

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Kohne, B., 2014. Uporaba programa R za hidrološko modeliranje. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentor Brilly, M.): 89 str.

Datum arhiviranja: 02-09-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Kohne, B., 2014. Uporaba programa R za hidrološko modeliranje. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Brilly, M.): 89 pp.

Archiving Date: 02-09-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM VODARSTVO IN
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidat:

BLAŽ KOHNE

**UPORABA PROGRAMA R ZA HIDROLOŠKO
MODELIRANJE**

Diplomska naloga št.: 240/VKI

THE USE OF R FOR HYDROLOGICAL MODELLING

Graduation thesis No.: 240/VKI

Mentorica:

doc. dr. Mojca Šraj

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Somentor:

prof. dr. Mitja Brilly

Član komisije:

prof. dr. Franc Steinman

prof. dr. Matjaž Mikoš

Ljubljana, 28. 08. 2014

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

| Stran z napako | Vrstica z napako | Namesto | Naj bo |
|----------------|------------------|---------|--------|
|----------------|------------------|---------|--------|

IZJAVE

Podpisani BLAŽ KOHNE izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Uporaba programa R za hidrološko modeliranje«.

Izjavljam, da je elektronska različica enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 1.7.2014

Blaž Kohne

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN

| | |
|-------------------------|---|
| UDK: | 556.1:004(497.4)(043.2) |
| Avtor: | Blaž Kohne |
| Mentorica: | doc. dr. Mojca Šraj |
| Somentor: | prof. dr. Mitja Brilly |
| Naslov: | Uporaba programa R za hidrološko modeliranje |
| Tip dokumenta: | Dipl. nal. –UNI |
| Obseg in oprema: | 89 str., 11 pregl., 34 sl., 54 en. |
| Ključne besede: | hidrološko modeliranje, R, TOPMODEL, HBV, IHACRES, Green-Amptova metoda, statistična ocena in validacija |

Izvleček

Namen naloge je predstaviti orodje R, teoretično podlago hidrološkega modeliranja in samega hidrološkega modeliranja v programu R.

Program R je prosto dostopen, zato je njegova uporaba zelo razširjena. V osnovi je namenjen statističnim in matematičnim izračunom, vendar s pomočjo nekaterih razširitev, imenovanih paketi, lahko postane sposobno orodje tudi za hidrološko modeliranje. Zaradi odprtosti in široke uporabe, je na voljo ogromno paketov, ki omogočajo raznovrstno uporabo tudi v drugih strokah.

Naloga je sestavljena iz več sklopov, ki predstavijo hidrološko modeliranje, teoretično osnovo treh različnih hidroloških modelov ter pomen in teoretično osnovo kriterijev učinkovitosti.

V praktičnem delu naloge je prikazan postopek izdelave hidroloških modelov v programu R za porečje Glinščice, predstavitev ter analiza rezultatov. Za boljše razumevanje rezultatov in poznavanja posameznega hidrološkega modela je v nalogi predstavljena tudi kratka analiza občutljivosti posameznega modela ter ocena modela z osmimi različnimi kriteriji, ločeno za obdobje umerjanja ter obdobje validacije.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDK: 556.1:004(497.4)(043.2)

Author: Blaž Kohne

Supervisor: Assist. Prof. Mojca Šraj, Ph.D.

Cosupervisor: Prof. Mitja Brilly, Ph.D.

Title: The use of R for hydrological modelling

Document type: Graduation Thesis – University studies

Notes: 89 p., 11 tab., 34 fig., 54 eq.

Key words: hydrologic modelling, R, TOPMODEL, HBV , IHACRES,
Green-Ampt method, statistical evaluation and validation

Abstract:

The goal of this thesis is to introduce R as a software tool, the basic theory behind hydrological modelling and hydrological modelling in R itself.

The software is freely available, therefore its user base is very wide. In its basic form it is used for statistical and mathematical computing, but with a help of a few add-ons, called packages, it can be a capable tool for hydrological modelling. Because of its open-source nature and wide user base, there are many add-ons available, which enabled its multi-professional usage.

The thesis is devised of plural chapters, which introduce the concept of hydrological modelling, theoretical basis of three different hydrological models and the meaning and theory behind criteria of efficiency.

In the practical part the procedure of creating hydrological models by using R software for Glinščica river basin and analysis of the results are presented. For better understanding of the results and individual hydrological model the thesis includes also short sensitivity analysis and evaluation with eight different efficiency criteria separately for calibration and validation period.

ZAHVALA

Zahvaljujem se doc. dr. Mojci Šraj za pomoč pri izdelavi diplomske naloge in vsem, ki so me podpirali v času študija.

KAZALO VSEBINE

| | |
|---|-----------|
| BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN..... | III |
| BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION | IV |
| ZAHVALA..... | V |
| KAZALO VSEBINE..... | VI |
| KAZALO PREGLEDNIC..... | X |
| KAZALO SLIK..... | XI |
| KAZALO PRAKTIČNIH PRIMEROV V PROGRAMU R..... | XIII |
| | |
| 1 UVOD | 1 |
| | |
| 2 PREDSTAVITEV PROGRAMA R..... | 2 |
| 2.1 Dostopnost..... | 2 |
| 2.2 Začetek novega projekta..... | 3 |
| 2.2.1 Vektorji in matrike..... | 3 |
| 2.3 Program R in paketi..... | 5 |
| 2.4 Pomembnejše osnovne funkcije | 6 |
| 2.4.1 Določanje delovne mape in shranjevanje/branje datotek | 7 |
| 2.4.2 Risanje grafov..... | 7 |
| 2.4.2.1 Ukazi na prvi ravni | 8 |
| 2.4.4.2 Funkcije na drugi ravni..... | 9 |
| 2.4.4.3 Interaktivne funkcije..... | 9 |
| | |
| 3 HIDROLOŠKO MODELIRANJE S PROGRAMOM R..... | 10 |
| 3.1 Uvod v hidrološko modeliranje | 10 |
| 3.1.1 Komponente odtoka..... | 11 |
| 3.2 Semi-distribuiran hidrološki model TOPMODEL | 13 |
| 3.2.1 Teoretična predstavitev TOPMODEL-a..... | 13 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.2 | Green-Ampt-ov infiltracijski model..... | 20 |
| 3.2.2.1 | Splošno o modelu Green-Ampt..... | 20 |
| 3.2.2.2 | Darcy-jev zakon | 20 |
| 3.2.2.2 | Green-Ampt v programu R (TOPMODEL) | 21 |
| 3.2.2.3.1 | Morel-Seytoux in Khanji model..... | 25 |
| 3.2.3 | FAO Penman-Monteith metoda za izračun potencialne evapotranspiracije | 25 |
| 3.3 | Konceptualni točkovni model za padavinski odtok..... | 26 |
| 3.3.1 | Paket <i>TUWmodel</i> | 26 |
| 3.3.2 | Model HBV | 27 |
| 3.3.2.1 | Model taljenja snežne odeje | 28 |
| 3.3.2.2 | Model vlažnosti zemljine | 29 |
| 3.3.2.3 | Odzivna in transportna funkcija | 30 |
| 3.3.2.4 | Parametri modela..... | 31 |
| 3.4 | Empirični model IHACRES..... | 31 |
| 3.4.1 | Paket <i>hydromad</i> | 32 |
| 3.4.2 | SMA metoda za določitev efektivnih padavin | 33 |
| 3.4.2.1 | Faktor primanjkljaja vlažnosti v porečju (<i>CMD</i>) | 33 |
| 3.4.2.2 | Indeks vlažnosti porečja (<i>CWI</i>)..... | 35 |
| 3.4.3 | Usmerjevalna komponenta..... | 35 |
| 3.4.3.1 | Metoda enotnega hidrograma (<i>EXPUH</i>)..... | 35 |
| 4 | OCENA UČINKOVITOSTI MODELOV | 37 |
| 4.1 | Paket <i>hydroGOF</i> | 37 |
| 4.1.1 | Koeficient determinacije | 38 |
| 4.1.2 | Indeks strinjanja | 39 |
| 4.1.2.1 | Relativni indeks strinjanja..... | 39 |
| 4.1.2.2 | Modificiran indeks strinjanja..... | 40 |
| 4.1.3 | Nash-Sutcliffe-ova učinkovitost..... | 40 |
| 4.1.3.1 | Relativni Nash-Sutcliffe..... | 41 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.1.3.2 | Modificiran Nash-Sutcliffe | 41 |
| 4.1.4 | Odstotek korekcije | 42 |
| 5 | OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA..... | 43 |
| 5.1 | Geografke in hidrografske značilnosti | 43 |
| 5.2 | Topografija in raba tal | 44 |
| 5.2.1 | Topografija in geologija | 44 |
| 5.2.2 | Raba tal | 45 |
| 5.3 | Podnebje | 47 |
| 5.4 | Hidrologija..... | 47 |
| 6 | IZDELAVA HIDROLOŠKIH MODELOV S PROGRAMOM R..... | 48 |
| 6.1 | Vhodni podatki | 48 |
| 6.2 | Izdelava semi-distribuirnega fizičnega modela TOPMODEL za porečje Glinščice | 49 |
| 6.2.1 | Priprava topografskih podatkov..... | 49 |
| 6.2.2 | Določitev porečja in odtočne točke | 52 |
| 6.2.3 | Identifikacija rečnih teles in določitev oddaljenosti od odtočne točke | 54 |
| 6.2.4 | Umerjanje modela ter simulacija | 56 |
| 6.2.5 | Rezultati in analiza | 59 |
| 6.2.5.1 | Rezultati za posamezne komponente odtoka (TOPMODEL)..... | 62 |
| 6.2.6 | Analiza občutljivosti parametrov..... | 63 |
| 6.3 | Izdelava konceptualnega točkovnega modela HBV za porečje Glinščice..... | 64 |
| 6.3.1 | Priprava vhodnih podatkov..... | 64 |
| 6.3.2 | Umerjanje in simulacija..... | 64 |
| 6.3.3 | Rezultati in analiza | 66 |
| 6.3.3.1 | Rezultati posameznih komponent odtoka (HBV)..... | 67 |
| 6.3.4 | Analiza občutljivosti parametrov..... | 68 |
| 6.4 | Izdelava empiričnega modela IHACRES za porečje Glinščice..... | 70 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.4.1 | Priprava vhodnih podatkov | 71 |
| 6.4.2 | Umerjanja in simulacija..... | 71 |
| 6.4.3 | Rezultati | 72 |
| 6.4.3.1 | Rezultati za metodo <i>CWI</i> in usmerjevalno komponento expuh | 72 |
| 6.4.3.2 | Rezultati za metodo <i>CMD</i> in usmerjevalno komponento expuh..... | 74 |
| 6.4.4 | Analiza občutljivosti | 77 |
| 6.4.4.1 | Metoda <i>CWI</i> | 78 |
| 6.4.4.2 | Metoda <i>CMD</i> | 78 |
| 7 | ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV | 80 |
| 7.1 | Primerjava simuliranih površinskih odtokov | 82 |
| 7.2 | Primerjava simuliranih podpovršinskih odtokov | 83 |
| 8 | ZAKLJUČKI | 84 |
| | VIRI..... | 85 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|---|----|
| Preglednica 1: Drugačne variante uporabe funkcije plot..... | 8 |
| Preglednica 2: Najpomembnejši argumenti v grafičnih funkcijah na prvi ravni | 8 |
| Preglednica 3: Šifrant podpovodij Glinščice na 6.ravni (Šraj, 2000) | 47 |
| Preglednica 4: Prikaz umerjenih parametrov modela Glinščice (TOPMODEL) | 59 |
| Preglednica 5: Rezultati kriterijev učinkovitosti (TOPMODEL) | 59 |
| Preglednica 6: Prikaz izbranih parametrov hidrološkega modela HBV za porečje Glinščice..... | 65 |
| Preglednica 7: Prikaz rezultatov kriterijev učinkovitosti..... | 66 |
| Preglednica 8: Prikaz izbranih parametrov za metodo <i>CWI</i> | 71 |
| Preglednica 9: Prikaz izbranih parametrov za metodo <i>CMD</i> | 72 |
| Preglednica 10: Prikaz rezultatov kriterijev učinkovitosti za metodi <i>CWI-Expuh</i> | 74 |
| Preglednica 11: Prikaz rezultatov kriterijev učinkovitosti za metodi <i>CMD-Expuh</i> | 75 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1: Namestitev novih paketov v programu R | 5 |
| Slika 2: Hidrološki krog (prirejeno po Brilly in Šraj, 2005) | 10 |
| Slika 3: Primer prikaza posameznih komponent odtoka (prirejeno po Styles in Burt, 1999) | 12 |
| Slika 4: Splošni prikaz topografskega indeksa (prirejeno po Fogleman, 2009) | 14 |
| Slika 5: Prikaz delovanja TOPMODEL-a (prirejeno po Shaman in sod., 2002) | 15 |
| Slika 6: Splošni prikaz HBV modela (prirejeno po Uhlenbrook in sod., 1999) | 27 |
| Slika 7: Shematski prikaz delovanja modela IHACRES (prirejeno po Kokkonen in Jakeman, 2001) . | 32 |
| Slika 8: Prikaz reliefa porečja Glinščice z vodotoki (ARSO, 2014), razvodnicami ter šifrantom padavinskega območja (Šraj, 2000) | 44 |
| Slika 9: Prikaz nadmorskih višin obravnavanega območja | 45 |
| Slika 10: Prikaz rabe tal (ARSO, 2014) | 46 |
| Slika 11: Prikaz vhodnih podatkov | 48 |
| Slika 12: Postopek določitve računskega porečja Glinščice | 50 |
| Slika 13: Prikaz razlike med obdelanimi višinami in neobdelanimi višinami | 51 |
| Slika 14: Prikaz vrednosti topografskih indeksov za posamezno celico porečja Glinščice | 52 |
| Slika 15: Prikaz iskanja odtočne točke s prispevnimi površinami | 53 |
| Slika 16: Prikaz računskega porečja Glinščice | 54 |
| Slika 17: Prikaz rečnih teles | 55 |
| Slika 18: Histogram oddaljenosti posameznih celic od odtočne točke porečja | 56 |
| Slika 19: Prikaz postopka umerjanja modela Glinščice (TOPMODEL) | 58 |
| Slika 20: Simulirani in merjeni odtok hidrološkega modela Glinščice s programom TOPMODEL | 61 |
| Slika 21: Simuliran odtok razdeljen na komponente (TOPMODEL) | 62 |
| Slika 22: Vpliv parametra transmisivnosti m na odtok | 63 |
| Slika 23: Prikaz merjenega in simuliranega odtoka z modelom HBV za porečje Glinščice | 67 |
| Slika 24: Prikaz simuliranega odtoka, razdeljenega na posamezne komponente (HBV) | 68 |
| Slika 25: Prikaz vpliva parametra $lsuz$ na odtok | 70 |
| Slika 26: Prikaz merjenega in simuliranega odtoka z modelom IHACRES (CWI-Expuh) za porečje Glinščice | 74 |

| | |
|--|----|
| Slika 27: Prikaz merjenega in simuliranega odtoka z modelom IHACRES (<i>CMD-Expuh</i>) za porečje Glinščice | 75 |
| Slika 28: Prikaz vpliva parametra <i>tau_s</i> na odtok | 77 |
| Slika 29: Prikaz vpliva parametra <i>tw</i> na odtok (<i>CWI-Expuh</i>) | 78 |
| Slika 30: Prikaz vpliva parametra <i>e</i> na odtok (<i>CMD-Expuh</i>)..... | 79 |
| Slika 31: Primerjava simuliranih odtokov s porečja Glinščice s štirimi različicami modelov in z merjenimi odtoki | 81 |
| Slika 32: Primerjava povprečnega dnevnega pretoka in simuliranega odtoka z programom SWAT (Kovačec, 2012) | 82 |
| Slika 33: Primerjava simuliranih površinskih odtokov z merjenim celotnim odtokom | 82 |
| Slika 34: Primerjava simuliranih podpovršinskih odtokov z merjenim celotnim odtokom | 83 |

KAZALO PRAKTIČNIH PRIMEROV V PROGRAMU R

| | |
|--|----|
| Primer 1: Definiranje vektorjev in osnovni operatorji | 3 |
| Primer 3: Definicija matrike z osnovnimi matričnimi funkcijami | 4 |
| Primer 2: Tvorba matrike s pripenjanjem vektorjev | 4 |
| Primer 4: Določanje delovnega direktorija in branje/pisanje datotek | 7 |
| Primer 5: Uporaba paketa <i>hydroGOF</i> za izračun učinkovitosti TOPMODEL-a | 38 |
| Primer 6: Priprava topografskih podatkov | 51 |
| Primer 7: Iskanje odtočne točke in določitev računskega porečja | 53 |
| Primer 8: Identifikacija rečnih teles ter izračun oddaljenosti od odtočne točke..... | 55 |
| Primer 9: Vnašanje vhodnih podatkov ter umerjanje modela (TOPMODEL)..... | 57 |
| Primer 10: Postopek definiranja parametrov, simulacija ter prikaz rezultatov | 60 |
| Primer 11: Izdelava hidrološkega modela (HBV)..... | 65 |
| Primer 12: Prikaz izdelave hidrološkega modela z metodama <i>CWI-Expuh</i> | 73 |
| Primer 13: Prikaz izdelave hidrološkega modela z metodama <i>CMD-Expuh</i> | 76 |

1 UVOD

Računalniška programska oprema, kot je R, je sama po sebi le orodje za statistične in matematične izračune, vendar je R program z odprto kodo, kar omogoča vsem uporabnikom, ki želijo, da dodajajo lastne definirane funkcije in nato te funkcije s pomočjo mreže uporabnikov, kot je CRAN (ang. Comprehensive R Archive Network, <http://cran.r-project.org/>), to delijo z drugimi uporabniki, kar močno razširi spekter strokovne uporabe tega programa. Poleg tega je R brezplačni program, kar je že samo po sebi zelo redko in tako se je R iz projekta razvil v veliko knjižnico uporabnih paketov za velik spekter različnih strok.

V nalogi je podrobneje predstavljena le uporaba programa R v namen hidrološkega modeliranja. R, kot samostojen program, ne ponuja velike izbire orodij za hidrološko modeliranje, vendar z razširitvami, t.i paketi, ponuja celo vrsto različnih orodij in tudi drugačnih modelov za hidrološko modeliranje. V nalogi bo predstavljen semi-distribuiran model TOPMODEL v paketu *topmodel*, ki je že integriran v osnovno različico programa R, konceptualni model po vzoru HBV modela, ki je zajet v paketu *TUWmodel*, empirični model po vzoru IHACRES modela, ki pa je zajet v paketu *hydromad* in paket *hydroGOF*, ki je predvsem namenjen statistični obdelavi.

Pomanjkljivost R-a je v njegovi naravi, saj je to program, ki deluje na osnovi ukaznih vrstic, kar nekaterim uporabnikom ne ustreza, saj je posledično uporabniški vmesnik minimalen. To pa je v večji meri odpravljeno z dodatkom grafičnega vmesnika Rstudio, ki uporabniku olajša delo in nudi bolj prijazno okolje za delo. Popularnost in število paketov narašča z vsakim dnem, saj je na CRAN mreži dostopnih več tisoč različnih paketov. V smislu hidrološkega modeliranja pa je v razvoju *Rhydro*, ki bi zajemal večino potrebnih orodij za hidrološko modeliranje, vendar je v tem času še v zgodnji verziji razvoja (Matloff, 2009).

V praktičnem delu naloge je opisana izdelava treh hidroloških modelov v programu R na primeru porečja Glinščice. Izdelava hidroloških modelov je relativno preprosta vendar nastopijo težave pri objektivnem ocenjevanju učinkovitosti modelov ter vpliva subjektivnosti in posledičnih napak. Predstavljeni rezultati kažejo podobno sliko, vendar njihove prednosti in pomanjkljivosti lahko ugotovimo s pomočjo kriterijev učinkovitosti.

2 PREDSTAVITEV PROGRAMA R

R je program za statistične izračune in grafično predstavitev, ki je bil razvit v okviru GNU projekta, in je podoben jeziku S, razvitem v laboratoriju Bell-a (včasih AT&T sedaj Lucent technologies), razvil pa ga je John Chambers s kolegi (Matloff, 2009).

R ponuja veliko statističnih operacij (linearno in nelinearno modeliranje, standardne statistične teste,...), grafičnih tehnik in je poleg tega močno fleksibilen ter omogoča razširjanje. Prednost R-a predstavlja preprostost ob ustvarjanju različnih grafov in njihovih variant, ki so primerni tudi za tisk. R je integrirano okolje programske opreme za manipulacijo podatkov, izračune, analizo in grafično predstavitev. Omogoča in vsebuje (R-project, 2013):

- efektivno ravnanje in shranjevanje podatkov,
- veliko število operatorjev za izračune,
- veliko, integrirano in koherentno kolekcijo orodij za podatkovno analizo,
- grafične funkcije za podatkovno analizo in za prikaz na zaslonu ali pa na fizičnem sredstvu
- dobro razvit, preprost in učinkovit programski jezik ki vključuje logične pogoje, zanke in uporabniško definirane vhodne in izhodne funkcije

R je zasnovan na osnovi programskega jezika, in dovoljuje uporabnikom dodajanje novih funkcij. Večina sistema R-a je napisana v varianti programskega jezika S, kar omogoča uporabnikom lahko sledenje odločitvam v algoritmu. Za zahtevnejše funkcije je omogočena uporaba programskih jezikov C, C+ in Fortran (Matloff, 2009).

Veliko uporabnikov pojmuje R kot statistični program, vendar je v resnici to bolj "okolje", v katerega integriramo statistične funkcije. R se da hitro in preprosto razširiti s t.i "paketi", ki so v večini brezplačni in so dostopni vsakemu na CRAN in sorodnih spletnih straneh, katerih namestitev je preprosta in prijazna uporabniku.

2.1 Dostopnost

R je dostopen kot brezplačni program (<http://www.r-project.org/>) vsem v skladu s pogoji uporabe pogoji (ang. *Free Software Foundations GNU General Public License*). V svoji izvorni kodi deluje na večini UNIX platform (Linux, FreeBSD, MS Windows in Mac-OS) (R project, 2013).

2.2 Začetek novega projekta

Preden začnemo nov projekt, je priporočljivo, da po namestitvi osnovnega programa R, namestimo še brezplačni program Rstudio, ki predstavlja grafični vmesnik. Za začetek nove delovne seje zaženemo R in pod orodno vrstico "File" kliknemo "New". Če pa želimo začeti nov projekt pa pod zavihkom "Session" kliknemo "New Project".

2.2.1 Vektorji in matrike

Vektorje definiramo v ukazni konzoli z imenom vektorja, nato definiramo njegove elemente. Ko je vektor definiran lahko s preprostimi funkcijami operiramo z njim (Matloff, 2009), kot je prikazano v primeru 1, kjer nam funkcija *mean()* poda povprečje in funkcija *sd()* standardno deviacijo.

Primer 1: Definiranje vektorjev in osnovni operatorji

```
> y<-c(2,3,6,8,0,2,1)
> y
[1] 2 3 6 8 0 2 1
> x<-y^2
> x
[1] 4 9 36 64 0 4 1
> v<-2*x+y
> v
[1] 10 21 78 136 0 10 3
> mean(v)
[1] 36.85714
> sd(v)
[1] 51.18733
```

Matrike so tehnično gledano le vektorji z dvema dodatnima parametroma, št.vrstic in št. stolpcev. Pri definiranju matrike moramo biti pazljivi, saj če specifično ne definiramo vseh parametrov, R v osnovi upošteva prednost stolpcev pred vrsticami in podatki se bodo najprej zapisali v stolpcih nato v vrsticah, zato je nujno da ob definiciji matrike definiramo število vrstic (ukaz *nrow()*) in število elementov v posamezni vrstici (ukaz *byrow()*). Matrike pa lahko izdelujemo tudi z združevanjem večjih vektorjev ali pa jih že na začetku definiramo kot matrike, kot bo prikazano v naslednjih dveh primerih (primer 2 in primer 3), kjer vektorje "pripnemo" matriki (funkcija *rbind()*).

Matrike lahko potem s preprostimi ukazi transponiramo (ukaz *t()*), množimo, delimo, naredimo inverz, ali pa če so zadoščeni pogoji, rešimo matriko kot sistem linearnih enačb z funkcijo *solve()*.

