol. 12,10: 571-572.

Espey, W. H., Morgan, C. W., in Masch, F. D. 1966. A study of some effects of urbanization on storm runoff from a small watershed. Austin, Texas, Texas Water Development Board: 3 str.

Espey, W. H., Altman, D. G. 1978. Nomographs for ten- minute unit hydrographs for small urban watersheds. Washington D.C., Environmental Protection Agency. EPA-600/9-78-035: 35 str.

Advisory circular on airport drainage. 1970. Department of Transportation. Rep. A/C 150-5320-5B. Washington, D.C., Federal Aviation Administration.

Jarvis, C. S. 1935. Discussion of an approach to determinate stream flow. Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 100, 363-365.

Kerby, W. S. 1959. Time of concentration for overland flow. *Civil Engineering*. Vol. 29, 3, 174 str.

O'Kelly, J. J. 1955. The employment of the unit hydrographs to determine the flows of Irish arterial drainage channels. Proceedings of the Institution of Civil Engineers (Ireland), Vol. 4, 3: 365-412.

Overton, D. E., Meadows, M.E. 1976. Stormwater Modeling. Academic Press, Newyork: 358 str.

Ponce, V.M., 1989. Engineering Hydrology, Principles and Practices. New Jersey, San Diego State University: 640 str.

Ramser, C. E. 1927. Runoff from small agricultural areas. Journal of Agricultural Research, Vol. 34: 797-823.

Salami<sup>1</sup>, A. W., Bilewu<sup>1</sup>, S.O., Ayanshola, A.M., Oritola, S.F. 2009. Evaluation of synthetic unit hydrograph methods for the development of design storm hydrographs for Rivers in South-West, Nigeria. *Journal of American Science*, 2009. Ilorin, Nigeria, University of Ilorin: 9 str.

Simas, M. J., and R. H. Hawkins. 2002. Lag time characteristics in small watersheds in the United States. *Proceeding of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, Nevada.

Taylor, A. B., Schwarz, H.E. 1952. United hydrographs lag and peak flow related to basin characteristics. *Transaction, American Geophysical Union*, Vol. 33: 235-246.

U.S. Army Corps of Engineers. 1940. *Engineering construction-flood control*. Virginia. Engineering School, Fort Belvoir.

Van Sickle, D. 1962. The effects of urban development on storm runoff. *The Texas Engineer*. Vol. 32,12: 23-27.

Viessman, W., Jr., Lewis, G.L., Knapp, J.W. 1989, *Introduction of hydrology*, third edition: New York, Harper and Row, Publishers, 780 str.