Primer 2: Tvorba matrike s pripenjanjem vektorjev

```

> z<-matrix()
> z<-rbind(y)
> z
  [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7]
y    2    3    6    8    0    2    1
> z<-rbind(x)
> z
  [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7]
x    4    9   36   64    0    4    1
> z<-rbind(x,y,x,v)
> z
  [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7]
x    4    9   36   64    0    4    1
y    2    3    6    8    0    2    1
x    4    9   36   64    0    4    1
v   10   21   78  136    0   10    3

```

Primer 3: Definicija matrike z osnovnimi matričnimi funkcijami

```

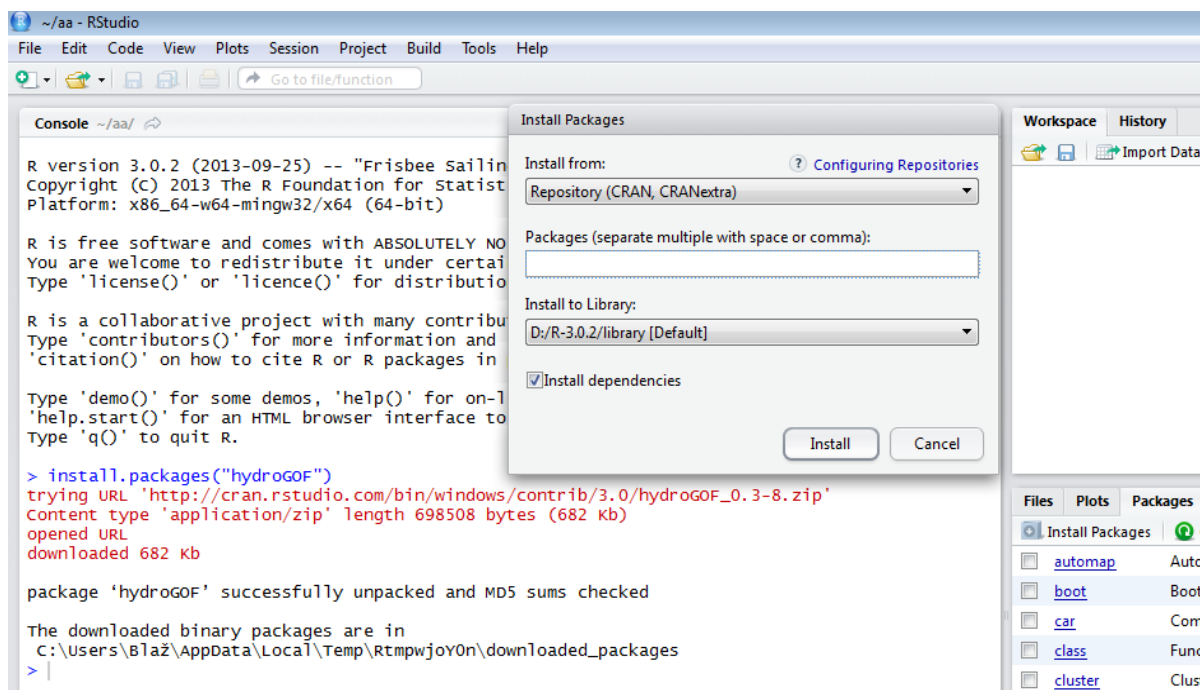
m<-matrix(c(x,y,x,v),nrow=4,byrow=7)
> m
  [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7]
[1,]    4    9   36   64    0    4    1
[2,]    2    3    6    8    0    2    1
[3,]    4    9   36   64    0    4    1
[4,]   10   21   78  136    0   10    3
> C=t(z)
> C
      x y  x  v
[1,]  4 2  4 10
[2,]  9 3  9 21
[3,] 36 6 36 78
[4,] 64 8 64 136
[5,]  0 0  0  0
[6,]  4 2  4 10
[7,]  1 1  1  3
> z^-1
  [,1] [,2] [,3] [,4] [,5] [,6] [,7]
x 0.25 0.11111111 0.02777778 0.015625000 Inf 0.25 1.0000000
y 0.50 0.33333333 0.16666667 0.125000000 Inf 0.50 1.0000000
x 0.25 0.11111111 0.02777778 0.015625000 Inf 0.25 1.0000000
v 0.10 0.04761905 0.01282051 0.007352941 Inf 0.10 0.3333333
> a<-matrix(c(3,13,69,78),nrow=2,byrow=2)
> a
  [,1] [,2]
[1,]    3   13
[2,]   69   78
> solve(a)
  [,1] [,2]
[1,] -0.1176471 0.019607843
[2,]  0.1040724 -0.004524887

```

2.3 Program R in paketi

V diplomski nalogi bodo predstavljene R-ove zmogljivosti in dodatni paketi, ki so v večini namenjeni hidrološkemu modeliranju. R ima že v samem osnovnem programu integriran TOPMODEL, ki predstavlja model za simulacijo odtoka z infiltracijsko metodo Green-Ampt-a. "Paket" *topmodel* vsebuje še nekaj statističnih funkcij za pomoč pri kalibriranju in oceni samih rezultatov. V nalogi je predstavljen tudi paket *hydroTUV* z vgrajenim HBV modelom, ki predstavlja konceptualni točkovni model za padavinski odtok. Poleg teh paketov je predstavljen še paket *hydromad*, ki vsebuje prostorsko točkovni empirični model z dvema komponentama.

Za namen kalibracije in za statistične analize je bil dodan še paket *hydroGOF*, ki je v večini skupek različnih statističnih operatorjev in faktorjev. Za namestitev novih paketov je v sredini desne strani zaslona poseben zavihek "Packages". Ko ga izberemo, se nam odpre majhno okno, v katerega vpišemo ime zelenega paketa (slika 1) in potrdimo. Ko program uspešno namesti paket, nam to sporoči z vrstico v ukaznem oknu "*package successfully unpacked and MD5 sums checked*". Treba je opozoriti, da na ta način lahko namestimo le pakete, ki so dostopni na CRAN mreži.



Slika 1: Namestitev novih paketov v programu R

2.4 Pomembnejše osnovne funkcije

R je polimorfen, kar pomeni, da lahko isto funkcijo uporabimo na različnih objektih, katerih rezultati so prirejeni samemu objektu, to so t.i generične funkcije. R je v osnovi programski jezik za razliko od zbirke diskretnih ukazov, kar pomeni da te funkcije lahko združujemo in vsaka funkcija uporabi rezultate prejšnje funkcije. S tem nam omogoča, da s poznavanjem le osnovnih funkcij lahko gradimo kompleksnejše funkcije.

Vektorji so osnova R, saj je tehnično rečeno za R matrika le vektor z dvema dodanima argumentoma, ki sta število vrstic in stolpcev. Treba je opozoriti, da R ne pozna skalarjev, ampak skalarje jemlje kot vektorje z enim elementom (Venables in sod., 2013).

V R-u nastopajo naslednji objekti:

- Matrike, ki so v bistvu več dimenzionalni vektorji z dodanima argumentoma število vrstic in število stolpcev;
- Faktorji, ki so kompaktni operatorji za kategorične podatke;
- Spiski, zelo splošna oblika vektorja, katerega elementi niso vsi enakega tipa objekta;
- Podatkovni okvirji, strukturno podobni matrikam, vendar so lahko stolpci objekti različnega tipa;
- Funkcije, kategorizirane kot objekti, vendar je njihov namen manipulacija z drugimi objekti.

Ker je R programski jezik, ta zahteva, da za matematične operatorje uporabljamo specifične znake. Potrebno je poznati simbole za različne operacije, saj se lahko razlikujejo glede na vrsto operacije. Osnovni matematični operatorji, ki nastopajo so (Venables in sod., 2013) :

- $x + y$ seštevanje,
- $x - y$ odštevanje,
- $x * y$ množenje,
- x / y deljenje,
- $x ^ y$ eksponentno,
- $x == y$ test enakosti,
- $x <= y$ test za manj ali enako,
- $x >= y$ test za več ali enako.

2.4.1 Določanje delovne mape in shranjevanje/branje datotek

Delovno mapo lahko določimo na dva načina, in sicer, če imamo nameščen grafični vmesnik Rstudio kar preko uporabniškega vmesnika, v osnovni orodni vrstici pod zavihkom " *Session* " izberemo " *Set Working directory* ", ali pa z ukazom `set.wd()`, v katerem kot argument zapišemo izbrano delovno mapo, kot je prikazano v primeru 4.

Datoteke lahko beremo neposredno iz računalnika ali pa tudi s spleta, vendar je v drugem primeru potrebno urediti vsa dovoljenja, za dostop do spleta zunaj programa R, in je običajno potrebno to predhodno določiti. Ukaz za branje datotek je `read.table()`, za zapisovanje v datoteko pa `write.table()`, prvi argument je ime spremenljivke ki jo želimo zapisati, drugi argument pa ime datoteke. V obeh primerih lahko uporabimo simbol "\$", pred spremenljivko v tabeli, če želimo prikazati le to.

Primer 4: Določanje delovnega direktorija in branje/pisanje datotek

```
> setwd("C:/Users/Blaž/Desktop/seminar/Rdelo")
> y<-read.table("primer.txt",header=T)
> y
  a  b
1  2  3
2  5  6
3 12  4
4 23 56
5 21  2
> y^2
> write.table(y,"y")
> y$a
[1] 2  5 12 23 21
```

2.4.2 Risanje grafov

Grafične sposobnosti R-a so zelo dinamične in omogočajo risanje široke palete grafov in ustvarjanje novih tipov grafov. Risanje grafov je bolj preprosto v interaktivnem načinu, ki je v programu nastavljen avtomatično, vendar je dobro poznati ukaze za vklop interaktivne grafike. Ti ukazi so za UNIX sisteme ukaz `X11()`, za operacijske sisteme Windows `windows()`, in ukaz `quartz()` za OS X operacijske sisteme.

Ukazi za risanje grafov so razdeljeni v tri osnovne skupine (Venables in sod., 2013):

- Funkcije na prvi ravni ustvarijo novo zasnovo grafa, po možnosti z osmi, legendo, naslovom itd.
- Funkcije na drugi ravni dodajo na zasnovi grafa več informacij, kot so dodatne linije, dodatne točke itd.

- Interaktivne grafične funkcije nam dovoljuje interaktivno dodajanje informacij na graf, ali pridobivanje podatkov iz že obstoječih zasnov, s pomočjo strojne opreme kot je npr. računalniška miška.

2.4.2.1 Ukazi na prvi ravni

Najpogosteje uporabljen ukaz na prvi ravni je funkcija `plot()`. Ta je uporabljena za generacijo grafa iz podatkov, ki so podani v argumentih. Načeloma so osi, naslov grafa, in zaznamki narejeni avtomatično vendar, jih lahko po želji tudi definiramo (Venables in sod., 2013). Grafični ukazi na prvi ravni vedno začnejo novo sejo in posledično zbrisejo obstoječ graf, če je to potrebno. Ker je `plot()` generična funkcija nam poda drugačen rezultat za različne prve argumente, kot je prikazano v preglednici 1.

Preglednica 1: Drugačne variante uporabe funkcije `plot`

| Ukaz | Obrazložitev funkcije |
|--------------------------------|---|
| <code>plot(x,y)</code> | osnovni graf |
| <code>plot(x, y)</code> | če sta x in y vektorja, zriše graf raztrosa y proti x |
| <code>plot(x)</code> | če je x časovna vrsta, zriše graf časovne vrste če je x numerični vektor, zriše graf vrednosti x v odvisnosti od indeksa če je x imaginarni vektor, zriše graf odvisnost realnih vrednosti od imaginarnih vrednosti |
| <code>plot(f)</code> | če je f faktor objekta, prikaže tablični diagram |
| <code>plot(f,y)</code> | če je f faktor in y numerični vektor, zriše "box" diagram odstopanja |
| <code>plot(df)</code> | če je df podatkovni okvir, zriše graf porazdelitve spremenljivk, ki v tem nastopajo |
| <code>plot(~expr)</code> | če je $expr$ spisek objektov, ločenih s "+", zriše graf vrednosti objektov |
| <code>plot(y~exp r)</code> | zriše graf odvisnosti y od vseh spremenljivk, ki so navedene v spisku |

Preglednica 2: Najpomembnejši argumenti v grafičnih funkcijah na prvi ravni

| Argument | Obrazložitev argumenta |
|-------------------------|--|
| <code>axes=FALSE</code> | prepreči avtomatično generacijo osi, če želimo definirati lastne osi |
| <code>log="x"</code> | spremeni x os v logaritemsko |
| <code>log="y"</code> | spremeni y os v logaritemsko |
| <code>log="xy"</code> | spremeni x in y os v logaritemsko |
| <code>type=</code> | argument kontrolira vrsto prikaza objekta |
| <code>type="p"</code> | prikaže posamezne točke |
| <code>type="l"</code> | prikaže posamezne linije |
| <code>type="b"</code> | prikaže točke, povezane z linijami |

se nadaljuje...

nadaljevanje Preglednice 2

| | |
|--------------------------|---|
| <code>type="o"</code> | prikaže točke, prekrite z linijami |
| <code>type="h"</code> | nariše vertikalne črte od posameznih vrednosti do x osi |
| <code>type="s"</code> | stopničasti graf, točka definira dno vertikale |
| <code>type="S"</code> | stopničasti graf, točka definira vrh vertikale |
| <code>type="n"</code> | ni prikaza grafa, izrišejo se le osi |
| <code>xlab=string</code> | sprememba imena x osi |
| <code>ylab=string</code> | sprememba imena y osi |
| <code>main=string</code> | ime grafa (nahaja se na vrhu grafa) |
| <code>sub=string</code> | ime podnaslova (nahaja se pod x osjo) |
| <code>Help(par)</code> | Prikaže pomoč za vse možne argumente v izdelavi grafa |

2.4.4.2 Funkcije na drugi ravni

Funkcije na drugi ravni predstavljajo funkcije, ki omogočajo dodajanje ali spreminjanje samih funkcij na prvi ravni. Z njimi grafu dodajamo elemente vseh vrst, od teksta pa do novih podatkov.

Najpomembnejše so (Venables in sod., 2013):

- `legend(x,y,"tekst",fill=" ",...)`, kjer sta x in y kordinati točke, kamor bo postavljena legenda, drugi argument je besedilo, ki je lahko v obliki vektorja ali pa teksta;
- `lines(x,y,...)`, na obstoječi graf doda nove serije linij, iz podatkov (x, y) , kjer je y vrednost ordinate in x pripadajoča vrednost abcise;
- `points(x,y,...)`, je podobna funkcija kot `lines()`, le da namesto linij doda posamezne točke;
- `mtext("tekst",side=" ")` na obstoječi graf doda tekst, prvi argument predstavlja tekst, ki ga želimo dodati, medtem ko drugi argument predstavlja pozicijo, kamor ga želimo dodati.

2.4.4.3 Interaktivne funkcije

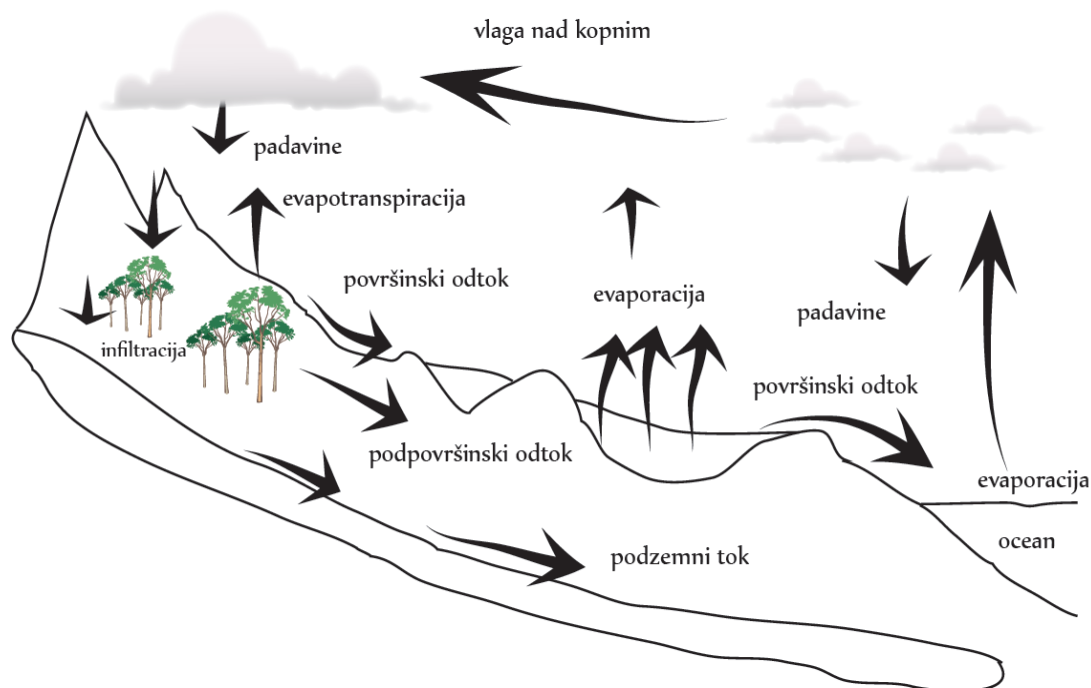
Interaktivne funkcije omogočajo uporabniku jemanje ali dodajanje informacij z grafa z uporabo računalniške miške. Dve najpreprostejši sta `locator()` in `identify()` funkcija (Venables in sod., 2013):

- `Locator(n,type)` funkcija dovoli, da uporabnik z levim klikom miške določi lokacijo na grafu. To se nadaljuje dokler uporabnik ne označi n lokacij (splošno 512), ali pa pritisne katerikoli drug gumb na miški in nato vrne lokacije v smislu x in y kordinat. Funkcijo običajno uporabljamo brez argumentov. Zelo je uporabna pri določanju položaja grafičnih elementov in zaznamkov, kot primer za dodajanje informativnega teksta na obrobni točki lahko uporabimo ukaz `text(locator(1), "Outlier", adj=0)`.
- Funkcija `identify(x,y,labels)` dovoli uporabniku zaznambo katerekoli točke, definirane z x ali y , s klikom levega gumba miške, z izrisom pripadajočih označb (ali pripadajočega indeksa i).

3 HIDROLOŠKO MODELIRANJE S PROGRAMOM R

3.1 Uvod v hidrološko modeliranje

Hidrološki krog predstavlja kroženje in dinamiko vode v naravi (slika 2) (Brilly in Šraj, 2005). Voda je prisotna na Zemlji od njenega nastanka in njena količina se ne spreminja. Zaradi fotodisociacije v zgornjih slojih atmosfere izgubi Zemlja 480 m^3 vode letno, manjše količine pa pridobi v meteoritih, ki padejo na zemeljsko površje (Berner in Berner, 1987; Brilly in Šraj, 2005). Hidrološki krog je del zapletenega termodinamičnega sistema Zemlje, ki ga poganja Sonce. Enako količino energije, ki jo Zemlja pridobi, tudi odda v vesolje (Brilly in Šraj, 2005). Sonce segreva zemeljsko površje kar povzroči izhlapevanje vode na površju, in s tem vračanje vode v atmosfero. Hidrološki krog je pomemben v več pomenih, saj predstavlja za mnogo snovi pomemben medij kroženja same snovi. Zato je modeliranje vseh ali posameznih delov kroga pomembno, saj predstavlja osnovo za ocenitev in prognozo vplivov na okolje.



Slika 2: Hidrološki krog (prirejeno po Brilly in Šraj, 2005)

Pri samem modeliranju hidrološkega kroga je težava to, da za zadovoljivo oceno potrebujemo veliko podatkov, kot so npr. temperatura, padavine, lasnosti tal, relief, podatki o evapotranspiraciji in še

veliko drugih podatkov, ki imajo lahko vpliv na samo kroženje. Zaradi same kompleksnosti kroga se danes v praksi uporablja poenostavljene verzije samega kroga, ki omogočajo zadovoljiv rezultat in je njihova kompleksnost obvladljiva.

Modele lahko grobo razdelimo na empirične, konceptualne in fizične (Beck, 1991; Kokkonen in Jakeman., 2001). Empirični modeli so močno osredotočeni na opazovanje, in je njihov cilj opisati odzive modela s pomočjo obstoječih podatkov. Konceptualni modeli razložijo vse vplivne hidrološke procese s sistemom, ki je sestavljen iz posameznih enot. Več kot je elementov vključenih v ta sistem, višja je nevarnost prekomerne kompleksnosti. Fizični modeli skušajo oponašati naravne pojave v porečju, z uporabo klasične kontinuirne mehanike. Običajno pojave v porečju opisujejo kot matematično idealizirano podobo pojavov, a so po obsegu potrebnih podatkov zelo zahtevni (Kokkonen in Jakeman., 2001).

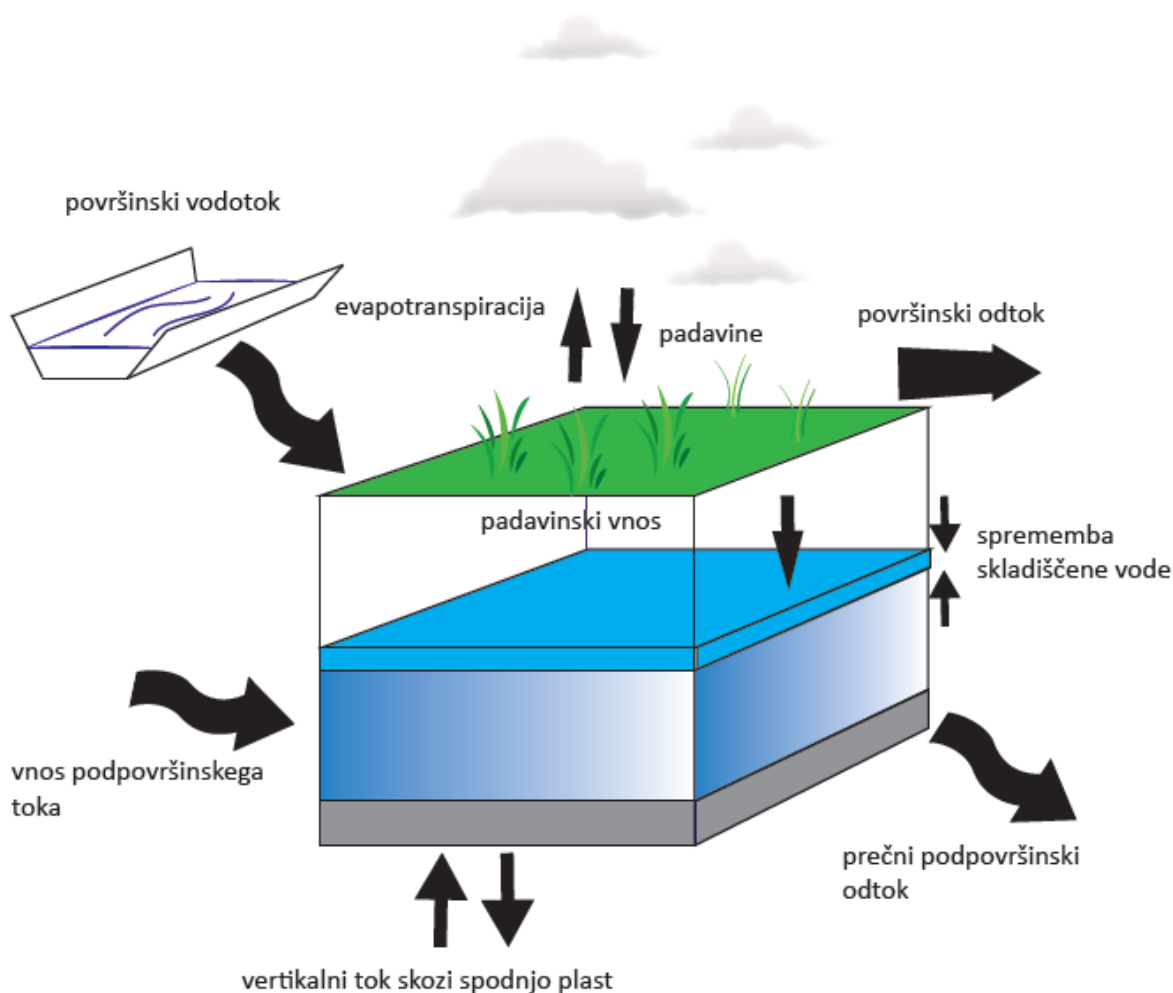
Nekateri hidrološki modeli razložijo procese v porečju z poenostavljenimi hidravličnimi zakoni v obliki diferencialnih enačb (konceptualni model), drugi kot empirične algebrjaske enačbe (empirični model). Nekateri novejši modeli pa upoštevajo procese vnosa padavin, izhlapevanja ter vpliv prispevnih površin k površinskemu odtoku (semi-distribuirni modeli). Veliko hidroloških modelov, ki uporablja funkcijo gostote verjetnosti kot orodje za določanje zasičenosti zemljine, je osnovano na te metodi, kot sta na primer TOPMODEL ter ARNO model (Arnold in sod., 1998).

3.1.1 Komponente odtoka

Simulacija posameznih komponent odtoka je pomembna za ugotovitev posledic na zemljišča, rastline, vodna telesa in zaloge vode na območju (Arnold in Allen, 1996). Hidrološki modeli razdelijo celoten odtok na posamezne komponente, sama količina ter struktura pa zavisi od modela. Najosnovnejša razdelitev predstavlja razdelitev celotnega odtoka na hitri odtok in bazni odtok. Razdelitev odtoka na hitri odtok in bazni odtok običajno poteka na dva načina, s pomočjo recesijske krivulje hidrograma ter na podlagi metod s sledili (Partington in sod., 2009). Za določitev baznega odtoka in hitrega odtoka s pomočjo hidrograma je potrebno dobro razumevanje obeh komponent. Bazni odtok predstavlja dolgoročni priliv v strugo iz naravnih skladišč vode, v smislu vzdrževanja pretoka med padavinskimi pojavi. Hitri odtok predstavlja odziv porečja na padavinski pojav, ki vključuje površinski odtok, bočni tok vode v zemljini (medtok) in odtok zaradi neposrednih padavin v strugo vodnega telesa (Partington 2009). Ko sta komponenti definirani, postane razdelitev bolj jasna. Če količin ne definiramo, pa pride do nejasnosti ali je razdelitev narejena za določitev količine podzemne vode pred padavinami, ki prispeva k odtoku, in interakcije med podpovršinsko in površinsko vodo ali pa za določitev razmerja med padavinami in odtokom (Partington in sod., 2009).

Druga pogosta razdelitev odtoka je na površinski in podpovršinski odtok. Površinski odtok imenujemo del padavin, ki prispejo na površino Zemlje in se ne zadržijo na rastlinah ali v tleh ali izhlapijo temveč odtečejo površinsko in podpovršinsko v mrežo vodotokov (Brilly in Šraj, 2005). Podpovršinska voda, ki napolnjuje vse pore pod talnim profilom ležeče vodonosne plasti, pod katero je neprepustna plast geološkega izvora, je podtalna voda ali podtalnica. Zaradi boljšega razlikovanja od plitve podtalnice jo nekateri imenujejo tudi globoka ali prava podtalnica (Brilly in Šraj, 2005).

Nekateri modeli s kompleksnejšo strukturo pa razdelijo odtok in procese, ki vplivajo na odtok, na več komponent (slika 3), vendar ker se običajno v praksi merijo le nekatere komponente odtoka, se pojavijo s tem povezane napake (Arnold in Allen, 1996).



Slika 3: Primer prikaza posameznih komponent odtoka (prirejeno po Styles in Burt, 1999)

3.2 Semi-distribuiran hidrološki model TOPMODEL

Program R vsebuje velik nabor funkcij za hidrološko modeliranje:

- funkcijo za izračun trajanja toka do izhoda porečja,
- infiltracijski model osnovan na Green-Ampt-ovi metodi,
- izračun Nash-Sutcliffe-ovega koeficienta,
- izračun topografskega indeksa iz DMV rastra,
- hidrološki model TOPMODEL.

Paket TOPMODEL vsebuje hidrološke funkcije in hidrološki model TOPMODEL, ki je osnovan na FORTRAN 1995 verziji, ki jo je razvil Keith Beven (Buytaert, 2011).

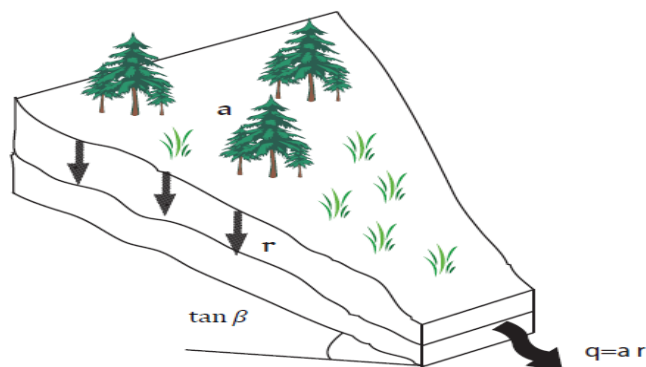
3.2.1 Teoretična predstavitev TOPMODEL-a

TOPMODEL je semi-distribuiran model, ki temelji na topografiji, katerega cilj je simulirati obnašanje porečij oz. simuliranje dinamike površinskih in podpovršinskih prispevnih območij (Campling in sod., 2002). Je kompromis med kompleksnostjo polno distribuiranih modelov in preprostostjo točkovno empiričnih modelov (Robson in sod., 1992; Seibert, 1997). Funkcionalna verzija modela za hidrološke procese v porečju, zagotavlja "varčnost" v smislu računske zahtevnosti, z omejenim številom fizičnih parametrov. Model je osnovan na osnovi t.i. topografskega indeksa (slika 4), ki opisuje težnjo vode, da se akumulira (*a*) ter težnjo, da potuje dolvodno (*b*) (Seibert, 1997):

$$I_i = \ln\left(\frac{a_i}{\tan \beta_i}\right), \quad (1)$$

kjer je:

- a_i površina dreniranja skozi kvadrat mreže na enoto dolžine poti [m] (ang. *area draining through a grid square per unit length of contour*),
- β_i naklon površine porečja.

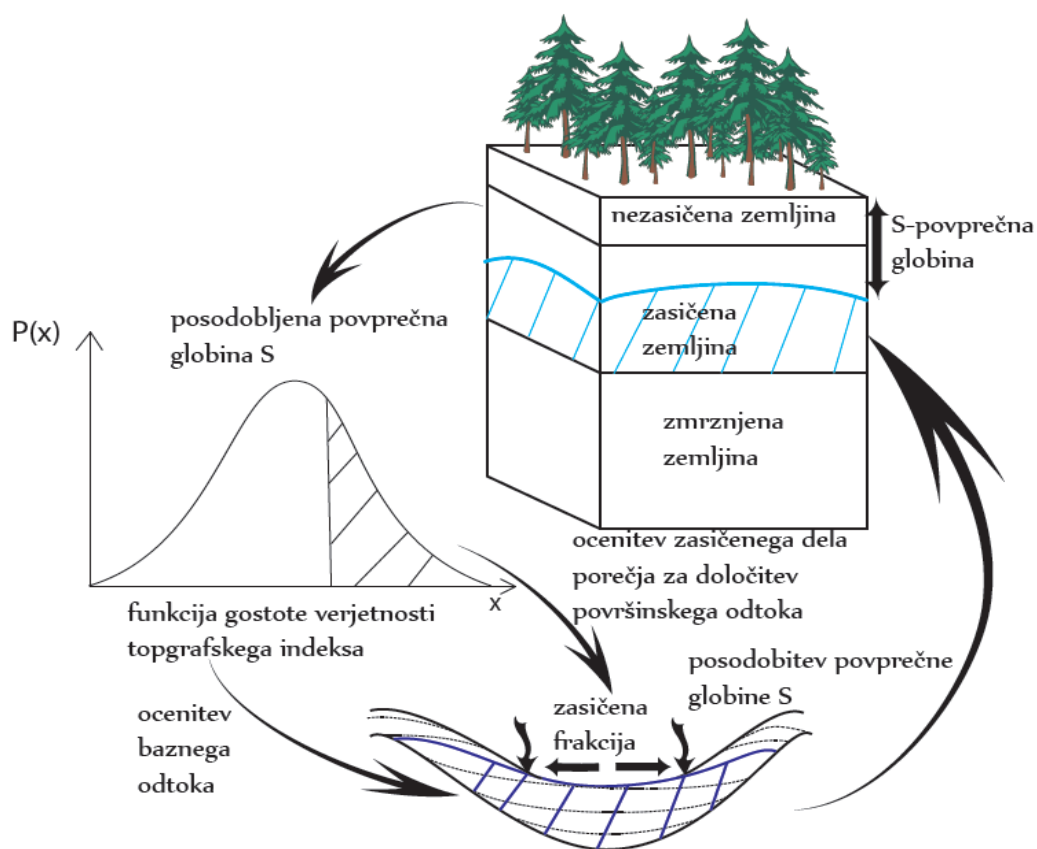


Slika 4: Splošni prikaz topografskega indeksa (prirejeno po Fogleman, 2009)

Vključuje naslednje osnovne predpostavke (Seibert, 1997):

- Dinamika zasičenega območja je poenostavljena na kontinuirno dinamično ravnovesje;
- Vtok, ki teče v podtalnico je prostorsko homogen;
- Efektivni hidravlični gradient zasičenega območja je poenostavljen s površinskim topografskim gradientom $\tan \beta_i$;
- Porazdelitev dolvodne transmisivnosti $T_0[\frac{m^2}{h}]$ (ang. *distribution of downslope transmissivity*) z globino je funkcija primanjkljaja zasičenja (normalno eksponentna funkcija), oz. drugače povedano transmisivnost pada z globine podtalnice.

TOPMODEL s pomočjo topografskega indeksa identificira območja hidrološke podobnosti, oz. območja, katera se zaradi meteoroloških vplivov podobno odzivajo v smislu odtoka, zasičenosti in drugih hidroloških lastnosti (Shaman in sod., 2002). Posledično se območja z enakimi topografskimi indeksi obnašajo identično. Na odtok vplivajo štiri glavni procesi: padavine v struge rek, površinski tok, plitvi podzemni tok in podzemni tok. V strukturi TOPMODEL-a ima največji vpliv na generacijo odtoka gladina podzemne vode, zato je pogosto, da je v sušnih obdobjih podcenjen odtok, ki izvira iz podzemnih vod (Shaman in sod., 2002). Osnovni koncept delovanja TOPMODEL-a (slika 5) je v posodobljanju gladine podzemne vode v vsakem časovnem koraku, na podlagi teh podatkov in topografskega indeksa nato z funkcijo gostote verjetnosti model določi delež zasičenega porečja. S tem se zaključi časovni korak in se podatki prenesejo v novi časovni korak, kjer se znova posodobijo gladine podzemne vode.



Slika 5: Prikaz delovanja TOPMODEL-a (prirejeno po Shaman in sod., 2002)

TOPMODEL (Beven in sod., 1995) predstavlja hidrološki model, ki uporablja topografski indeks za simulacijo gladine podzemne vode in tudi kot merilo hidrološke podobnosti (Campling in sod., 2002). Če predpostavimo, da transmisivnost pada eksponentno z globino podzemne vode ter, da je hidravlični gradient enak tistemu na površju, lahko dolvodni tok na lokaciji i izrazimo z enačbo (Seibert, 1997):

$$q_i = T_0 e^{-\frac{S_i}{m}} \tan \beta_i = a_i r_i , \quad (2)$$

kjer je:

- a_i površina dreniranja skozi kvadrat mreže na enoto dolžine poti [m] (ang. *area draining through a grid square per unit length of contour*),
- β_i naklon površine porečja.

- q_i podzemni dolvodni tok na enoto dolžine (ang. *downslope subsurface flow rate per unit contour length*) [$\frac{m^2}{h}$]
- T_0 dolvodna transmisivnosti (ang. *lateral downslope transmissivity*) [$\frac{m^2}{h}$]
- r vnos oz.bogatenje (ang. *recharge rate*),
- S_i lokalni primanjkljaj vlage v zemljini (ang. *local soil moisture deficit*) [m],
- m parameter, ki kontrolira stopnjo padanja transmisivnosti z zviševanjem deficita zasičenosti.

S preoblikovanjem in integriranjem enačbe za podzemni dolvodni tok, lahko izrazimo enačbi za lokalni primanjkljaj vlage v zemljini in povprečni primanjkljaj vlage v zemljini porečja, z naslednjima enačbama (Campling in sod., 2002):

$$S_i = -m \ln \left(\frac{r a_i}{T_0 \tan \beta_i} \right), \quad (3)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{A} \sum_i A_i \left(-m \ln \left(\frac{r a_i}{T_0 \tan \beta_i} \right) \right),$$

kjer so nastopajoči členi:

- a_i površina dreniranja skozi kvadrat mreže na enoto dolžine poti [m] (ang. *area draining through a grid square per unit length of contour*),
- β_i naklon površine porečja,
- T_0 dolvodna transmisivnosti (ang. *lateral downslope transmissivity*) [$\frac{m^2}{h}$],
- r vnos oz.bogatenje (ang. *recharge rate*),
- S_i lokalni primanjkljaj vlage v zemljini (ang. *local soil moisture deficit*) [m],
- m parameter, ki kontrolira stopnjo padanja transmisivnosti,
- A_i delno območje topografskega indeksa i (ang. *fractional area of the topographic index class i*) [m^2],
- A površina celotnega porečja,
- \bar{S} povprečni zadrževalni primanjkljaj porečja (ang. *The mean catchment storage deficit*) [m],

Ob predpostavki, da sta vnos r in transmisivnost T_0 v prostoru konstantna, ju lahko odstranimo iz enačbe (enačba 4). S tem lahko S_i izrazimo z naslednjo enačbo (Campling in sod., 2002):

$$S_i = \bar{S} + m \left(\bar{I} - \ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} \right), \quad (4)$$

kjer je :

- \bar{I} dejanski povprečni topografski indeks porečja (ang. *areal average of the topographic index*),
- \bar{S} povprečni zadrževalni primanjkljaj porečja (ang. *The mean catchment storage deficit*) [m],
- S_i lokalni primanjkljaj vlage v zemljini (ang. *local soil moisture deficit*) [m],
- m parameter, ki kontrolira stopnjo padanja transmisivnosti,
- a_i površina dreniranja skozi kvadrat mreže na enoto dolžine poti [m] (ang. *area draining through a grid square per unit length of contour*),
- β_i naklon površine porečja.

Dejanski povprečni topografski indeks izračunamo po naslednji enačbi (Campling in sod., 2002):

$$\bar{I} = \frac{1}{A} \int_0^A \ln \left(\frac{a_i}{\tan \beta_i} \right) A_i dA, \quad (5)$$

kjer je :

- \bar{I} dejanski povprečni topografski indeks porečja (ang. *areal average of the topographic index*),
- S_i lokalni primanjkljaj vlage v zemljini (ang. *local soil moisture deficit*) [m],
- β_i naklon površine porečja,
- A_i delno območje topografskega indeksa i (ang. *fractional area of the topographic index class i*) [m²],
- A površina celotnega porečja.

Za vsak topografski indeks I_i , je simuliran tok iz zasičenega in nezasičenega območja, ter vertikalna drenaža q_v [m/h] (ang. *vertical drainage*) iz nezasičenega območja (Campling in sod., 2002).

Vertikalna drenaža v vsaki točki i , omejuje lokalni primanjkljaj zasičenja D_i [m] (ang. *local saturated zone deficit*), ki je odvisen od globine podtalnice (Beven in Wood, 1983). Vertikalna drenaža se izračuna po naslednji enačbi (Campling in sod., 2002):

$$q_v = \frac{S_{uz}}{D_{itd}}, \quad (6)$$

kjer je:

- S_{uz} stopnja zasičenosti v nezasičenem območju (ang. *storage in the unsaturated zone*) [m],

- t_d časovni zamik (ang. *time delay constant*) [h/m],
 q_v vertikalna drenaža (ang. *vertical drainage*),
 D_i lokalni primanjkljaj zasičenosti (ang. *local saturated zone deficit*) [m].

Ko je gravitacijska drenaža izčrpana, dejansko evapotranspiracijo omejuje potencialna evapotranspiracija in maksimalna kapaciteta zadrževanja vode v zemljini. Dejanske izgube zaradi evapotranspiracije se izračuna po naslednji enačbi (Campling in sod., 2002):

$$E_a = E_p \left(1 - \frac{S_{rz}}{S_{rmax}} \right), \quad (7)$$

kjer je:

- E_a dejanske izgube zaradi evapotranspiracije [m/h],
 E_p potencialna evapotranspiracija [m/h],
 S_{rmax} maksimalna kapaciteta zadrževanja vode v zemljini (ang. *maximum root zone storage*) [m],
 S_{rz} koren območnega skladiščenja (ang. *root zone storage*) .

Ko voda s porečja začne vstopati v podtalnico, je celoten podzemni tok Q_v [m/h] izračunan kot vsota posameznih vertikalnih drenaž vsakega topografskega indeksa i z naslednjo enačbo (Campling in sod., 2002):

$$Q_v = \sum_i q_v A_i, \quad (8)$$

kjer je:

- Q_v tok vode s porečja, oz. vnos, ki vstopa v podtalnico oz. vnos (ang. *catchment flux of water entering the water table*) [m/h],
 q_v vertikalna drenaža (ang. *vertical drainage*),
 A_i delno območje topografskega indeksa i (ang. *fractional area of the topographic index class i*) [m²].

Odtok zadrževane voda iz zasičenega dela je pojmovan kot bazni odtok Q_b [m/h], ki ga izračunamo z naslednjo enačbo (Campling in sod., 2002):

$$Q_b = Q_0 e^{-\frac{\bar{S}}{m}}, \quad (9)$$

kjer je:

- Q_b bazni odtok [m/s],
 Q_0 odtok, ko je povprečni zadrževalni primanjkljaj enak nič ($Q_0 = A e^{-\bar{I}}$),
 S_i lokalni primanjkljaj vlage v zemljini (ang. *local soil moisture deficit*) [m],

m parameter, ki kontrolira stopnjo padanja transmisivnosti.

Povprečni zadrževalni primanjkljaj porečja v časovnem koraku t , \bar{S}_t (ang. *catchment average storage deficit*), je posodobljen z odštetjem vnosa v nezasičeno območju in prištetju baznega odtoka iz prejšnjega časovnega koraka $t-1$. Enačba se glasi (Beven, 1979; Campling in sod., 2002):

$$\bar{S}_t = \bar{S}_{t-1} + [Q_{bt-1} - Q_{vt-1}], \quad (10)$$

kjer je :

- \bar{S}_t povprečni zadrževalni primanjkljaj porečja v časovnem koraku t ,
- \bar{S}_{t-1} povprečni zadrževalni primanjkljaj porečja v časovnem koraku $t-1$,
- Q_{bt-1} bazni odtok iz časovnega koraka $t-1$,
- Q_{vt-1} vnos vode v nezasičenem območju v časovnem koraku $t-1$.

Začetni bazni pretok Q_0 in začetni primanjkljaj zadrževanja vode v območju korenin S_{r0} (ang. *initial root zone storage deficit*) so podani na začetku simulacije. Usmerjanje v kanalih je osnovano na funkciji mrežne širine in razmerja hitrost-odtok, ki poda konstantno vrednost parametra za hitrost vala za porečje R_V [m/h], ter v kanalu CH_v [m/h] (Campling in sod., 2002).

Nastopajoči parametri v programu R so:

- $qs0$ začetni podzemni tok na enoto površja [m] (ang. *Initial subsurface flow per unit area*),
- $lnTe$ logaritem območnega povprečja prepustnosti $T_0[\frac{m^2}{h}]$,
- m parameter modela, ki kontrolira padanje transmisivnosti (ang. *parameter controlling the rate of decline of transmissivity in the soil profile*),
- $Sr0$ začetni primanjkljaj zadrževanja vode v območju korenin [m] (ang. *Initial root zone storage deficit*),
- $Srmax$ maksimalna kapaciteta zadrževanja vode [m] (ang. *Maximum root zone storage deficit*),
- td časovni zamik nezasičenega območja [h/m] (ang. *Unsaturated zone time delay per unit storage deficit*),
- vr tok znotraj porečja [m/h] (ang. *channel flow inside catchment*),
- dt časovni korak [h].

3.2.2 Green-Ampt-ov infiltracijski model

3.2.2.1 Splošno o modelu Green-Ampt

Green in Ampt (1911), sta razvila analitično rešitev točkovne enačbe za infiltracijo ob konstantnih padavinah. Enačba je bila razvita na osnovi Darcy-evega zakona in predpostavlja analogijo kapilarne cevke za tok v porozni zemljini. Enačbo lahko zapišemo kot (Ward in Trimble, 2004):

$$f = \frac{K(H_0 + S_w + L)}{L}, \quad (11)$$

kjer je :

- K hidravlična prevodnost prenosnega območja (ang. *hydraulic conductivity of the transmission zone*),
- H_0 globina toka, ki se zbira na površju (ang. *flow depth ponded at surface*),
- S_w efektivni srk (ang. *suction*) na območju močenja (ang. *wetting front*),
- L globina od površja do močenja.

Metoda predpostavlja "batni tok" (ang. *piston flow*) (voda teče navzdol brez mešanja) z značilnim območjem močenja med območjem infiltracije in začetne vsebnosti vode. Običajno je metoda posplošena z enačbo (Ward in Trimble, 2004):

$$f = \frac{A}{F} + B, \quad (12)$$

kjer je:

- f infiltracija,
- F akumulirana infiltracija,
- A, B parametra, ki sta odvisna od začetne količine vode, razmer na površju in značilnosti zemljine.

3.2.2.2.2 Darcy-jev zakon

Henry Darcy (1856) je razvil osnovno razmerje za opis toka skozi homogeno zemljino, uporabil je pesek kot medij in ugotovil, da je tok sorazmeren hidravličnemu gradientu, ki ga lahko zapišemo kot (Ward in Trimble, 2004):

$$q = -K \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (13)$$

kjer je:

q tok volumna vode, ki potuje skozi zemljino v smeri z , na enoto površine na enoto časa,

$\frac{\partial \theta}{\partial z}$ hidravlični gradient v z smeri.

Hidravlična prevodnost je funkcija vsebnosti vode v zemljini (θ) in pritisika (ϕ). Načeloma je hidravlična prevodnost odvisna od smeri toka, če je zemljina definirana kot anizotropna. Hidravlična prevodnost je običajno izražena z funkcijo pritiska $K(\phi)$, ali $K(\theta)$, kot funkcija vsebnosti vode v zemljini.

Teoretično diferencialno enačbo za nezasičen tok dobimo z združenjem Darcyve enačbe z kontinuitetno enačbo. Ta enačba je poznana, kot difuzijska enačba Richardsove enačbe (Ward in Trimble, 2004):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}, \quad (14)$$

kjer je:

$D_w(\theta)$ difuzivnost zemljinske vode, definirana kot $K(\theta) \partial h / \partial \theta$,

h matrični potencial negativnega pritiska.

3.2.2.2 *Green-Ampt v programu R (TOPMODEL)*

TOPMODEL vsebuje infiltracijski model, osnovan na Green-Ampt-ovem modelu za neenotne zemljine. Hidravlična prevodnost v zasičeni zemljini pada kot eksponentna funkcija globine in sesalno-skladiščni faktor C (ang. *storage-suction factor*) je konstanten skozi globino. Enačba za spremembo zasičene hidravlične prevodnosti (ang. *saturated hydraulic conductivity*) se glasi (Beven, 1984):

$$K_s = K_0 e^{fz}, \quad (15)$$

kjer je:

z globina,

f koeficient,

K_s sprememba zasičene hidravlične prevodnosti,

K_0 hidravlična prevodnost na površju.

Enačba za poroznost se glasi:

$$\theta_s = \theta_0 e^{gz}, \quad (16)$$

kjer je:

- θ_s poroznost,
- g koeficient,
- θ_0 poroznost na površju.

Efektivna prevodnost za fronto močenja \tilde{K}_i (ang. *effective conductivity behind the wetting front*) bo manjša od spremembe zasičene prevodnosti K_s . Predpostavljeno je razmerje med \tilde{K} in globino, f pa je koeficient, ki predstavlja stopnjo eksponentnega padanja. Tako dobimo naslednjo enačbo za efektivno prevodnost za fronto močenja (Beven, 1984):

$$\tilde{K}(z) = \tilde{K}_0 e^{fz}, \quad (17)$$

kjer je:

- \tilde{K} efektivna hidravlična prevodnost za fronto močenja,
- \tilde{K}_0 efektivna hidravlična prevodnost na površju.

Darcy-jev zakon lahko integriramo po globini do fronte močenja, kar nam poda enačbo za efektivni srk ob fronti močenja ali kapilarni srk (Morel-Seytoux in Khanji, 1974) (ang. *effective wetting front suction or capillary drive*), ki ga opišemo z naslednjo enačbo (Beven, 1984):

$$\Delta\psi = \int_{\psi_i}^0 k(\psi) d\psi, \quad (18)$$

kjer je:

- $\Delta\psi$ efektivni srk ob fronti močenja ali kapilarni srk,
- ψ_i maksimalni efektivni srk na fronti močenja ob začetni vlažnosti zemljine,
- $k(\psi)$ relativna funkcija hidravlične prepustnosti.

Da lahko pridobimo analitično rešitev za infiltracijo je potrebno predpostaviti, da je sesalno-skladišni faktor C konstanten. Sesalno skladišni faktor je opisan z naslednjo enačbo (Beven, 1984):

$$C = \Delta\psi\Delta\theta, \quad (19)$$

kjer je:

- C sesalno skladišni faktor,
- $\Delta\psi$ efektivni srk ob fronti močenja ali kapilarni srk,
- $\Delta\theta$ sprememba poroznosti, ki predstavlja razliko dejanske in začetne poroznosti.

Če je fronta močenja dosegla globino Z , potem je stopnja infiltracije i lahko podana s splošnim razmerjem, ki velja za razslojeno zemljinu (Beven, 1984):

$$i = \frac{dI}{dt} = \frac{\Delta\psi + z}{\int_{z=0}^{z=Z} \left[\frac{dz}{\tilde{K}} \right]}, \quad (20)$$

kjer je:

- i stopnja infiltracije,
- I kumulativna infiltracija,
- z globina,
- \tilde{K} efektivna hidravlična prevodnost za fronto močenja,
- Z globina, ki jo je dosegla fronta močenja.

Predpostavimo (Mein in Larson, 1973), da je v času do zasičenja (t_p) intenzivnost padavin konstantna in da je kumulativna infiltracija (I_p), enako kot fronta močenja, dosegla globino z_p . Globino, do katere je prišla fronta močenja, izrazimo z naslednjo enačbo (Beven, 1984):

$$z_p = \frac{I_p}{\Delta\theta}, \quad (21)$$

kjer je:

- I_p kumulativna infiltracija v času t_p ,
- $\Delta\theta$ sprememba poroznosti,
- z_p globina, do katere je prišla fronta močenja.

Kumulativna infiltracija je izražena kot :

$$I_p = r t_p, \quad (22)$$

kjer je:

- I_p kumulativna infiltracija,
- r vnos oz. bogatenje,
- t_p čas do zasičenja zemljine.

Če predpostavimo, da je infiltracija enaka časovni spremembi kumulativne infiltracije ob zasičenju, potem velja (Childs in Bybordi, 1969; Beven, 1984):

$$\frac{dI}{dt} = r = \frac{\tilde{K}_0}{1 - \frac{f I_p}{\Delta\theta}} f \left(\Delta\psi + \frac{I}{\Delta\theta} \right), \quad (23)$$

kjer je:

- r vnos,

- $\Delta\psi$ efektivni srk ob fronti močenja ali kapilarni srk,
 I_p kumulativna infiltracija v času t_p ,
 I kumulativna infiltracija,
 \tilde{K} efektivna hidravlična prevodnost za fronto močenja,
 θ poroznost,
 f koeficient.

Če v zgornji enačbi (enačba 23) predpostavimo trenutek, v katerem pride do zasičenja, lahko predpostavimo da je $I=I_p$ in $t=t_p$. Z nadaljno integracijo dobimo enačbo za čas do zasičenja (Beven, 1984) :

$$t - t_p = \frac{1}{f^* \tilde{K}_0} \left[\ln(I_p + C) - \frac{1}{e^{f^* C}} \ln(I + C) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(f^*(I_p + C))^m}{m!m} - \lambda \right] \quad (24)$$

kjer je:

- r vnos,
 $\Delta\psi$ efektivni srk ob fronti močenja ali kapilarni srk,
 I_p kumulativna infiltracija v času t_p ,
 I kumulativna infiltracija,
 \tilde{K} efektivna hidravlična prevodnost za fronto močenja,
 θ poroznost,
 f koeficient,
 C zadrževalni faktor srka,
 m parameter, ki kontrolira padanje transmisivnosti.

λ predstavljajo konstanto, izraženo z naslednjo enačbo (Beven, 1984):

$$\lambda = \ln(I_p + C) - \frac{1}{e^{f^* C}} \left[\ln(I_p + C) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(f^*(I_p + C))^m}{m!m} \right] = \text{konstanta} . \quad (25)$$

Nastopajoči parametri v R-u:

- dt časovni korak [h],
- CD kapilarni srk (ang. *capillary drive*),
- $K0$ površinska hidravlična prepustnost [m/h] (ang. *Surface hydraulic conductivity*),
- m parameter modela, ki kontrolira padanje transmisivnosti (ang. *parameter controlling the rate of decline of transmissivity in the soil profile*).

3.2.2.3.1 Morel-Seytoux in Khanji model

Razvit je bil hidravlični model za infiltracijo, ki vključuje odpor viskoznosti z enačbo (ASCE, 1996):

$$f = \frac{\frac{K}{B}(\phi - \theta_i)(H_0 + H_c) + F}{F}, \quad (26)$$

kjer je:

- f stopnja infiltracije [cm/h],
- F kumulativna infiltracija [cm],
- K efektivna hidravlična prevodnost, ki jo lahko ocenimo z metodami, ki so namenjene ocenjevanju Green-Ampt-ove efektivne prepustnosti,
- B faktor odpora viskoznosti [1-1.7]
- H_c efektivni kapilarni tok, ki ga lahko ocenimo z metodami, s katerimi ocenjujemo srk na fronti močenja [cm],
- H_0 normalno enak 0,
- ϕ frakcijski volumen (ang. *volume fraction*), ki ga določimo iz gostote zemljine,
- θ_i začetna zasičenost, ki se jo določi iz podatkov o zadrževanju vode v zemljini.

3.2.3 FAO Penman-Monteith metoda za izračun potencialne evapotranspiracije

Enačbo so razvili na pobudo FAO v sodelovanju z Mednarodno komisijo za namakanje in drenažo (ICID) ter s Svetovno meteorološko organizacijo (WMO). Od leta 1990 je na njihov predlog to standardna metoda izračuna potencialne evapotranspiracije. FAO Penman-Monteith-ova enačba je bila izpeljana iz enačb za aerodinamično odpornost in enačb za odpornost rastlin ter enačbe Penman-Monteith (Gong in sod., 2006). Ker je v enačbi upoštevana referenčna rastlina, se lahko uporablja po celem svetu (Allen in sod., 1998). Za račun referenčne evapotranspiracije s pomočjo FAO Penman-Monteith enačbe so potrebni naslednji podatki: sončno sevanje, temperatura zraka, vlažnost zraka in hitrost vetra (Cesar, 2010).

Eden od vhodnih podatkov potrebnih za simulacijo TOPMODEL-a, je tudi t.i referenčna evapotranspiracija, izračunana po metodi FAO Penman-Monteith. Predstavlja metodo za izračun dnevne referenčne evapotranspiracije (Allen in sod., 1998), z naslednjo enačbo (Gong in sod., 2006):

$$ET_{ref} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_A + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}, \quad (27)$$

kjer je:

- ET_{ref} referenčna evapotranspiracije [mm/dan],
- G toplotni tok zemljine [MJ/(m dan)],

| | |
|---------------|--|
| T_A | povprečna dnevna temperatura na 2 m višine [°C], |
| U_2 | hitrost vetra na 2 m višine [m/s], |
| e_s | tlak pare za zasičenje zemljine [kPa] (ang. <i>saturation vapor pressure</i>), |
| e_a | dejanski tlak pare [kPa], |
| $(e_s - e_a)$ | primanjkljaj tlaka pare za nasičenje zemljine [kPa] (ang. <i>saturation vapor pressure deficit</i>), |
| Δ | naklon zasičene vodne parne-tlačne krivulje [kPa/°C] (ang. <i>slope of the saturated water-vapor-pressure curve</i>), |
| γ | fizometrična konstanta [kPa/°C] (ang. <i>psychrometric constant</i>), |
| R_n | neto radiacija na površju [$\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ dan}}$] (ang. <i>net radiation at the crop surface</i>). |

3.3 Konceptualni točkovni model za padavinski odtok

3.3.1 Paket TUWmodel

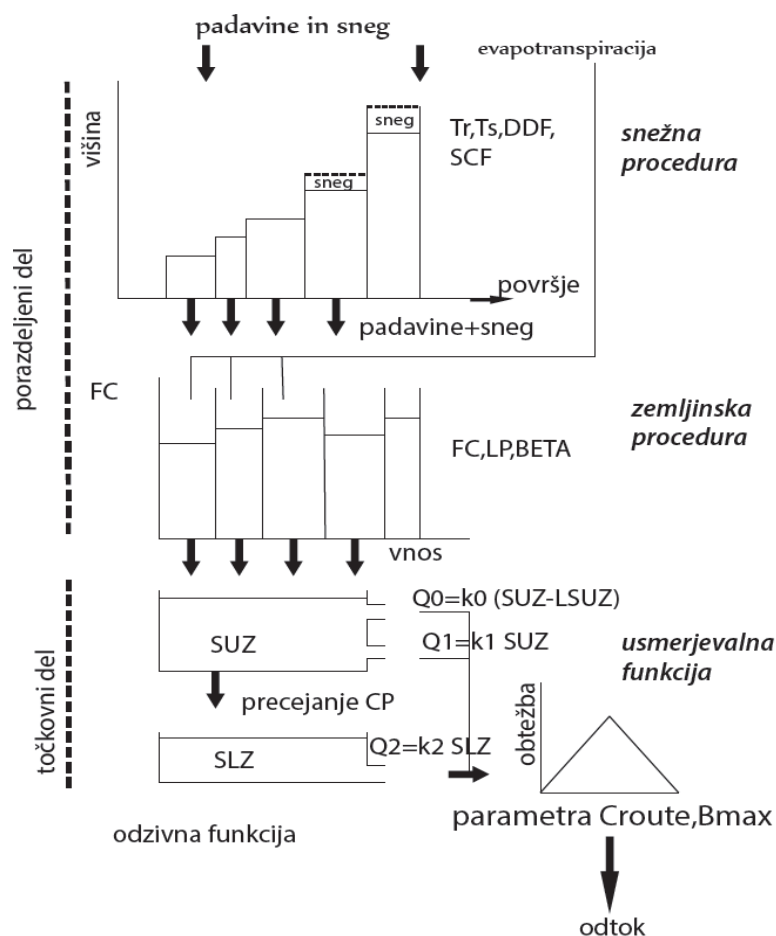
Paket *TUWmodel* vsebuje konceptualni točkovni model za padavinski odtok, ki ima podobno strukturo kot HBV model. Model deluje na osnovi dnevnega časovnega koraku, sestavlja ga metoda za sneg, metoda določanje vlažnosti zemljine in metoda za usmerjanje toka (Parajka in Viglione, 2012). Razvit je bil na univerzi na Dunaju za namen izobraževanja. Rezultat modela je podan z vektorjem q [m^3/s], ki vsebuje naslednje rezultate:

- $qzones$ [m^3/s] odtok za posamezno območje,
- swe [mm] snežno-vodni ekvivalent (ang. *snow water equivalent*),
- $q0$ [m^3/s] površinski odtok,
- $q1$ [m^3/s] podzemni odtok,
- $q2$ [m^3/s] bazni odtok,
- $rmoist$ relativna vlažnost zemljine [0-1],
- $rain$ deževne padavine [mm/dan],
- $snow$ trdne padavine [mm/dan] (ang. *solid precipitation*),
- eta dejanska evapotranspiracija [mm/dan].

Rezultati so prikazani kot vektor s sestavo, $q = c("itsteps", "nzones", "area", "param", "incon", "output", "qzones", "q", "swe", "q0", "q1", "q2", "rmoist", "rain", "snow", "eta")$, ki vsebuje vse parametre. Če želimo prikazati le en parameter lahko z znakom "\$" in imenom zelenega podatka, izrišemo le tega.

3.3.2 Model HBV

HBV model (Bergström, 1976) je konceptualni model porečne hidrologije, ki simulira dnevni odtok z uporabo dnevni padavin, temperature zraka in potencialnega izhlapevanja. HBV je sestavljen iz treh delov: modela taljenja snežne odeje, ki oceni akumulacijo in taljenje snega, modela vlažnosti zemljin, kjer se oceni vnos v podzemno vodo in izhlapevanje kot funkcijo vsebnosti vode v zemljini ter odzivne in transportne funkcije, ki določa potek toka vode (slika 6) (Seibert, 1999). Padavine so simulirane kot sneg ali dež. Če je temperatura zraka nad nekim pragom, so vse padavine simulirane kot tekoče, oz. če je temperatura pod tem pragom, so vse padavine simulirane kot snežne. Snežne padavine množimo z korekcijskim faktorjem padanja snega, ki predstavlja sistematčne napake v merjenju snega in neobstoječim izhlapevanjem snega. Taljenje snega je izračunano na podlagi metode dnevni temperatur. Tekoče padavine so zadržane v snegu dokler ni presežena meja, ki jo predstavlja snežno-vodni ekvivalent. Tekoča voda v snegu ponovno zmrzne po koeficientu ponovnega zmrzovanja (Seibert, 1999).



Slika 6: Splošni prikaz HBV modela (prirejeno po Uhlenbrook in sod., 1999)

3.3.2.1 Model taljenja snežne odeje

Model taljenja snežne odeje predstavlja akumulacijo snega in taljenje po temperaturni metodi (Parajka in sod., 2007). Povprečne dnevne padavine P se razdeljijo na P_R (tekoče padavine) in P_S (sneg) glede na dnevno temperaturo po naslednji enačbi (Parajka in sod., 2007):

$$P_r = \begin{cases} P & \text{če } T_A \geq T_R \\ P \frac{T_A - T_S}{T_R - T_S} & \text{če } T_S < T_A < T_R \\ 0 & T_A < T_S \end{cases}, \quad (28)$$

kjer je:

- P_R padavine v obliki dežja,
- P povprečje dnevnih padavin,
- T_A povprečna dnevna temperatura,
- T_S minimalna izmerjena temperatura v dnevu,
- T_R maksimalna izmerjena temperatura v dnevu.

Snežne padavine izračunamo kot razliko vseh padavin in dežja, po naslednji enačbi:

$$P_S = P - P_R, \quad (29)$$

kjer je:

- P povprečje dnevnih padavin,
- P_R padavine v obliki dežja,
- P_S padavine v obliki snega.

Taljenje snega se začne pri temperaturi nad pragom taljenja T_M , količino staljenega snega izračunamo po naslednji enačbi (Parajka in sod., 2007):

$$M = (T_A - T_M)DDF \text{ če je } T_A > T_M \text{ in } SWE > 0, \quad (30)$$

kjer je:

- M količina staljenega snega na časovni korak,
- DDF faktor temperatura-dan (ang. *degree-day factor*)
- SWE ekvivalent voda/sneg (ang. *snow water equivalent*),
- T_M temperaturni prag, nad katerim se začne taljenje snega,
- T_A povprečna dnevna temperatura.

Primanjkljaj zaradi zadrževanja vode, oz. ekvivalent voda-sneg, se popravi s snežnim korekcijskem faktorjem *SCF* (ang. *Snow Correction factor*). Primanjkljaj zaradi zadrževanja vode za posamezen časovni korak *i* izračunamo kot funkcijo predhodnega časovnega koraka *i-1*, po naslednji enačbi (Parajka in sod., 2007):

$$SWE_i = SWE_{i-1} + (SCF P_S - M)\Delta t , \quad (31)$$

kjer je:

- Δt dnevni časovni korak,
- M količina staljenega snega na časovni korak,
- SWE ekvivalent voda/sneg,
- P_S padavine v obliki snega,
- SCF snežni korekcijski faktor.

3.3.2.2 Model vlažnosti zemljine

Predstavlja generacijo odtoka in spremembe v vlažnosti zemljine (Parajka in sod., 2007). Vlažnost vrhnjega sloja zemljine, ki kontrolira odtok in izgube zaradi izhlapevanja, izračunamo kot funkcijo predhodnega časovnega koraka po enačbi:

$$S_{SM,i} = S_{SM,1-i} + P_R + M - E_A , \quad (32)$$

kjer je:

- S_{SM} vlažnost vrhnjega sloja zemljine,
- M količina staljenega snega na časovni korak,
- P_S padavine v obliki snega.
- E_A izhlapevanje.

Prispevek padavin in taljenja snega k odtoku (ΔSUZ) je izračunan kot funkcija vlažnosti v vrhnjem sloju zemljine z uporabo nelinearnega razmerja med dvema prostima parametroma (FC in β) z naslednjo enačbo (Parajka in sod., 2007):

$$\Delta SUZ = \left(\frac{S_{SM}}{FC} \right)^\beta (P_R + M) , \quad (33)$$

kjer je:

- FC maksimalna kapaciteta vlažnosti zemljine (ang. *Maximum soil moisture storage*),
- S_{SM} vlažnost vrhnjega sloja zemljine,

- P_R padavine v obliki dežja,
 ΔSUZ prispevek padavin in taljenja snega k odtoku,
 M količina staljenega snega na časovni korak,
 β nelinearen parameter, ki kontrolira značilnosti generiranja odtoka.

Če je vrhnji sloj zemljine zasičen, je $S_{SM} = FC$. Če to velja, bodo vse padavine in staljeni sneg prispevali k odtoku. Dejansko izhlapevanje (E_A) se izračuna iz potencialnega izhlapevanja (E_P) kot linearna funkcija vlažnosti zgornjega sloja zemljine z enačbo (Parajka in sod., 2007):

$$E_A = \begin{cases} E_P \frac{S_{SM}}{LP} & \text{če } S_{SM} < LP \\ E_P & \text{če } S_{SM} \geq LP \end{cases}, \quad (34)$$

kjer je:

- LP parameter, ki omejuje potencialno izhlapevanje,
 E_P potencialno izhlapevanje,
 E_A dejansko izhlapevanje,
 S_{SM} vlažnost vrhnjega sloja zemljine.

3.3.2.3 Odzivna in transportna funkcija

Odzivna funkcija predstavlja usmerjanje odtoka na pobočjih in je sestavljena iz dveh "posod", ki predstavljata dva sloja zemljine, zgornjega (S_{UZ}) in spodnjega (S_{LZ}). Odtok zaradi padavin in taljenja snega (ΔSUZ) vstopi najprej v zgornjo posodo in jo zapusti skozi tri možne poti (Parajka in sod., 2007):

- voda odteče iz posode s koeficientom skladiščenja za hitri odziv K_1 ,
- voda se pretoči v spodnjo posodo s koeficientom skladiščenja za počasni odziv K_2 (ang. *slow storage coefficient*) in konstanto precejena C_P (ang. *constant percolation rate*),
- če je presežena meja zadrževanja LS_{UZ} (ang. *threshold of the storage state*), gre voda preko dodatne poti s koeficientom skladiščenja za zelo hitri odziv K_0 .

Odtok iz obeh posod (Q_G) se potem usmeri po trikotni transportni funkciji, ki predstavlja usmerjanje odtoka v strugi. Usmerjanje odtoka poteka po naslednji enačbi (Parajka in sod., 2007):

$$B_Q = \begin{cases} B_{max} - C_R Q_G & \text{če } (B_{max} - C_R Q_G) \geq 1 \\ 1 & \text{drugače} \end{cases} \quad (35)$$

kjer je:

- B_Q osnova usmerjevalne funkcije (ang. *base of the transfer function*),

B_{Max} maksimalno izhodišče pri nizkih pretokih (ang. *maximum base at low flows*) [n dni],
 C_R prosti parameter.

3.3.2.4 Parametri modela

Ker gre za konceptualni model, se njegove parametre ne da povezati z fizičnimi prvinami in se ti parametri običajno določijo z umerjanjem modela. Nastopajoči parametri so:

- SCF snežni korekcijski faktor [0.9-1.5] (ang. *snow correction factor*),
- DDF faktor stopinja-dan [0.0-5.0mm/°C/dan],
- Tr prag temperature, nad katero padavine postanejo dež [1-3°C],
- Ts prag temperature, pod katero padavine postanejo sneg [-3 do 1°C],
- Tm prag temperature, nad katero se začne taljenje snega [-2 do 2°C],
- $LPrat$ parameter, ki omejuje izhlapevanje [0-1],
- FC maksimalno skladiščenje vlažnosti v zemljini (ang. *field capacity, i.e., max soil moisture storage*)
- $BETA$ nelinearni parameter za izračun odtoka (ang. *non-linearity parameter*),
- $k0$ koeficient skladiščenja za zelo hitri odziv [0-2dni] (ang. *storage coefficient for very fast response*),
- $k1$ koeficient skladiščenja za hitri odziv [2-30dni],
- $k2$ koeficient skladiščenja za počasni odziv [30-250 dni],
- $lsuz$ prag stanja skladiščenja, začetek zelo hitrega odziva če je presežena
- $cperc$ konstanta precejanja [0-8.8mm/dan],
- $bmax$ maksimalno izhodišče, osnova pri nizkih pretokih [0-30dni],
- $croute$ prosti parameter [0-0.5 dan²/mm] (ang. *free scaling parameter*).

3.4 Empirični model IHACRES

IHACRES (ang. *Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evapotranspiration and Streamflow data*) je računsko preprost model z minimalnim številom vhodnih podatkov, minimalnim številom parametrov ter preprostim procesom za umerjanje modela. Razvili so ga Jakeman in sod. (1990) in z nadaljnjim razvojem je pokazal naslednje prednosti (Dye in Croke, 2003):

- preprostost, vsebuje minimalno možno število parametrov,
- rezultati so popolnoma osnovani na podatkih in ne na subjektivnosti uporabnika,

- potrebuje majhno število vhodnih podatkov,
- model zadovoljivo opisuje dinamiko toka v porečju,
- možnost povezave parametrov z fizičnimi prvinami porečja.

3.4.1 Paket *hydromad*

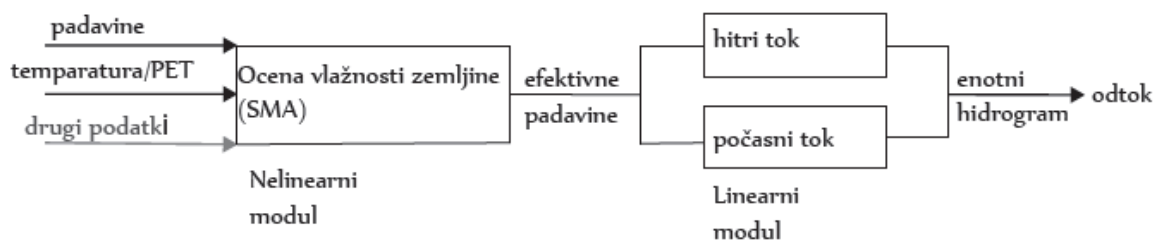
Hydromad paket vsebuje veliko funkcij za primerjavo, izdelavo in analizo različnih hidroloških modelov. Osnovan je na prostorsko-točkovnem empiričnem pristopu IHACRES (identifikacija enotnega hidrograma in komponent padavin, izhlapevanja in odtočnih podatkov) za okoljsko hidrologijo (Andrews, 2011).

Prostorsko-točkovni modeli eksplicitno ne upoštevajo prostorske raznolikosti porečij. Modeli se običajno umerjajo na izbrane časovne intervale in se sklepa, da se razmerja med vhodnimi podatki in parametri modela ne spreminjajo, oz. povezave med podatki so v simulaciji predvidevane kot stacionarne (Andrews, 2011).

Padavinsko odtočni model IHACRES uporabi nelinearni modul za izračun efektivnih padavin in linearni modul, ki efektivne padavine pretvori v odtok (Croke in Jakerman, 2004).

Model IHACRES je osnovan na dveh strukturah (slika 7):

- oceni vlažnosti zemljine (ang. *Soil moisture accounting SMA*), ki predstavlja nelinearni modul,
- usmerjevalni funkciji, ki izračuna enotni hidrogram v linearnem modulu.



Slika 7: Shematski prikaz delovanja modela IHACRES (prirejeno po Kokkonen in Jakeman, 2001)

3.4.2 SMA metoda za določitev efektivnih padavin

Predstavlja nelinearni modul v modelu. SMA metoda z upoštevanjem temperature določi evapotranspiracijo in pretvori padavine v efektivne padavine, torej tisto količino padavin, ki bo v določenem času postala površinski odtok (Andrews, 2011).

3.4.2.1 Faktor primanjkljaja vlažnosti v porečju (CMD)

Metoda primanjkljaja vlažnosti v zemljin (ang. *Catchment Moisture Deficit CMD*) (Croke in Jakerman, 2004) uporabi temperaturo in padavine kot osnovo za izračun evapotranspiracije in odtoka, in predpostavlja, da proces infiltracije ni povezan s temperaturo. Faktor *CMD* je enak nič, ko je porečje zasičeno in narašča s padanjem zasičenosti. Evapotranspiracijo in spremembe v vodni bilanci porečja oceni z masno ravnotežno enačbo s pomočjo predhodnega računskega koraka $t-1$, z obliko (Andrews, 2011):

$$M_{(t)} = M_{(t-1)} - P_{(t)} + E_{(t)} + U_{(t)} \quad (36)$$

kjer je:

- M faktor primanjkljaja vlažnosti v porečju [mm],
- P padavine na območju porečja [mm/dan],
- E_t evapotranspiracija [mm/dan],
- U drenaža oz. infiltracija [mm/dan].

Učinkovitost padavin (ang. *Rainfall effectiveness*) je preprosta funkcija faktorja primanjkljaja vlažnosti v porečju, ki je enaka nič, ko je $M=d$, kjer d predstavlja prag odtoka (ang. *flow threshold*). Prag odtoka predstavlja količino potrebnih padavin, da se pojavi površinski odtok. Je izjemno neobčutljiv parameter, in zaradi tega običajno nima večjega vpliva (Andrews, 2011). V linearni obliki modela učinkovitost padavin dU/dP pada linearno od polnega odtoka ($M=0$). Splošna eksponentna enačba, ki jo z oblikovnim faktorjem lahko pretvorimo v linearno enačbo, ima obliko (Andrews, 2011):

$$\frac{dU}{dP} = 1 - \min\left(1, \left(\frac{M}{d}\right)^\eta\right), \quad (37)$$

kjer je,

- η oblikovni faktor (če je enak ena dobimo linearno obliko enačbe)
- $\frac{dU}{dP}$ učinkovitost padavin,
- d prag odtoka [mm],
- M faktor primanjkljaja vlažnosti v porečju [mm].

Dejanska infiltracija za posamezen časovni korak t predstavlja integral enačbe za učinkovitost padavin (enačba 37) za vsak časovni korak (Andrews, 2011):

$$M_f = \begin{cases} d(-(1-\eta)\frac{P_t - (M_{t-1} - d)}{d} + 1)^{\frac{1}{1-\eta}} & M_{t-1} \leq d \\ d(-(1-\eta)\frac{P_t}{d} + (\frac{M_{t-1}}{d})^{1-\eta})^{\frac{1}{1-\eta}} & d < M_{t-1} \leq d + P_t \\ M_{(t-1)} - P_t & M_{t-1} > d + P_t \end{cases} \quad (38)$$

kjer je:

- M_f faktor primanjkljaja vlažnosti v zemljini, ko so že upoštevane vse padavine in infiltracija,
- P_t padavine v časovnem koraku t [mm],
- η oblikovni faktor (če je enak ena, dobimo linearno obliko enačbe),
- d prag odtoka [mm],
- M faktor primanjkljaja vlažnosti v porečju [mm].

Evapotranspiracija E_T , je preprosta funkcija potencialne evapotranspiracije $E(t)$. Potencialna evapotranspiracija $E(t)$ pa funkcija faktorja primanjkljaja vlažnosti zemljine M . Evapotranspiracijo v posameznem časovnem koraku izračunamo po naslednji enačbi:

$$E_T(t) = e E(t) \min \left[1, \exp \left(2 \left(1 - \frac{M_f}{fd} \right) \right) \right] \quad (39)$$

kjer je:

- f stresni prag/točka venenja (ang. *stress threshold / wilting point*),
- e koeficient evapotranspiracije,
- d prag odtoka (ang. *flow threshold*) [mm],
- E_T evapotranspiracija [mm],
- E potencialna evapotranspiracija [mm].

Parametri v programu R :

- f stresni prag/točka venenja (ang. *stress threshold / wilting point*),
- $shape$ koeficient, ki določa moč drenažne funkcije η (ang. *power in drainage equation*),
- d prag odtoka [mm] (ang. *flow threshold*),
- e koeficient evapotranspiracije.

3.4.2.2 Indeks vlažnosti porečja (CWI)

Druga najpogostejša metoda je indeks vlažnosti porečja (ang. *Catchment Wetness Index CWI*) (Jakeman in Hornberg, 1993), ki je osnovana na indeksu API (ang. *Antecedent Precipitation Index*). Delež padavin r_k , ki prispeva k odtoku (oz. efektivne padavine ER_k) v vsakem časovnem koraku k , izračunamo kot povprečje časovnih korakov k in $k-1$ (Wagener in Wheater, 2006):

$$ER_k = \frac{1}{2}(ms_k + ms_{k-1})r_k \quad (40)$$

kjer je:

- ER efektivne padavine [mm],
- r_k padavine [mm],
- ms indeks vlažnosti porečja.

Indeks ms_k je izračunan po naslednji enačbi (Wagener in Wheater, 2006):

$$ms_k = vr_k + \left[1 - \frac{1}{\tau(t_k)}\right]ms_{k-1} \quad (41)$$

kjer je:

- v faktor, ki zagotavlja, da je volumen simuliranega odtoka enak volumnu merjenega pretoka,
- τ faktor, ki opisuje padanje ms zaradi evapotranspiracije, kot funkcija temperature.

3.4.3 Usmerjevalna komponenta

Predstavlja linearni modul modela, ki ga lahko jemljemo kot samostojni element modela, ločen od transformacije padavin v efektivne padavine, a je natančnost tega modula močno odvisna od samih vhodnih podatkov, ki so bili uporabljeni za izračun efektivnih padavin, saj ima ta vpliv na velikost konice hidrograma in odtok, ki nastopi za njo.

3.4.3.1 Metoda enotnega hidrograma (EXPUH)

Metoda predstavlja eksponentno oblika enotnega hidrograma z dvema paralelno povezanima posodoma. Vsaka komponenta je definirana s časovno konstanto τ in frakcijskim volumnom v , oz. recesijsko stopnjo α (ang. *recession rate*) in odzivom ekstrema β (ang. *peak response*). Vsak parameter ima počasno (s) in hitro komponento (q). Skupni odtok (X) je vsota obeh. Recesijsko stopnjo opišemo z naslednjo enačbo (Andrews in sod., 2011):

$$\alpha = \exp\left(-\frac{1}{\tau}\right), \quad (42)$$

kjer je:

- α recesijska stopnja,
 τ časovna konstanta.

Odziv ekstrema izračunamo po naslednji enačbi:

$$\beta = v(1 - \alpha), \quad (43)$$

kjer je:

- β odziv ekstrema,
 v frakcijski volumen.

Odtok se izračuna kot vsota odtoka počasnih komponent in hitre komponente. Odtok za časovni korak t izračunamo po naslednjem postopku (Andrews in sod., 2011):

$$\begin{aligned} X_s[t] &= \alpha_s X_s[t-1] + \beta_s U[t] \\ X_q[t] &= \alpha_q X_q[t] + \beta_q U[t] \\ X[t] &= X_s[t] + X_q[t] \end{aligned} \quad (44)$$

kjer nastopajo naslednji členi:

- U drenaža oz. infiltracija [mm/dan],
 α_s recesijska stopnja počasne komponente,
 β_s odziv ekstrema počasne komponente,
 X_s odtok počasnih komponent,
 α_q recesijska stopnja hitre komponente,
 β_q odziv ekstrema hitre komponente,
 X_q odtok hitrih komponent.
 $X(t)$ celoten odtok.

V samem računu je potrebno definirati le eno komponento frakcijskega volumna, saj drugi služi v opomin, da se celoten volumen ne sme spremeniti. Parametri v programu R:

- τ_s časovna konstanta počasne komponente,
- τ_q časovna konstanta hitre komponente,
- v_s frakcijski volumen počasne komponente (frakcijski volumen hitre komponente je avtomatsko določen kot preostanek).

4 OCENA UČINKOVITOSTI MODELOV

4.1 Paket hydroGOF

Kriteriji efektivnosti modela so definirani kot matematične vrednosti, ki opisujejo, kako dobro se simulirane vrednosti prilegajo znanim meritvam (Zambrano-Bigiarini, 2013). Paket *hydroGOF* je zasnovan za merjenje in ocenjevanje prileganja simuliranih podatkov in merjenih podatkov, tako grafično kot računsko, kjer kratica GOF pomeni stopnja ujemanja (ang. *Goodness of Fit*). Namenjen je predvsem umerjanju modelov, saj je v paketu veliko število statističnih ocen in indeksov za ocenjevanje ujemanja. Omogoča tudi odstranitev manjkajočih opazovanih ali simuliranih vrednosti še pred računom (Zambrano-Bigiarini, 2013). Ker pri hidrološkem modeliranju ne iščemo vedno samo najvišje ali najnižje vrednosti, je v tem paketu veliko različnih statističnih ocen. Ocene imajo različno občutljivost na različne napake, npr. ocene, osnovane na razliki kvadratov so zaradi občutljivosti na velike napake najbolj primerne, ko nas zanimajo konice (ekstremne vrednosti), a velikokrat precenijo učinkovitost v primeru majhnih vrednosti (bazni odtok), zato paket vsebuje veliko različnih statističnih indikatorjev ocenjevanja modela, kar omogoča umerjanje ne glede na to, na kaj se osredotočimo pri modeliranju. Najpomembnejše ocene so:

- *NSE* Nash-Sutcliffe koeficient (ang. *Nash-Sutcliffe efficiency*),
- *mNSE* modificiran Nash-Sutcliffe koeficient,
- *rNSE* relativni Nash-Sutcliffe koeficient,
- *d* indeks strinjanja (ang. *Index of Agreement*),
- *md* modificiran indeks strinjanja,
- *rd* relativni indeks strinjanja,
- *pbias* odstotek korekcije (ang. *Percent Bias*),
- *bR2* koeficient odločenosti, pomnožen z naklonom linearne regresije med opazovanimi in simuliranimi podatki (ang. *Coefficient of determination multiplied by the slope of the regression line*).

Primer 5: Uporaba paketa *hydroGOF* za izračun učinkovitosti TOPMODEL-a

```
> QobsVer=Qobs[61:92]
> QsimVer=simulacija$Q[61:92]
> QobsVer=Qobs[61:92]
> QsimVer=simulacija$Q[61:92]
> NSeff(QsimVer,QobsVer)
[1] 0.4664307
> QobsCal=Qobs[1:61]
> QsimCal=simulacija$Q[1:61]
> NSeff(QsimCal,QobsCal)
[1] 0.8043942
> mnSeff(QsimVer,QobsVer)
[1] 0.4622169
> mnSeff(QsimCal,QobsCal)
[1] 0.5884628
> rnSeff(QsimCal,QobsCal)
[1] 0.8330875
> rnSeff(QsimVer,QobsVer)
[1] 0.3755701
> br2(QsimCal,QobsCal)
[1] 0.6503425
> br2(QsimVer,QobsVer)
[1] 0.4679925
> d(QsimCal,QobsCal)
[1] 0.9401668
> d(QsimVer,QobsVer)
[1] 0.8434621
> md(QsimCal,QobsCal)
[1] 0.7802786
> md(QsimVer,QobsVer)
[1] 0.7064174
> rd(QsimCal,QobsCal)
[1] 0.9489437
> rd(QsimVer,QobsVer)
[1] 0.8168055
> pbias(QsimCal,QobsCal)
[1] 4
> pbias(QsimVer,QobsVer)
[1] 17.5
```

4.1.1 Koeficient determinacije

Koeficient determinacije (ang. *Coefficient of determination*) je definiran kot kvadratna vrednost koeficienta korelacije po Bravais-Pearson z enačbo (Zambrano-Bigiarini, 2013):

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2, \quad (46)$$

kjer je:

- r^2 koeficient determinacije,
- O merjene vrednosti,
- P predvidene vrednosti.

Ocenjuje disperzijo v seriji podatkov, zajema območje vrednosti med 0 in 1. Opisuje koliko merjene disperzije je v simulaciji. Vrednost 0 pomeni, da korelacije ni, medtem ko vrednost 1 pomeni, da je

predvidevana disperzija enaka merjeni. Ena največjih pomanjkljivosti tega kriterija je, da računa le disperzijo. Posledično bo model, ki konstantno podcenjuje/precenjuje še vedno imel dobro oceno. Zato se pri oceni modela s tem kriterijem, priporoča dodatna obtežba z gradientom regresije (b) na kateri je osnovan r^2 . Če združimo obtežbeni faktor b z r^2 dobimo obtežbeno verzijo ωr^2 (ang. *Coefficient of determination multiplied by the slope of the regression line*), z naslednjo enačbo (Zambrano-Bigiarini, 2013):

$$\omega r^2 = \begin{cases} |b|r^2 & \text{za } b < 1 \\ |b|^{-1}r^2 & \text{za } b > 1 \end{cases}, \quad (47)$$

kjer je:

- r^2 koeficient determinacije,
- b gradient regresije.

Z obtežbo je pod/precenjevanje ocenjeno glede na dinamiko prileganja.

4.1.2 Indeks strinjanja

Indeks strinjanja (ang. *Index of Agreement*) prikazuje razmerje med kvadratom povprečij in potencialno možno napako. Predlagal ga je Wilmott (1981), da bi premostil neobčutljivost Nash-Sutcliffe-ovega koeficienta in koeficienta vztrajnosti za razlike med opazovanimi in predvidevanimi vrednostmi. Indeks strinjanja izračunamo po naslednji enačbi (Zambrano-Bigiarini, 2013):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, \quad (48)$$

kjer je:

- d indeks strinjanja,
- O merjene vrednosti,
- P predvidene vrednosti.

Potencialna napaka v imenovalcu predstavlja največji kvadrat razlike vsakega para, ki ga ta lahko doseže. Vrednost d leži med 0 (ni korelacije) in 1 (popolno ujemanje). Slabosti indeksa so relativno visoke ocene in neobčutljivost na sistematično pre/podcenjevanje modela.

4.1.2.1 Relativni indeks strinjanja

Ta kriterij se računa na osnovi relativne deviacije. S tem so razlike med opazovanimi in simuliranimi vrednostmi kvantificirane kot relativne in tako znižajo vpliv absolutnih vrednosti med visokimi pretoki in ojačajo vpliv majhnih pretokov, saj so v relativnem smislu še vedno veliki. Zavzema vrednosti med

0 (nikakršno ujemanje) in 1 (popolno ujemanje). Relativni indeks strinjanja predstavlja relativno verzijo indeksa strinjanja z naslednjo enačbo (Zambrano-Bigiarini, 2013):

$$rd = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - S_i}{O_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|}{O} \right)^2}, \quad (49)$$

kjer je:

- rd relativni indeks strinjanja,
- O merjene vrednosti,
- P predvidene vrednosti.

4.1.2.2 Modificiran indeks strinjanja

Je pogosto uporabljen za premagovanje preobčutljivosti na ekstremne vrednosti, izračunamo ga po naslednji enačbi (Zambrano-Bigiarini, 2013):

$$d_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^j}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^j} \quad j \in N, \quad (50)$$

kjer je:

- d_j modificiran indeks strinjanja,
- O merjene vrednosti,
- P predvidene vrednosti.

Če je $j=1$, je precenjevanje poplavnih konic znižano in indeks strinjanja daje nižje vrednosti koeficienta. To razložimo na dva načina, nižje vrednosti pustijo širše območje za kalibracijo in nižje vrednosti so lahko intrepitirane kot slabša ocena v primerjavi s kvadratno različico enačbe. Z zviševanjem j se povečuje občutljivost na ekstremne vrednosti.

4.1.3 Nash-Sutcliffe-ova učinkovitost

Koeficient Nash-Sutcliffe (*NSE* (ang. *Nash-Sutcliffe efficiency*)), kot sta ga predlagala Nash in Sutcliffe (1970), je definiran kot ena minus vsota absolutne kvadratne razlike med opazovanimi in predvidevanimi vrednostmi. Nash-Sutcliffe-ov koeficient izračunamo po naslednji enačbi (Zambrano-Bigiarini, 2013):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (51)$$

kjer je:

NSE Nash-Sutcliff-ov koeficient,

O merjene vrednosti,

P predvidene vrednosti.

NSE zavzema vrednosti med 1 (popolno prileganje) in $-\infty$. Vrednost manjša od nič pomeni, da je povprečje opazovanih vrednosti bolj učinkovito od modela. Največja pomanjkljivost koeficienta je, da se razlike med opazovanimi in predvidevanimi vrednostmi računa kot kvadrat, posledično so večje vrednosti precenjene, manjše vrednosti pa zanemarjene.

4.1.3.1 Relativni Nash-Sutcliffe

Kriterij se računa na osnovi relativne deviacije. S tem so razlike med opazovanimi in predvidevanimi vrednostmi kvantificirane kot relativne, tako se zniža vpliv absolutnih vrednosti med visokimi pretoki, in ojači vpliv majhnih pretokov, saj so v relativnem smislu še vedno veliki (Zambrano-Bigiarini, 2013):

$$rNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - S_i)^2}{\bar{O}}}{\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - \bar{O})^2}{\bar{O}}}, \quad (52)$$

kjer je:

$rNSE$ relativni Nash-Sutcliff-ov koeficient,

O merjene vrednosti,

P predvidene vrednosti.

4.1.3.2 Modificiran Nash-Sutcliffe

Modificiran NSE je pogosto uporabljen za premagovanje preobčutljivosti na ekstremne vrednosti, ki jih povzroči kvadrat napak. Zato lahko napišemo posplošen zapis za NSE (Zambrano-Bigiarini, 2013):

$$mNSE_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^j}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^j} \quad j \in N, \quad (53)$$

kjer je:

$mNSE_j$ modificiran Nash-Sutcliffe koeficient,

O merjene vrednosti,

P predvidene vrednosti.

4.1.4 Odstotek korekcije

Odstotek korekcije (ang. *Percent Bias*) oceni povprečno težnjo simuliranih vrednosti, da so večje/manjše od merjenih vrednosti. Optimalna vrednost je nič, saj manjše vrednosti kažejo natančnost modela. Pozitivne vrednosti kažejo precenjevanje korekcije, medtem ko negativne vrednosti kažejo podcenjevanje korekcije. Izračunamo ga po naslednji enačbi (Zambrano-Bigiarini, 2013):

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i}, \quad (54)$$

kjer je:

- $PBIAS$ odstotek korekcije,
- O merjene vrednosti,
- P predvidene vrednosti.

5 OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA

5.1 Geografke in hidrografske značilnosti

Porečje Glinščice (slika 8) se nahaja v osrednjem delu Slovenije in se razteza v vzhodni del Ljubljane (Šentvid, Dravljje, Šiška, Rožnik in Rožna dolina).

Glinščica izvira pod severovzhodnimi obronki Toškega čela in pri Podutiku preide v ravninski del Ljubljanske kotline. Topografska slika porečja je sestavljena iz gričevnatega dela na vzhodu in razširjenega ravninskega dela na jugu. Relief porečja Glinščice je precej raznolik, od strmih povirnih območij do ravníc. Porečje Glinščice sega na severni strani v pobočje Toškega čela in Črnega vrha, razvodnica na vzhodu sega v urbano območje mesta Ljubljane (Dravljje, Šiška), preko Šišenskega hriba in Rožnika do izliva v Gradaščico, ki predstavlja najjužnejšo točko porečja. V smeri proti zahodu poteka razvodnica skozi urbano območje, prek Brda vse do Tičnice, kjer se usmeri proti severu preko Stražnega vrha, Prevala do Toškega čela. Večji pritok Glinščice je Pržanec, čigar porečje sega v območje Velike trate in Male trate in odvaja vodo z večinoma ravninskega dela vzhodno od Glinščice. Padavinsko prispevno območje obsega 17.4 km² (Rusjan in sod., 2003). Skupno prispevno območje Glinščice je nekoliko večje in zajema 19.3 km² površine. Hidrološka slika porečja Glinščice se je močno spremenila, zlasti v obdobju zadnjih 20 let. Obsežna urbana območja so se razširila predvsem na območju Podutika, Dravelj, Kosez in Brda. Ta ravninska območja so pred pozidavo le malo prispevala k izoblikovanju vrhov hidrogramov odtoka (Rusjan in sod., 2003). S povečanjem deleža neprepustnih površin (pozidava, prometne površine) so se povečali odtočni koeficienti, izgradnja meteorne kanalizacije je dodatno prispevala k zmanjšanju časa koncentracije. Ocenjeno je bilo, da je na celotnem porečju Glinščice delež urbanih površin 38 % oziroma 6,6 km² (Rusjan in sod., 2003). Padavinsko prispevno območje Glinščice obsega 16,85 km². Položaj odvodnice znotraj urbanega območja določa odvodnja meteornih voda s kanalizacijskim sistemom, zato orografska razvodnica ne sovпада vedno s prispevnim območjem Glinščice. Večji pritok Glinščice je Pržanec, ki odvaja vodo s pretežno ravninskega dela vzhodno od Glinščice. Porečje Glinščice je razdeljeno na tri prispevna območja na 6. nivoju šifranta padavinskih območij vodotokov Republike Slovenije (Šraj, 2000). Večji del porečja Glinščice pokriva gozd (48,6 %), sledijo kmetijske površine (22 %), ostalo pa so urbanizirane površine (10,6 %) (Brilly in sod., 2006; Pestotnik, 2011).



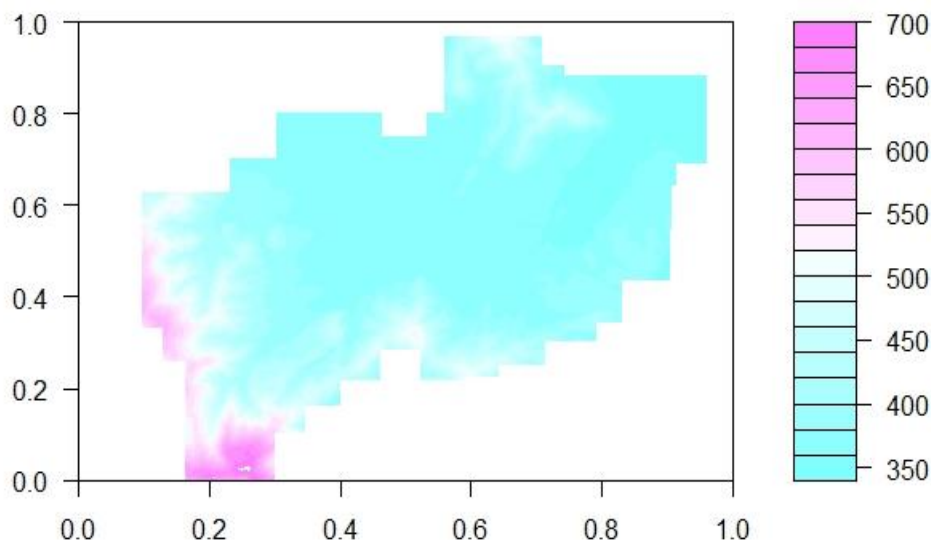
Slika 8: Prikaz reliefa porečja Glinščice z vodotoki (ARSO, 2014), razvodnicami ter šifrantom padavinskega območja (Šraj, 2000)

5.2 Topografija in raba tal

5.2.1 Topografija in geologija

Porečje Glinščice je topografsko zelo raznoliko, saj ga sestavljajo ravninski in gričevnati deli. Gričevnati deli se nahajajo predvsem na zahodu in vzhodu, medtem ko ravninski deli prevladujejo v notranjosti in na južnem delu porečja. Razlike v nadmorski višini so zato relativno velike (okoli 35m), to pa posledično pomeni, da bo tudi hidrološki režim v porečju zelo raznolik. Kot je razvidno iz slike 9 je notranjost porečja zelo ravna in velikega nihanja v nadmorski višini ni, medtem je pa obrobje porečja na severnem in vzhodnem delu gričevnato.

Matično podlago tvorijo aluvialne naplavine, ki prekrivajo starejšo pleistocensko usedlino. V spodnjih plasteh (od 50 do 100 cm navzdol) se pojavljajo plasti peska in prod, gornji, površinski del pa sestavlja meljasto glinasto ilovnat material. Tla raziskovalnega območja so enotno grajena. Spadajo v razred hidromorfoloških tal in sicer v skupino karbonatnih glejev z bolj ali manj izraženim površinskim oglejevanjem (Pestotnik, 2011).

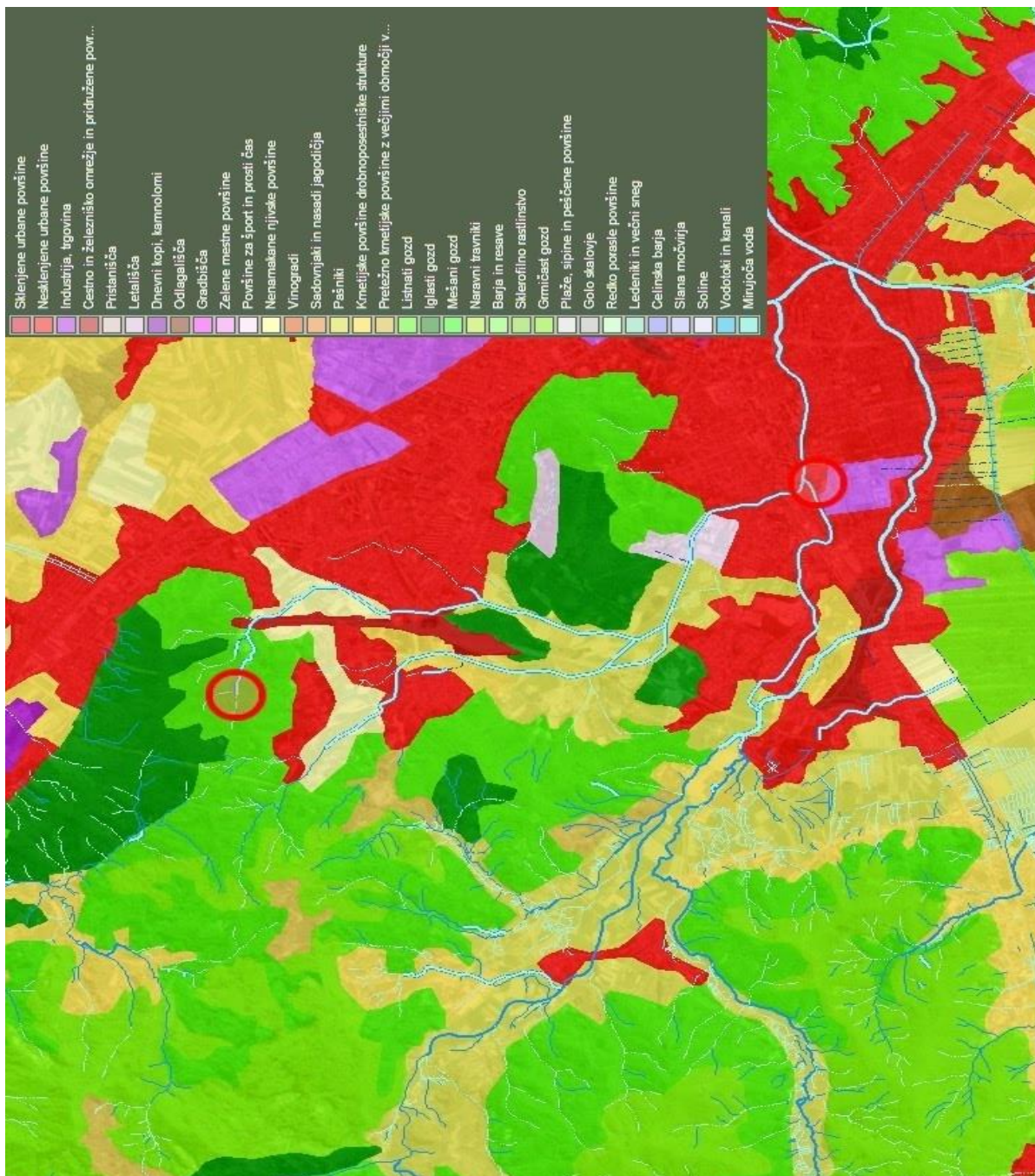


Slika 9: Prikaz nadmorskih višin obravnavanega območja

5.2.2 Raba tal

Pokrovnost tal ima vpliv na več značilnosti procesa generiranja odtoka s porečja. Infiltracija padavin v zemljinu je močno odvisna od same pokrovnosti porečja, saj so goste urbane površine običajno prekrivane z materiali, ki imajo zelo slabo prepustnost in s tem onemogočajo infiltracijo padavin v zemljinu in hitrejši odtok, medtem ko zelene in gozdne površine "upočasni" proces odtoka zaradi večje infiltracije padavin v zemljinu in naravnih preprek. Potencialno izhlapevanje je tudi lahko pogojeno z rabo tal, saj odprte površine omogočajo hitrejše vračanje padavin v atmosfero medtem ko gozdne površine onemogočajo izhlapevanje, saj krošnje preprečujejo dostop sončnega sevanja do tal in tako znižujejo izhlapevanje v atmosfero.

Porečje Glinščice je glede pokrovnosti tal zelo raznoliko. Na skrajnem jugu in severno-vzhodnem delu porečja prevladujejo urbane površine, medtem ko v notranjosti prevladujejo zelene površine (travniki, manjše kmetijske površine) ter gozdovi. Kot je razvidno iz slike (slika 10) je porečje glede pokrovnosti izjemno raznoliko, kar tudi pomeni, da bo znotraj porečja hidrološki režim zelo raznolik.



Slika 10: Prikaz rabe tal (ARSO, 2014)

5.3 Podnebje

Območje zajema prehodno podnebje iz gorskega podnebja Julijskih Alp v milejše podnebje Ljubljanske kotline (Dirnbek, 2009). Največja 24-urna višina padavin s povratno dobo 100 let znaša med 150-180 mm, povprečna letna najvišja dnevna temperatura 14-16 °C, povprečna letna najnižja dnevna temperatura pa 4-8 °C, najvišja snežna odeja s povratno dobo 50 let 100-150 cm, povprečna skupna višina novozapadlega snega med obdobjem 1972-2000 je 60-100 cm (ARSO, 2014).

5.4 Hidrologija

Porečje Glinščice (slika 8) je po šifrantu padavinskih območij RS padavinsko območje petega reda porečja Save s šifro 14912. Slednje sestavljajo tri podpovodja, in sicer prispevno območje glavnega toka (149121), prispevno območje Pržanca (149122) in prispevno območje od sotočja Glinščice in Pržanca do izliva v Mestno Gradaščico (149123) (Šraj, 2000; Pestotnik, 2011).

Preglednica 3: Šifrant podpovodij Glinščice na 6.ravni (Šraj, 2000)

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

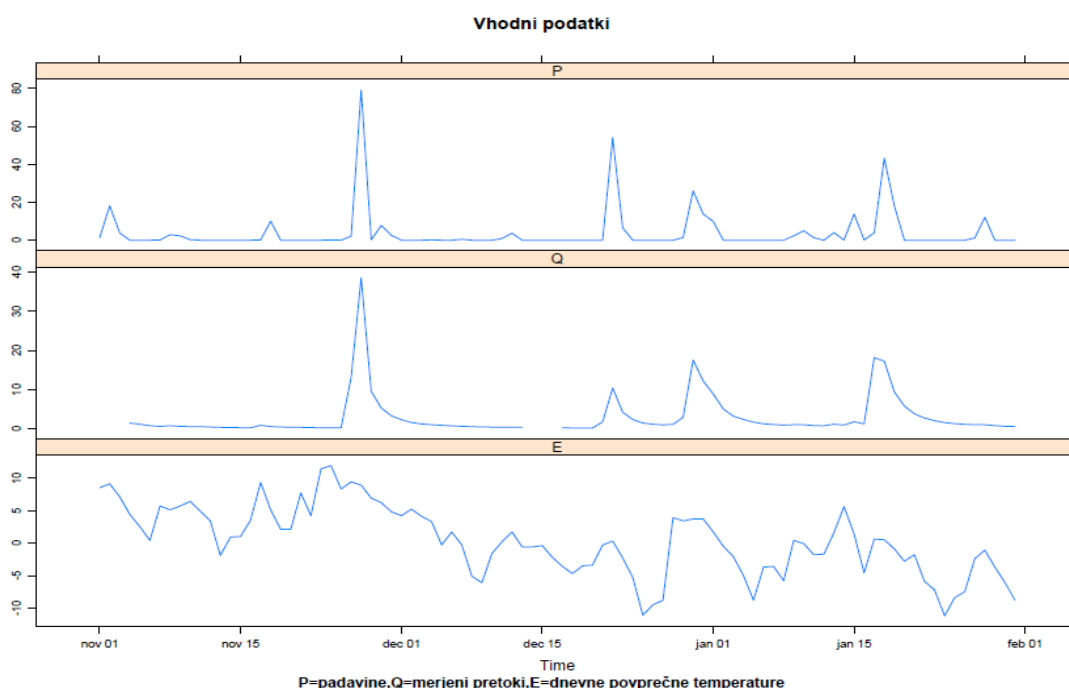
Na povodju Glinščice deluje 5 padavinskih postaj, na katerih se merijo padavine. V neposredni bližini pa je še padavinska postaja ARSO za okolje Ljubljana-Bežigrad ter padavinski postaji Livada in Kožarje (Pestotnik, 2011).

6 IZDELAVA HIDROLOŠKIH MODELOV S PROGRAMOM R

V nadaljevanju je opisana izdelava treh hidroloških modelov v programu R (R-project, 2013) za primer porečja Glinščice. Prvi hidrološki model je semi-distribuiran fizični model z imenom TOPMODEL, ki uporabi topografijo kot merilo hidrološke podobnosti. Drugi je konceptualni model, osnovan na strukturi HBV modelov, ki ni osnovan na fizični temveč na teoretični osnovi in skuša konceptualno oponašati dogajanje v naravi. Zadnji model pa predstavlja empirični model IHACRES, ki nima ne konceptualne ne fizične osnove, ampak določi odtok z matematično analizo.

6.1 Vhodni podatki

Osnovni vhodni podatki (slika 11) za izdelavo hidroloških modelov zajemajo podatke o padavinah evapotranspiraciji ter merjenimi odtoki. Dnevni podatki o padavinah, temperaturah in evapotranspiraciji so bili pridobljeni za padavinsko postajo Lj. Bežigrad za obdobje 1.11.2003-31.1.2004 in so prosto dostopni na spletnih straneh Agencije RS za okolje (ARSO, 2013). Uporabljeni so bili tudi podatki o merjenih odtokih na porečju Glinščice za isto obdobje (Katedra za splošno hidrotehniko), ter podatki o topografiji v obliki digitalne baze višin (Geodetska uprava RS) (slika 9).



Slika 11: Prikaz vhodnih podatkov (dnevne povprečne temperature (E [°C]), merjeni pretoki (Q [mm/dan]) ter padavine (P [mm]))

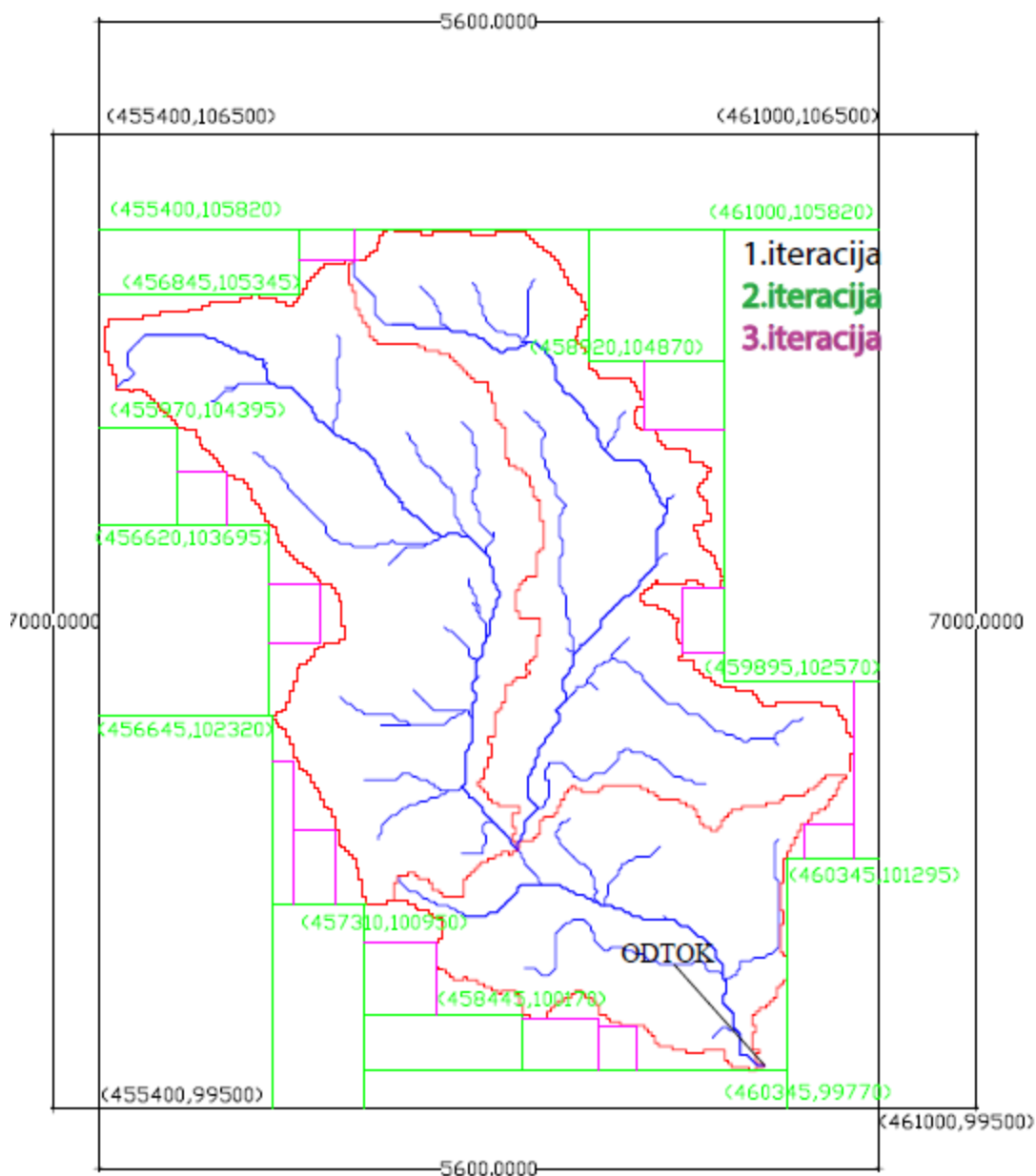
6.2 Izdelava semi-distribuirnega fizičnega modela TOPMODEL za porečje Glinščice

V večini porečij so prostorski vzorci hidroloških zajemov in tokov odvisni od topografije. TOPMODEL je postal vsesplošno uporabljen za hidrološko modeliranje porečij zaradi upoštevanja topografije, medtem ko se izogiba kompleksnosti modelov s popolno porazdeljenostjo. V primerjavi z drugimi modeli porečje ni porazdeljeno v homogene enote, ampak v naravno heterogenost (topografija), vplivi na hidrološki proces pa so zastopani preko porazdelitvenih funkcij (Seibert, 1997). V tem poglavju je opisana izdelava semi-distribuirnega modela TOPMODEL in priprava podatkov, ki so zato potrebni. Postopek izdelave modela je ločen na več komponent:

- priprava topografskih podatkov,
- določitev velikosti porečja in odtočne točke,
- identifikacija rečnih teles ter določitve razdalje od odtočne točke,
- izdelava modela,
- rezultati,
- analiza občutljivosti.

6.2.1 Priprava topografskih podatkov

TOPMODEL je osnovan na osnovi t.i topografskega indeksa, ki topografijo uporabi kot merilo hidrološke podobnosti. Nizek indeks je pokazatelj zelo strmih površij, visok indeks pa kaže na veliko gorvodno površino in majhno površino odtočnega kanala (npr.doline) (Seibert, 1997). Kot glavni vir topografskih podatkov je bil uporabljen digitalni model višin (DMV) resolucije 5 m (GURS). Resolucija DMV je pomembna, saj TOPMODEL določi specifični odtok na površino celice, ki je določena s kvadratom resolucije DMV (v tem primeru 25 m^2). Velikost izbranega računskega območja je pomembna, saj lahko s prevelikim območjem kot rezultat pridobimo napačne glavne odvodnike porečja zaradi močnega vpliva topografije. Določanje območja uporabljenega DMV je potekalo v treh iteracijah. V prvi iteraciji smo izrezali pravokotnik, ki se najbolj prilega porečju Glinščice (slika 12). V drugi iteraciji smo iz tega pravokotnika dodatno izrezali več večjih koščkov, v tretji iteraciji pa smo še dodatno izrezali nekatere manjše koščke (slika 12). S takim postopkom najbolj optimalno približamo računsko porečje tistemu v naravi.



Slika 12: Postopek določitve računskega porečja Glinščice

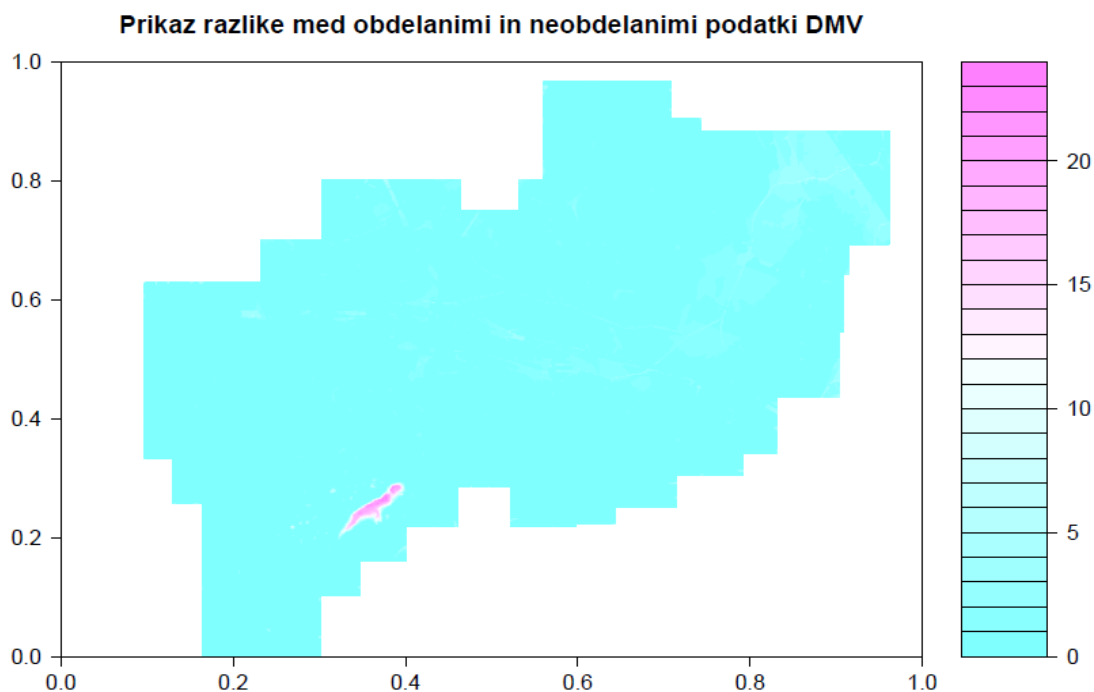
Ko je bil DMV pripravljen, smo ga pretvorili v obliko matrike (matrika dimenzij 1401x1121), ki vsebuje le višine, saj tako zahteva program R (datoteka *GLIN5(porečje).csv*). Preden izbrani DMV uporabimo za izračun topografskega indeksa, je predhodno potrebno zapolniti depresije s funkcijo *sinkfill()* (Primer 6), saj če lokalnih depresij ne zapolnimo, pride v računu do primanjkljaja odtoka, saj se v računskem smislu voda "ujame" v depresiji in ne more odteči. Zaradi velikega števila točk DMV, je bilo potrebno zapolnitev lokalnih depresij izvesti v več iteracijah s ponavljanjem prvotnega

ukaza. Kot je vidno iz slike 13 so razlike med obdelanimi in neobdelanimi podatki majhne za večino porečja, izjema je le del terena na SZ porečja.

Primer 6: Priprava topografskih podatkov

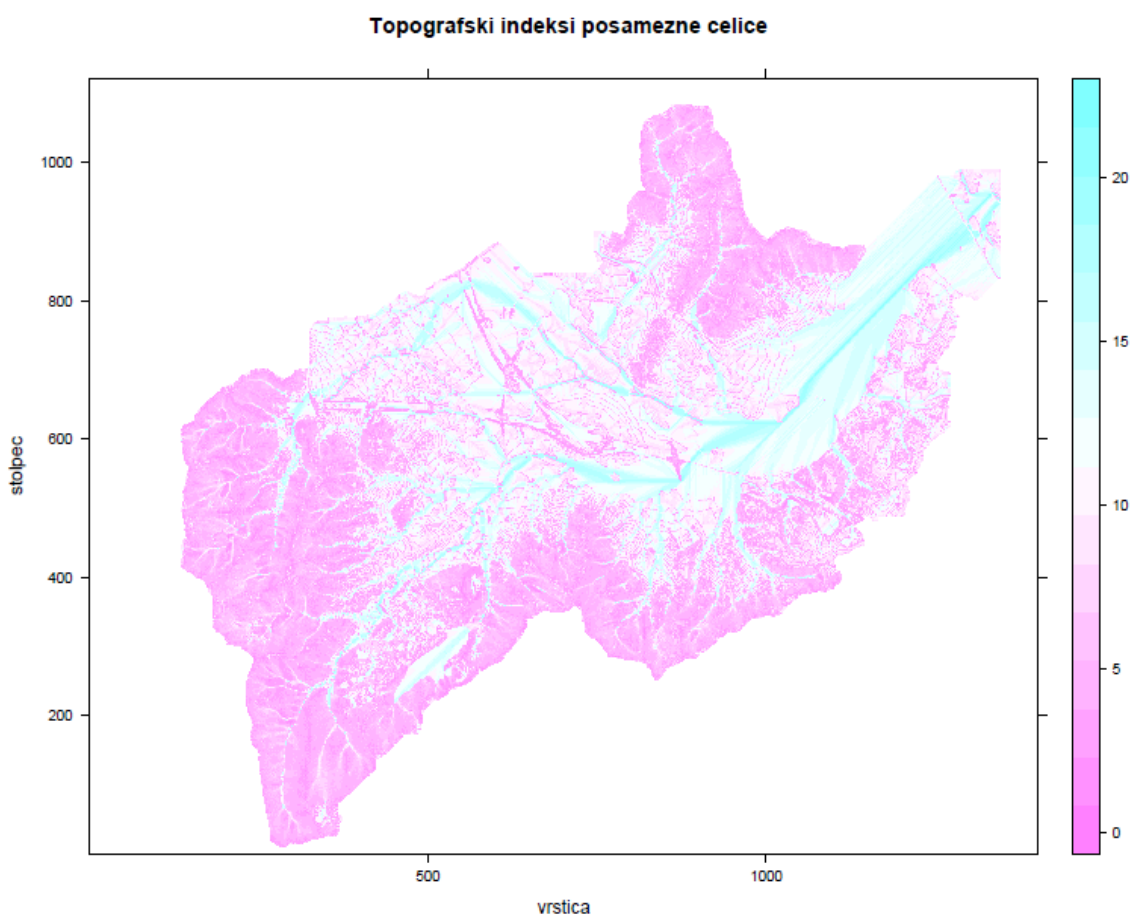
```
> library("topmodel", lib.loc="D:/R-3.0.2/library")
> setwd("C:/Users/Blaž/Desktop/seminar/Rdelo")
> DEMporečje<-read.csv("GLIN5(porečje).csv",header=F)
> DEMporečje<-as.matrix(DEMporečje,ncol=1121,nrow=1400)
> DEMsinkfill<-sinkfill(DEMporečje,5,0.1)
Maximum number of iterations reached (100).
Sink removal is probably not complete; please run again
number of sinks left = 22421
> DEMsinkfill<-sinkfill(DEMsinkfill,5,0.1)
#sinkfill(datoteka,resolucija DMV,minimalni naklon terena ki se bo
ohranil)
Maximum number of iterations reached (100).
Sink removal is probably not complete; please run again
number of sinks left = 13959
> DEMsinkfill<-sinkfill(DEMsinkfill,5,0.1)
number of iterations = 64
number of sinks left = 0
>write.table(DEMsinkfill,file="DEMfill.csv",sep="," ,row.names=F,col.names=
F)#zapis zapolnjenjega DMV v datoteko
> filled.contour(razlika,main="Prikaz razlike med obdelanim in neobdelanim
DMV")

> I<-topidx(DEMsinkfill,5)#izračun topografskih indeksov
> filled.contour(I$atb,main="Prikaz topografskega indeksa posamezne
celice")
```



Slika 13: Prikaz razlike med obdelanimi višinami in neobdelanimi višinami

Zadnji korak priprave topografskih podatkov je izračun topografskega indeksa (slika 14), s funkcijo *topidx()*. Rezultat funkcije *topidx()* je datoteka, sestavljena iz dveh delov, prvi vsebuje izračunane topografske indekse (*I\$atb*), drugi pa prispevno površino posamezne celice (*I\$area*), ki bo uporabljena pri določitvi porečja. Kot je razvidno iz slike 14 imajo vodotoki najvišje vrednosti topografskega indeksa, kar je posledica velike gorvodne prispevne površine ter majhne odtočne površine. Tako pridobljeni podatki predstavljajo osnovo za hidrološki model TOPMODEL, saj bomo s pomočjo teh podatkov lahko določili velikost porečja, oddaljenost posamezne točke od odtočne točke ter posledično čas potovanja vode do odtoka.



Slika 14: Prikaz vrednosti topografskih indeksov za posamezno celico porečja Glinščice

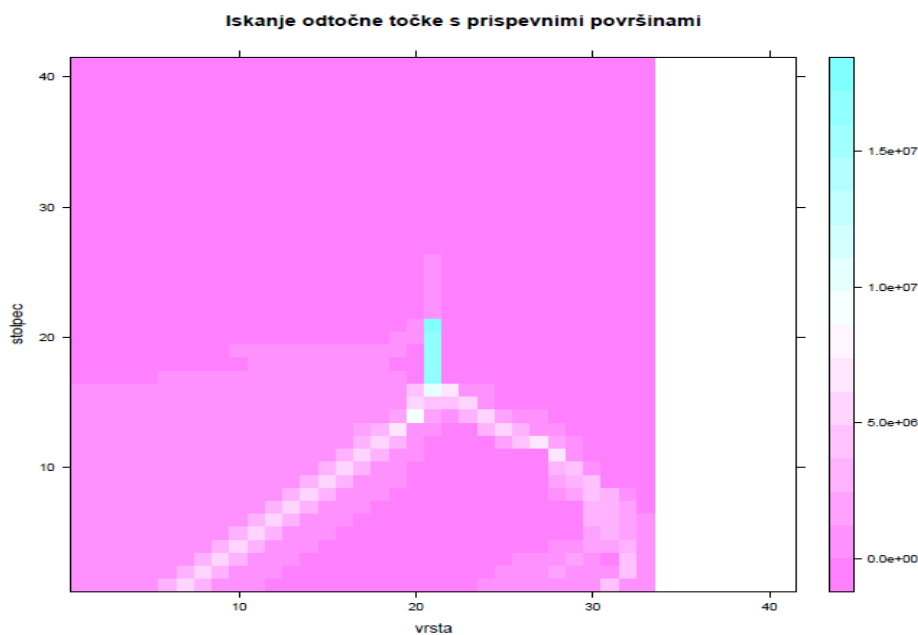
6.2.2 Določitev porečja in odtočne točke

Meje porečja so v naravi poznane, vendar jih je potrebno še definirati v samem programu R, kar naredimo s funkcijo *subcatch()*, ki določi porečje na podlagi prispevnih površin (*I\$area*). Odtok s porečja odteče preko neke odtočne točke, ki predstavlja točko, preko katere bo odtok zapustil porečje. Odtočna točka je v naravi poznana, vendar se zaradi različnih algoritmov v modelu, obdelave topografskih podatkov ter nenatančnosti vhodnih podatkov lahko rahlo premakne in tako vpliva na

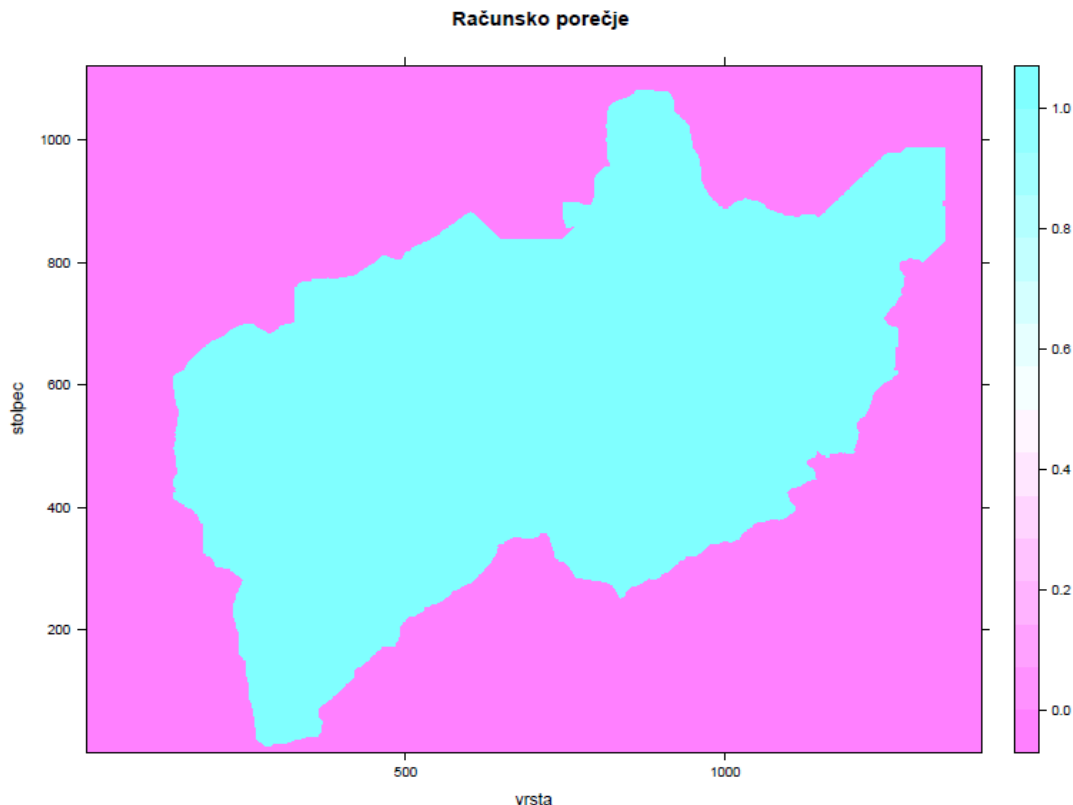
samo velikost porečja. Ker TOPMODEL razlaga porečje kot mrežo posameznih celic, je potrebno najti celico z največjo prispevno površino, saj ta predstavlja odtočno točko. Za porečje Glinščice vemo, da se odtočna točka nahaja v JV delu porečja, in ob upoštevanju velikosti celice (5x5 m), lahko sklepamo, do bo odtočna točka ležala v bližini celice (1340, 950). Iz slike 15 je razvidno da je izbrana točka (prikazana je na sredini slike) rahlo oddaljena od odtočne točka. Z rahlim premikom malo višje ter levo pa opazimo točko z zelo veliko prispevno površino in lahko sklepamo, da je to odtočna točka, na podlagi katere bo določena velikost porečja (celica (1335, 963)). Z natančno lokacijo odtočne točke lahko določimo računsko porečje (slika 16) s funkcijo *subcatch()*. Računska površina porečja znaša 16.35 km² kar je zelo blizu površini porečja v naravi, ki znaša 16.85 km². To razliko lahko pripišemo samemu algoritmu za določanje velikosti porečja, obdelavi topografskih podatkov ter sami nenatančnosti topografskih podatkov. Predstavljeno računsko porečje bo v nadaljnjih korakih predstavljalo osnovo za izračun preostalih količin.

Primer 7: Iskanje odtočne točke in določitev računskega porečja

```
> porecje<-outlet(I$area,c(1340,950),30)#postopek iskanja  
odtočne točke  
> levelplot(porecje)  
> levelplot(porecje,main="Iskanje odtočne točke z prispevnimi  
površinami")  
> porecje<-subcatch(DEMfill,c(1335,963))  
> levelplot(porecje)  
> sum(porecje)#št.celic v porečju  
[1] 654064  
> površina=sum(porecje)*25/1000000#površina računskega porečja  
v km2  
> površina  
[1] 16.3516
```



Slika 15: Prikaz iskanja odtočne točke s prispevnimi površinami



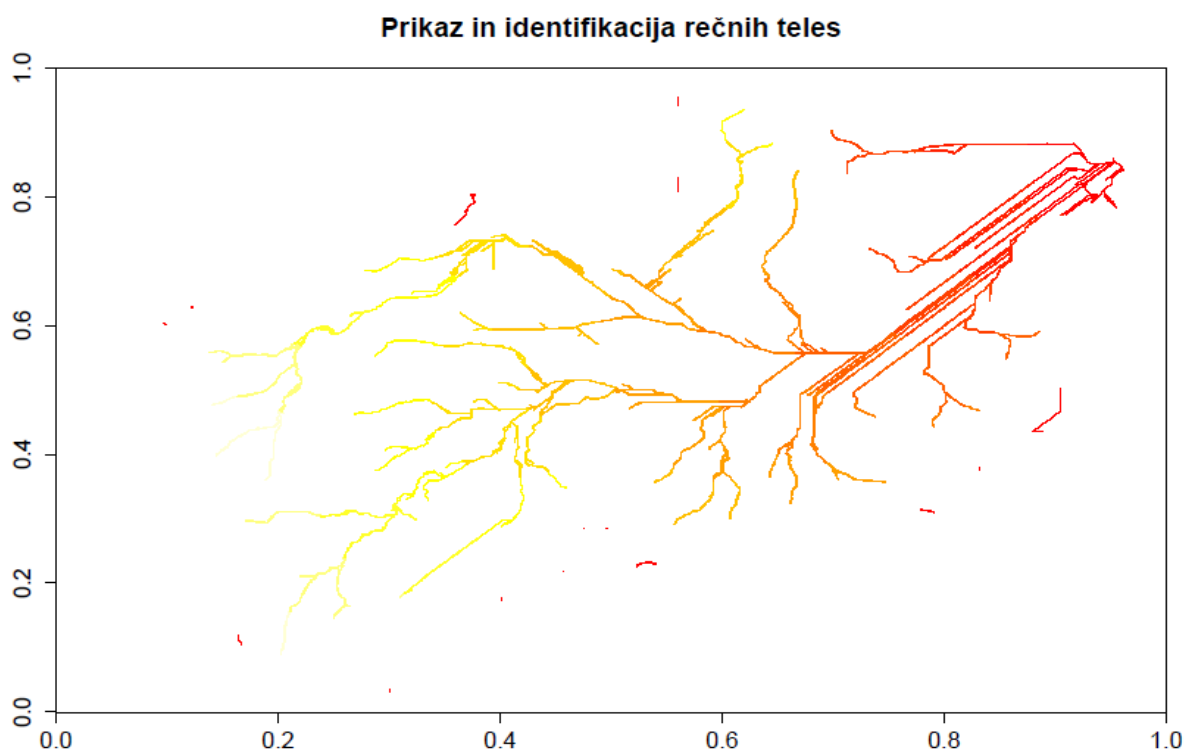
Slika 16: Prikaz računskega porečja Glinščice

6.2.3 Identifikacija rečnih teles in določitev oddaljenosti od odtočne točke

Rečna telesa predstavljajo glavne odvodnike odtoka s porečja in tudi močno vplivajo na sam čas potovanja odtoka od izvora do odtočne točke (slika 18). V programu R jih določimo na podlagi topografskega indeksa ter prispevnih površin s pomočjo vizualne interpretacije (slika 17). Mejni vrednosti teh dveh količin želimo določiti tako, da bo slika rečnih teles čim bližje tisti v naravi, vendar ker gre za subjektivno odločitev, se pogosto že tukaj naredi manjša napaka. Vse celice, ki bodo presegle to mejo, bodo klasificirane kot vodotok. Po nekaj iteracijah smo za mejno vrednost topografskega indeksa vzeli 16.3 ter 10000 za prispevno površino. Gre za subjektivno določitev parametrov, saj so parametri določeni na podlagi vizualne interpretacije in niso strogo določeni kot optimalni.

Primer 8: Identifikacija rečnih teles ter izračun oddaljenosti od odtočne točke

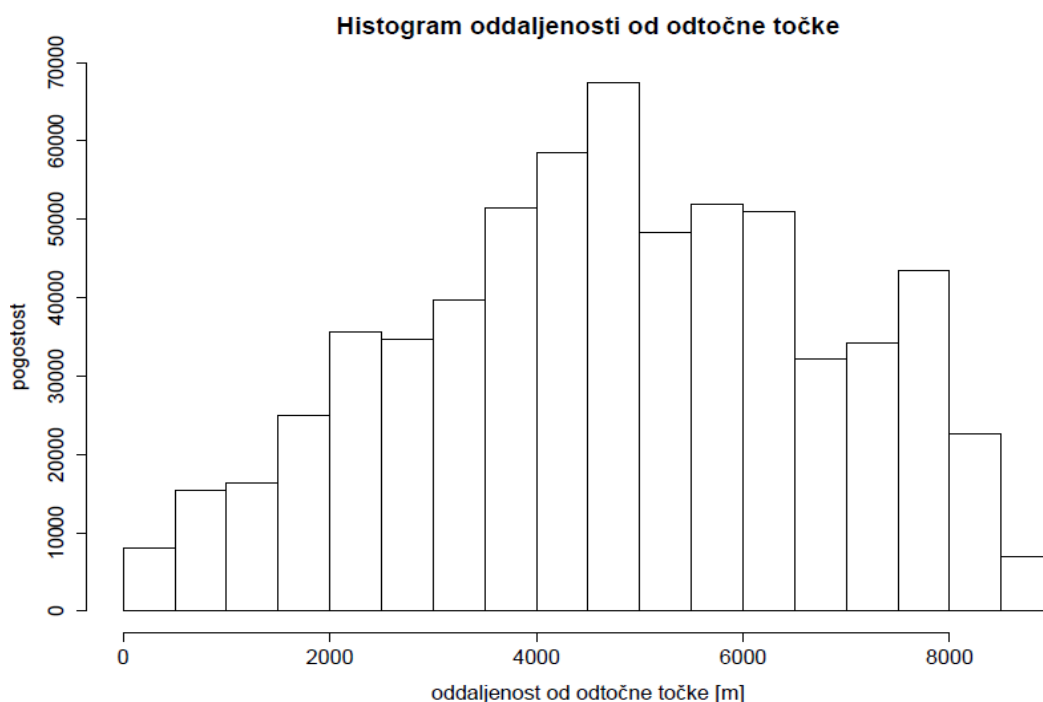
```
> reke<-river(DEMfill,I$atb,I$area,5,16.3,10000)
> image(reke)
> image(reke,main="Prikaz in identifikacija rečnih teles")
> flowlength<-flowlength(DEMfill,c(1335,963))*5
> flowlength<-hist(flowlength,15,main="Histogram oddaljenosti od odtočne
točke",ylab="pogostost",xlab="odaljenost od odtočne točke [m]")
> delay<-
data.frame(distance=flowlength$breaks,area=c(0,flowlength$counts)/sum(flowlengt
h$counts))
> delay[,2]<-cumsum(delay[,2])
> topidxmap<-I$atb*porečje
> topidxmap[!is.na(reke)]<-NA
> levelplot(topidxmap,main="Topografski indeksi posamezne
celice",xlab="vrstica",ylab="stolpec")
> razredi<-make.classes(topidxmap,16)
```



Slika 17: Prikaz rečnih teles

Za hidrološke modele je pomembna tudi razporeditev odtoka ter posledično čas potovanja vode od izvorne do odtočne točke. S pomočjo funkcije *flowlength()* v programu R določimo oddaljenost posamezne celice do odtočne točke oz. pot, ki jo mora narediti voda od točke izvora pa do odtočne točke. Na podlagi teh potovalnih časov lahko razdelimo porečje na posamezne razrede, kar pa je tudi eno najpomembnejših vhodnih datotek za nadaljne korake. Funkcija *flowlength()* vrne oddaljenost v enotah celice, torej je potrebno rezultat množiti z dolžino stranice celice, kot je prikazano v primeru (primer 8). Histogram oddaljenosti celice od odtočne točke kaže slika 18. Vidimo, da je največje

število celic oddaljeno 4000-4500 m od odtočne točke porečja, drugače pa je histogram "zvonaste" oblike, kar kaže na dokaj enakomerno porazdelitev oddaljenosti. Za nadaljnje izračune potrebujemo histogram v kumulativni obliki, saj tako dobimo eno od pomembnejših vhodnih datotek (datoteka *delay*) za hidrološki model TOPMODEL v programu R.



Slika 18: Histogram oddaljenosti posameznih celic od odtočne točke porečja

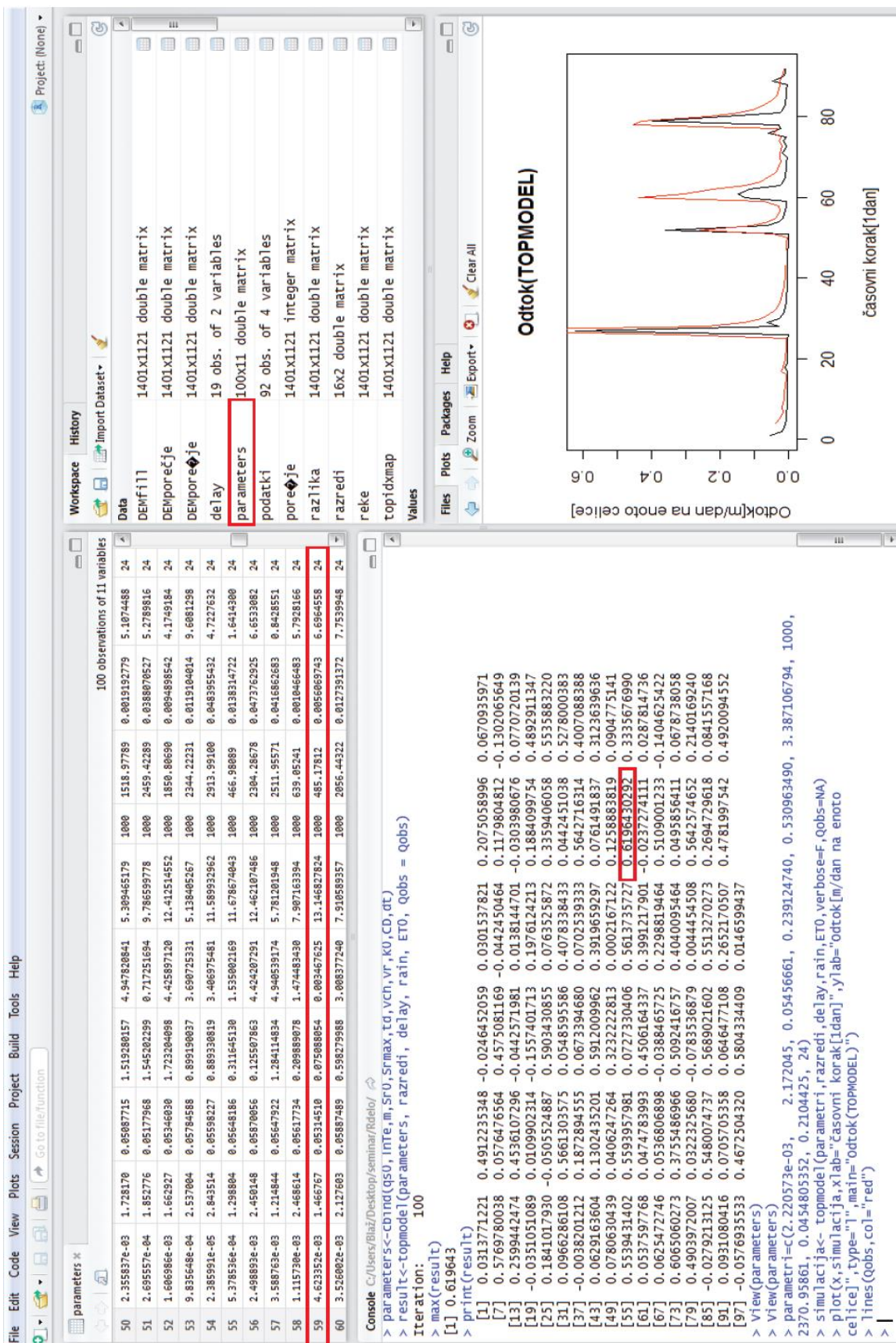
6.2.4 Umerjanje modela ter simulacija

Umerjanje hidroloških modelov je pomembno, saj z že merjenimi podatki o odtoku lahko za določeno porečje določimo parametre modela tako, da se simulirani podatki najbolj prilegajo merjenim. Načinov umerjanja je veliko, umerjamo lahko vizualno, s pomočjo kriterijev učinkovitosti ali pa na podlagi izkušenj. V paketu TOPMODEL je vključeno orodje za umerjanje, ki temelji na kriteriju učinkovitosti, oziroma na Nash-Sutcliffe-ovem koeficientu. Orodje za umerjanje vzame naključne vzorce parametrov, ki jim določimo območja vrednosti, v katerih se ti nahajajo, nato pa s podanimi vrednostmi merjenih odtokov izračunamo za vsako kombinacijo parametrov pripadajoč Nash-Sutcliffe-ov koeficient. Tukaj je potrebno opozoriti, da paket TOPMODEL že avtomatično razdeli območje na obdobje umerjanja in validacije po metodi Monte Carlo, a ker je bil naš namen primerjati ocene z drugimi modeli, ki nimajo vgrajenega takega orodja, so bile ocene narejene za specifično določeno obdobje. Računsko obdobje 1.11.2003-31.1.2004 smo razdelili na obdobje umerjanja 1.11-31.1.2003 in obdobje validacije 1.1-31.1.2004. Ta razdelitev preučevanega obdobja je pomembna, saj dajejo hidrološki modeli za obdobja umerjanja najboljše rezultate in jih je zato potrebno še preveriti za nepreverjena obdobja, da dobimo ocene realne učinkovitosti. Pred umerjanjem modela je potrebno

vnesti še vhodne podatke (padavine (datoteka *rain*), potencialna evapotranspiracija po metodi FAO Penman-Monteith (datoteka *ET0*), merjeni odtoki (datoteka *Qobs*), ter potovalni časi porečja (datoteka *delay*)). Ko imamo vse potrebne vhodne podatke, pa definiramo meje, v katerih se bodo nahajali parametri modela, nato bo program vzel naključne vrednosti, ki se nahajajo v tem območju ter s temi parametri naredil simulacijo in rezultate primerjal z merjenimi vrednostmi ter izračunal Nash-Sutcliffe-ovega koeficiente za posamezne sklope parametrov (datoteka *result*). Rezultat umerjanja so posamezne vrednosti Nash-Sutcliffe-ovega koeficienta medtem ko bodo parametri za posamezno iteracijo zapisani v datoteki *parameters* (slika 19).

Primer 9: Vnašanje vhodnih podatkov ter umerjanje modela (TOPMODEL)

```
> rain<-as.vector(podatki$P)
> ET0<-as.vector(podatki$E)
> Qobs<-as.vector(podatki$Qcell)
> x=c(1:92)
> plot(x,Qobs,type="l")
> runs<-100
> qs0 <- runif(runs, min=0, max=1)
> lnTe <- runif(runs, min=-4, max=4)
> m <- runif(runs, min=0, max=1)
> Sr0 <- runif(runs, min=0, max=1.5)
> Srmax <- runif(runs, min=0, max=10)
> td <- runif(runs, min=0, max=10)
> vch <- 1000
> vr <- runif(runs, min=10, max=2500)
> k0 <- runif(runs, min=0, max=1)
> CD <- runif(runs, min=0, max=10)
> dt<-24
> parameters<-cbind(qs0,lnTe,m,Sr0,Srmax,td,vch,vr,k0,CD,dt)
> result<-topmodel(parameters, razredi, delay, rain, ET0, Qobs = Qobs)
Iteration:      100
> max(result)
[1] 0.6751234
```



Slika 19: Prikaz postopka umerjanja modela Glinščice (TOPMODEL)

Parametre umerjenega modela dobimo iz vektorja *parameters*, vendar jih kljub najvišji oceni Nash-Sutcliffe-ovega koeficienta nismo uporabili, saj se pojavijo pomanjkljivosti ocenjevanja učinkovitosti le z enim kriterijem. Težava je v tem, da je Nash-Sutcliffe-ov (*NSE*) koeficient osnovan na razliki kvadratov in je s tem preobčutljiv na absolutno velika odstopanja (konice) in močno neobčutljiv na absolutno majhne napake (bazni odtok) (Krause in sod., 2005). Posledica je, da so sklopi parametrov z najvišjimi ocenami *NSE* podali odtočno krivuljo, pri kateri je bil bazni odtok enak nič ali pa bistveno premajhen, kar je tudi skladno s prej omenjenim dejstvom. Zato smo z nadaljnjimi iteracijami poiskali sklop parametrov z zadovoljivo in realno oceno baznega odtoka, ki so prikazani v preglednici 4.

Preglednica 4: Prikaz umerjenih parametrov modela Glinščice (TOPMODEL)

| Parameter | Opis parametra | Izbrani parametri |
|--------------|--|-------------------|
| <i>qs0</i> | začetni podzemni tok na enoto površine [m] | 0,00127 |
| <i>lnTe</i> | logaritem območnega povprečja prepustnosti [m ² /h] | 4,196 |
| <i>m</i> | parameter, ki kontrolira padanje transmisivnosti | 0,365 |
| <i>Sr0</i> | začetni primanjkljaj skladiščenja vode [m] | 0,516 |
| <i>Srmax</i> | maksimalni primanjkljaj skladiščenja vode [m] | 8,390 |
| <i>td</i> | časovni zamik nezasičenega območja [h/m] | 5,087 |
| <i>vch</i> | tok zunaj porečja (v model še ni vključen) | 1000,000 |
| <i>vr</i> | tok znotraj porečja [m/h] | 1955,283 |
| <i>k0</i> | površinska hidravlična prepustnost [m/h] | 0,760 |
| <i>CD</i> | kapilarni srk | 8,470 |
| <i>dt</i> | časovni korak [h] | 24,000 |

6.2.5 Rezultati in analiza

Rezultati so prikazani za obdobje 1.11.2003-31.1.2004, kjer je bila doba umerjanja dolga dva meseca (1.11.2003-31.12.2003, časovni korak 1-61) in obdobje validacije modela en mesec (1.1.2004-31.1.2004, časovni korak 61-92). Parametri modela so bili določeni kot kompromis med oceno *NSE* in realno oceno baznega odtoka.

Preglednica 5: Rezultati kriterijev učinkovitosti (TOPMODEL)

| Kriterij učinkovitosti | Opis parametra | Obdobje umerjanja | Obdobje validacije |
|------------------------|--|-------------------|--------------------|
| <i>NSE</i> | Nash-Sutcliffe-ov koeficient | 0,804 | 0,466 |
| <i>mNSE</i> | modificirani Nash-Sutcliffe koeficient | 0,588 | 0,462 |
| <i>rNSE</i> | relativni Nash-Sutcliffe koeficient | 0,833 | 0,375 |

se nadaljuje...

nadaljevanje Preglednice 5

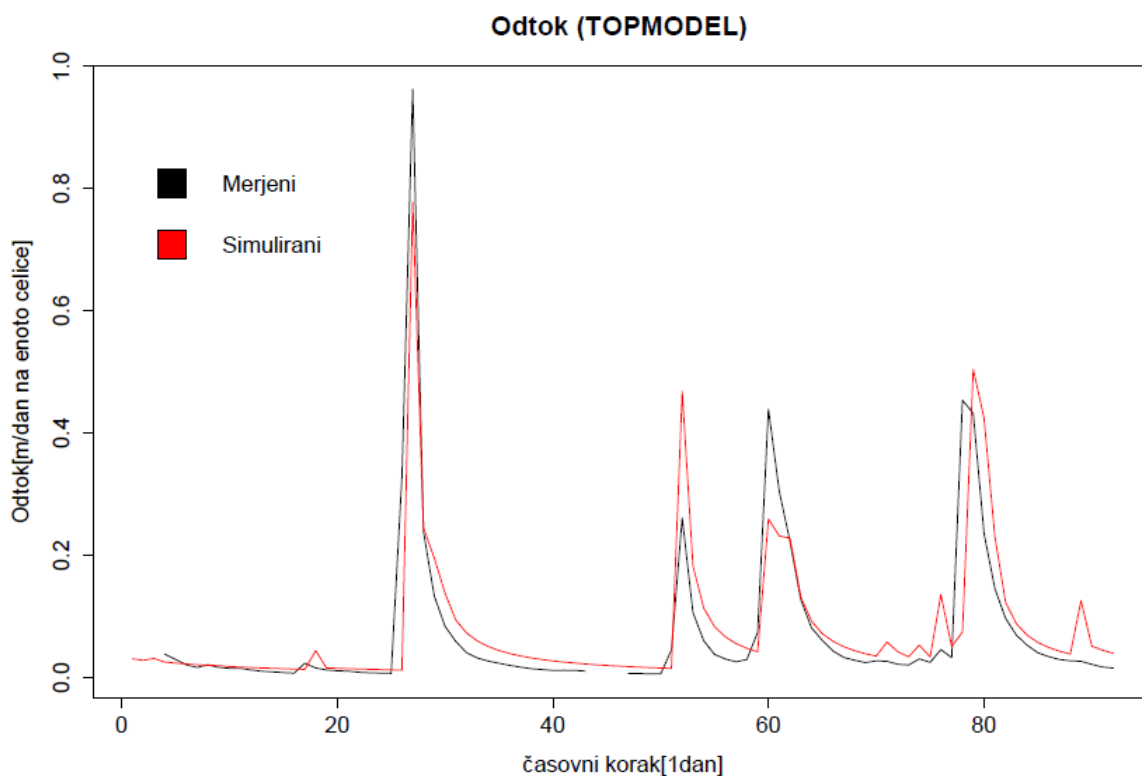
| | | | |
|---------------------|-----------------------------------|-------|-------|
| <i>br2</i> | obteženi koeficient determinacije | 0,650 | 0,468 |
| <i>d</i> | indeks strinjanja | 0,940 | 0,843 |
| <i>md</i> | modificirani indeks strinjanja | 0,780 | 0,706 |
| <i>rd</i> | relativni indeks strinjanja | 0,949 | 0,817 |
| <i>pbias</i> | odstotek korekcije | 4 | 17,5 |

Rezultati modela so pokazali, da TOPMODEL v povprečju rahlo precenjuje odtok, kar je razvidno tudi iz pozitivne vrednosti odstotka korekcije (*pbias*) (Preglednica 5), a kljub temu podceni največjo konico (slika 20). Topografski indeks v veliko primerih ni zmožen predstaviti pravilne dinamike podzemnih vod. Gorvodno pobočje porečja je predstavljeno samo z enim faktorjem (*a*), iz tega sledi, da topografija tega območja nima vpliva na nivo podtalnice na območju. Posledica je, da ima topografija zelo majhen vpliv na simulirano dinamiko in odtok vode. V realnosti rabi tok na območjih z nizko globino podtalnice nekaj časa, da vpliva na konico v zasičenih območjih (Seibert, 1997).

Podcenjevanje odtoka je lahko posledica neoptimalne izbire parametrov, posledica dejstva, da TOPMODEL pogosto podcenjuje odtok zaradi slabe zastopanosti gorvodnih območij pri določitvi nivoja podtalnice (Seibert, 1997), ter kot posledica napak v zaznavanju lokalnih konveksijskih padavin, jemanja padavin kot površinsko vezanih vrednosti in močnega sezonska nihanja v samem porečju (Campling in sod., 2002).

Primer 10: Postopek definiranja parametrov, simulacija ter prikaz rezultatov

```
>parametri=c(0.001267788, 4.19591883, 0.36544344, 0.515782301,
8.38967158, 5.0873550, 1000, 1955.28290, 0.76012044,
8.46997001, 24)
>simulacija<- topmodel(parametri,razredi,delay,rain,ET0,verbose=T,Qobs=NA)
>x=c(1:92)
>plot(x,Qobs,xlab="časovni korak[1dan]",ylab="Odtok[m/dan na enoto
celice]",type="l",main="Odtok (TOPMODEL) ")
>lines(simulacija$Q,col="red")
>legend(0,0.8,"Simulirani",fill="red",bty="n")
>legend(0,0.9,"Merjeni",fill="black",bty="n")
```



Slika 20: Simulirani in merjeni odtok hidrološkega modela Glinščice s programom TOPMODEL

Kot je razvidno iz slike 20 so se časi nastopa konic merjenih in simuliranih odtokov dobro ujemali z izjemo zadnje konice, kjer je opazno manjše odstopanje. Nekoliko manjše sovpadanje pa je v velikosti nekaterih konic. Pri merjenih odtokih se pojavijo štiri večje konice, od katerih se zadnja lepo ujame s simulirano, ena je precenjena (druga), dve pa nekoliko podcenjeni (prva in tretja), kar je lahko posledica naglih sprememb v naravi, ki jih model ne upošteva.

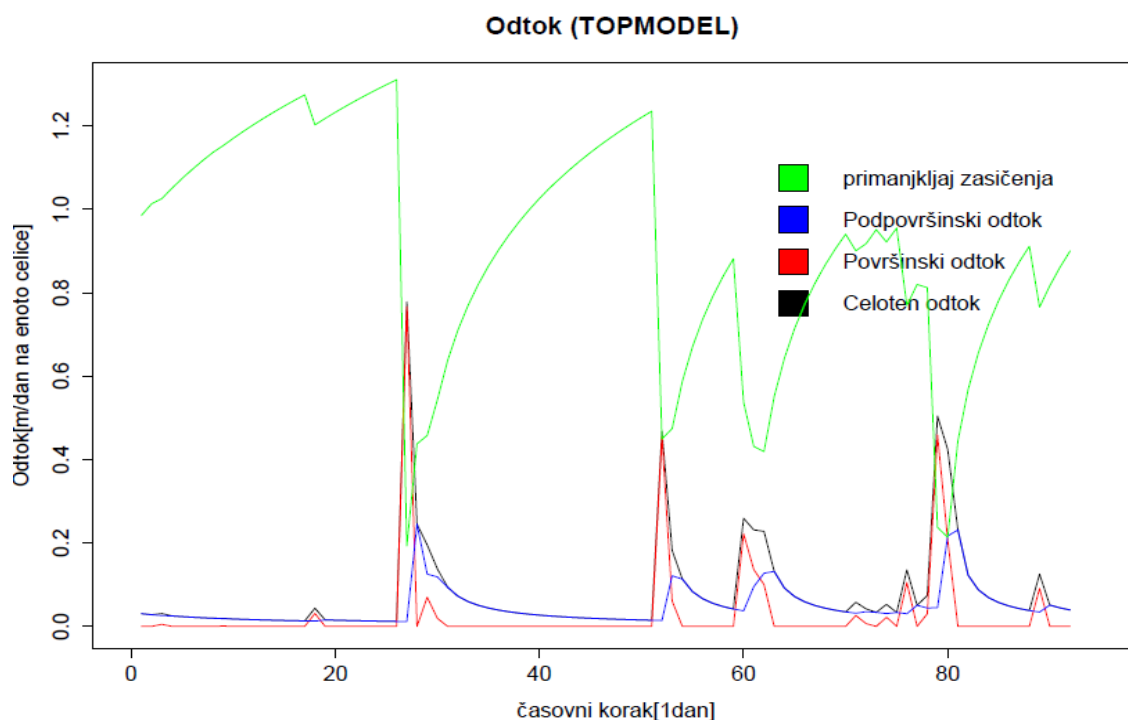
Učinkovitost modela je potrebno oceniti objektivno s pomočjo t.i. kriterijev učinkovitosti. Izračuni osmih različnih kriterijev učinkovitosti so pokazali pričakovane rezultate, saj so ocene za obdobje umerjanja veliko boljše od ocen za obdobje validacije. Iz sorazmerno dobrih ocen relativnih kriterijev ($rNSE$, rd) lahko sklepamo, da je ocena baznega odtoka zadovoljiva, rahlo slabše ocene drugih kriterijev (NSE , d) pa kažejo, da so bile konice slabše ocenjene. Modificirani kriteriji predstavljajo kompromis med relativnimi in osnovnimi kriteriji ter kažejo najbolj realno sliko o učinkovitosti modela, ki so dosegali splošno nižje ocene ($br2$, $mNSE$, md). Rezultati kriterijev pa kažejo tudi samo raznolikost na področju ocenjevanja, saj njihove vrednosti močno nihajo in ponekod dajejo bistveno preveč optimistično oceno (d).

Kljub temu, da so bili rezultati v smislu kriterijev učinkovitosti razmeroma dobri, je nihanje teh lahko problematično, saj ne moremo podati objektivne ocene o splošni ustreznosti modela, vendar z uporabo več različnih kriterijev lahko dobimo oceno, kje se je model dobro obnesel in kje ne.

6.2.5.1 Rezultati za posamezne komponente odtoka (TOPMODEL)

Celoten odtok s porečja je običajno razdeljen na več posameznih komponent kot sta površinski in podpovršinski odtok. Površinski odtok imenujemo del padavin, ki prispejo na površino tal in se ne zadržijo na rastlinah ali v tleh ali izhlapijo, temveč odtečejo površinsko in podpovršinsko v mrežo vodotokov (Brilly in Šraj, 2005). Iz slike 21 je dobro vidno, da bo največji delež prispeval površinski odtok, ki je ponekod skoraj enak kot celoten odtok.

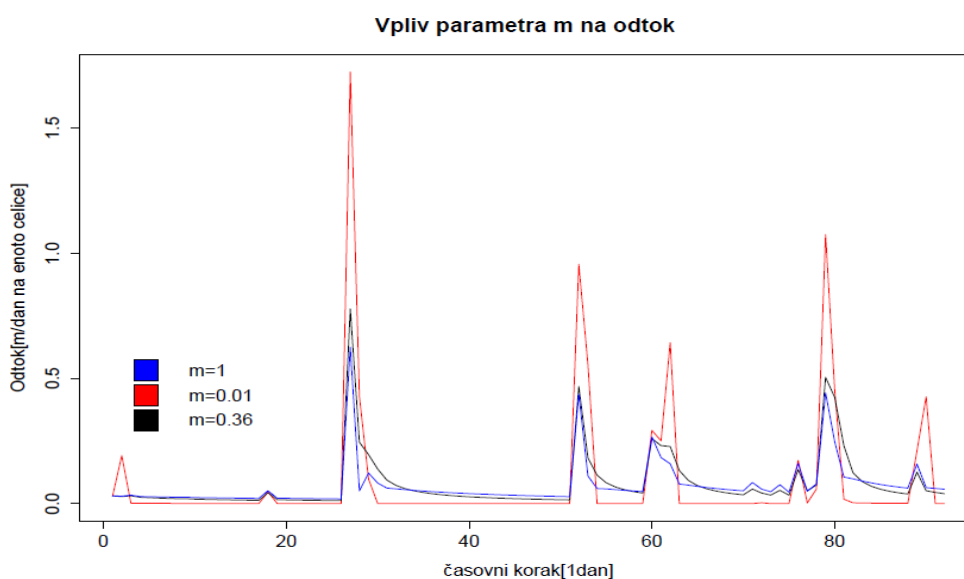
Večino obdobja je površinski odtok veliko večji od podpovršinskega, kar je pričakovano, saj podpovršinski odtok zaradi toka skozi zemljino načeloma počasnejši, medtem ko je površinski pogosto neoviran. Konica podpovršinskega odtoka na začetku simuliranega obdobja je izjema, saj zaradi samega naklona krivulje lahko sklepamo, da so pred obravnavanim obdobjem nastopile padavine, ki niso popolnoma zasičile zemljine in so zato povzročile manjši površinski odtok. Če se zemljina zasiči, pa poglaviti del odtoka predstavlja površinski odtok (Campling in sod., 2002). Presežni infiltracijski tok se pojavi, ko je presežena infiltracijska kapaciteta zemljine (Horton, 1933). Dinamika gibanja primanjkljaja zasičenja se obnaša pričakovano, narašča ob pomanjkanju padavin in pade, ko nastopijo konice hidrograma.



Slika 21: Simuliran odtok razdeljen na komponente (TOPMODEL)

6.2.6 Analiza občutljivosti parametrov

Analiza občutljivosti parametrov predstavlja ugotavljanje vpliva posameznega parametra modela na rezultat. Te analize se poslužujemo za boljše razumevanje modela in njegovih komponent v smislu pomena in učinka parametrov na odtok. TOPMODEL v programu R vsebuje enajst parametrov, vendar eden od teh še ni implementiran v model in trenutno nima nobenega vpliva na odtok. Najbolj občutljiv parameter v modelu je parameter, ki določa padanje transmisivnosti (m) saj določa tako obliko ter količino odtoka. Kot je razvidno iz slike 22 z zviševanjem parametra transmisivnosti zvišamo bazni odtok in znižujemo višino konic, z zniževanjem pa znižamo bazni odtok in povečamo samo višino konic odtoka. Drugi najvplivnejši parameter je začetni podzemni tok na enoto površine ($qs0$), ki ima močan vpiv na začetni odtok ter količino odtoka. Z zviševanjem tega parametra se močno poveča začetni odtok, z zmanjševanjem pa rahlo zmanjšujemo odtoke na začetku. Tretji parameter, ki ima viden vpliv, pa je logaritem povprečne transmisivnosti območja, ki ob znižanju zviša velikost prve konice, vendar zmanjša bazni odtok, z zviševanjem pa poveča velikost konic v kasnejšem obdobju. Močan vpliv ima tudi parameter, ki določa količino toka znotraj porečja (vr), saj z zniževanjem močno zmanjšamo količino odtoka, na drugi strani vendar pa prekomerno poviševanje nima močnega vpliva. V modelu so nekateri parametri med seboj vezani kot sta začetni primanjkljaj skladiščenja ($Sr0$) in maksimalni primanjkljaj skladiščenja ($Srmax$) in imata podoben učinek na odtok. Predvsem vplivata na konico, ki se pojavi takoj na začetku, vendar je težko določiti vpliv začetnega primanjkljaja skladiščenja posebej, saj ga omejuje maksimalni primanjkljaj. Nekateri parametri pa tako ob zviševanju kot ob zniževanju niso pokazali bistvenega vpliva na odtok (td , $k0$, CD). Na koncu je treba opozoriti, da so parametri med sabo povezani in se tudi omejujejo, tako da bi nekateri učinki parametrov lahko bili tudi različni za drugačne vrednosti.



Slika 22: Vpliv parametra transmisivnosti m na odtok

6.3 Izdelava konceptualnega točkovnega modela HBV za porečje Glinščice

HBV model (Bergström, 1976) je konceptualni model porečne hidrologije, ki simulira dnevni odtok z uporabo dnevnih padavin, temperature zraka in potencialnega izhlapevanja. HBV je sestavljen iz treh delov: modela za taljenja snežne odeje, ki oceni akumulacijo in taljenje snega, modela vlažnosti zemljine, kjer se oceni vnos v podzemno vodo in izhlapevanje kot funkcijo vsebnosti vode v zemljini ter odzivne in transportne funkcije, ki določa potek toka vode (Seibert, 1999).

V tem poglavju je prikazan konceptualni točkovni hidrološki model po vzoru HBV in priprava vhodnih podatkov. Ker je model konceptualen, je priprava vhodnih podatkov zelo preprosta, zato je izdelava modela razdeljena na naslednje dele:

- priprava vhodnih podatkov,
- umerjanje in simulacija,
- rezultati,
- analiza občutljivosti.

6.3.1 Priprava vhodnih podatkov

Dosegljivost hidroloških podatkov je velikokrat omejena tako v časovnem in prostorsken smislu, zato se poslužujemo konceptualnih modelov. V teh modelih je večino parametrov nemogoče določiti z meritvami na terenu, ampak jih moramo določiti s pomočjo umerjanja s pomočjo merjenih podatkov (Seibert, 1999). HBV za vhodne podatke uporabi padavine (datoteka *prec*), evapotranspiracijo (datoteka *ep*), dnevno temperaturo (datoteka *airt*) ter merjene odtoke za namen kalibracije (datoteka *Qm*). Podatki o dnevnih padavinah so bili vzeti za merilno postajo Lj. Bežigrad za obdobje 1.11.2003-31.1.2004 (ARSO, 2013). Ker je HBV konceptualni model, uporabi le minimalno število podatkov iz narave, zato je urejanje podatkov dokaj preprosto. Najprej vse vhodne podatke uredimo v datoteko, nato pa jih posamično definiramo (Primer 11).

6.3.2 Umerjanje in simulacija

Rezultati modela so prikazani za obdobje 1.11.2003-31.1.2004, kjer je bila doba umerjanja dolga dva meseca (1.11.2003-31.12.2003, časovni korak 1-61) in doba validacije modela en mesec (1.1.2004-31.1.2004, časovni korak 61-92). Paket *TUWmodel* ne vsebuje postopka za umerjenje, zato je bil model umerjen vizualno ter na podlagi Nash -Sutcliffe-ovega koeficienta. Posledično so bili parametri izbrani na podlagi subjektivne presoje in mogoče ne predstavljajo najbolj optimalne rešitve. Ker gre za konceptualni model, parametri v večini niso povezani s fizičnimi prvinami, zato je bil proces

umerjanja osredotočen na ujemanje z merjenimi podatki. Izbrani so bili parametri prikazani v preglednici 6.

```
Primer 11: Izdelava hidrološkega modela (HBV)

> TUWdat<-
read.table("tuwPTE1dan.csv",sep="," ,col.names=c("P","T","E","Qmm","Qm3s"),header
=T)
> ep=TUWdat$E
> prec=TUWdat$P
> airt=TUWdat$T
> Qm=TUWdat$Qm3s
> x<-c(1:92)
> xCal<-c(1:61)
> plot(x,Qm,type="l")
> QmCal<-Qm[1:61]
> precCal<-prec[1:61]
> airtCal<-airt[1:61]
> epCal<-ep[1:61]
> Qmver<-Qm[61:92]
> precVer<-prec[61:92]
> airtver<-airt[61:92]
> epVer<-ep[61:92]
> param=c(1.5      ,2      ,1,   -2,   0,   0.5,   236,   10,   0.5,
5, 105,  10      ,2,      10,   26.5)
> incon=c(230,0,3,3)
> simulacija<-TUWmodel (precCal, airtCal, epCal, 16.85,param,incon,
itsteps=NULL)
> plot(xCal,simulacija$q,type="l",xlab="č časovni
korak[1dan]",ylab="Odtok[mm/dan]",main="Odtok TUV za kalibracijsko obdobje")
> lines(QmCal,col="red")
> legend(3,"Simulirani",fill="black",bty="n")
> legend(3.5,"Merjeni",fill="red",bty="n")
```

Preglednica 6: Prikaz izbranih parametrov hidrološkega modela HBV za porečje Glinščice

| Parameter | Opis parametra | Izbrani parametri |
|---------------|--|-------------------|
| <i>SCF</i> | korekcijski faktor za sneg | 1,5 |
| <i>DDF</i> | faktor stopinja dan [mm/°C/dan] | 2,0 |
| <i>Tr</i> | temperaturni prag nad katerim padavine postanejo dež [°C] | 1,0 |
| <i>Ts</i> | temperaturni prag nad katerim padavine postanejo sneg [°C] | -2,0 |
| <i>Tm</i> | temperaturni prag nad katerim se začne taljenje snega [°C] | 0,0 |
| <i>LPrat</i> | parameter, ki omejuje izhlapevanje | 0,5 |
| <i>FC</i> | maksimalno skladiščenje vlažnosti v zemljini | 236,0 |
| <i>BETA</i> | nelinearni parameter za izračun odtoka | 10,0 |
| <i>k0</i> | zadrževalni koeficient za zelo hitri odziv [dni] | 0,5 |
| <i>k1</i> | zadrževalni koeficient za hitri odziv [dni] | 5,0 |
| <i>k2</i> | zadrževalni koeficient za počasni odziv [dni] | 105,0 |
| <i>lsuz</i> | prag stanja skladiščenja | 10,0 |
| <i>cperc</i> | konstanta precejanja [mm/dan] | 2,0 |
| <i>BMAX</i> | maksimalni izhodišče pri nizkih pretokih | 10,0 |
| <i>croute</i> | prosti parameter [dan ² /mm] | 26,5 |

se nadaljuje....

nadaljevanje Preglednice 6

| <i>Vhodni parametri</i> | | |
|-------------------------|---|-------|
| <i>SSM0</i> | začetna zasičenost zemljine [mm] | 230,0 |
| <i>SWE</i> | začetni snežno vodni ekvivalent [mm] | 0,0 |
| <i>SUZ0</i> | začetna vrednost skladiščenja za hitri odziv [mm] | 3,0 |
| <i>SLZ0</i> | začetna vrednost skladiščenja za počasni odziv [mm] | 3,0 |

6.3.3 Rezultati in analiza

Rezultati so prikazani za obdobje 1.11.2003-31.1.2004, kjer je bila doba umerjanja dolga dva meseca (1.11.2003-31.12.2003) in doba validacije modela en mesec (1.1.2004-31.1.2004). Zaradi primerjave z drugimi modeli smo se odločili za ročno razdelitev obdobja opazovanja na dva dela. Umerjanje modela oz. parametri so bili določeni vizualno ter s pomočjo ocene *NSE* (Nash-Sutcliffe-ova učinkovitost).

Preglednica 7: Prikaz rezultatov kriterijev učinkovitosti

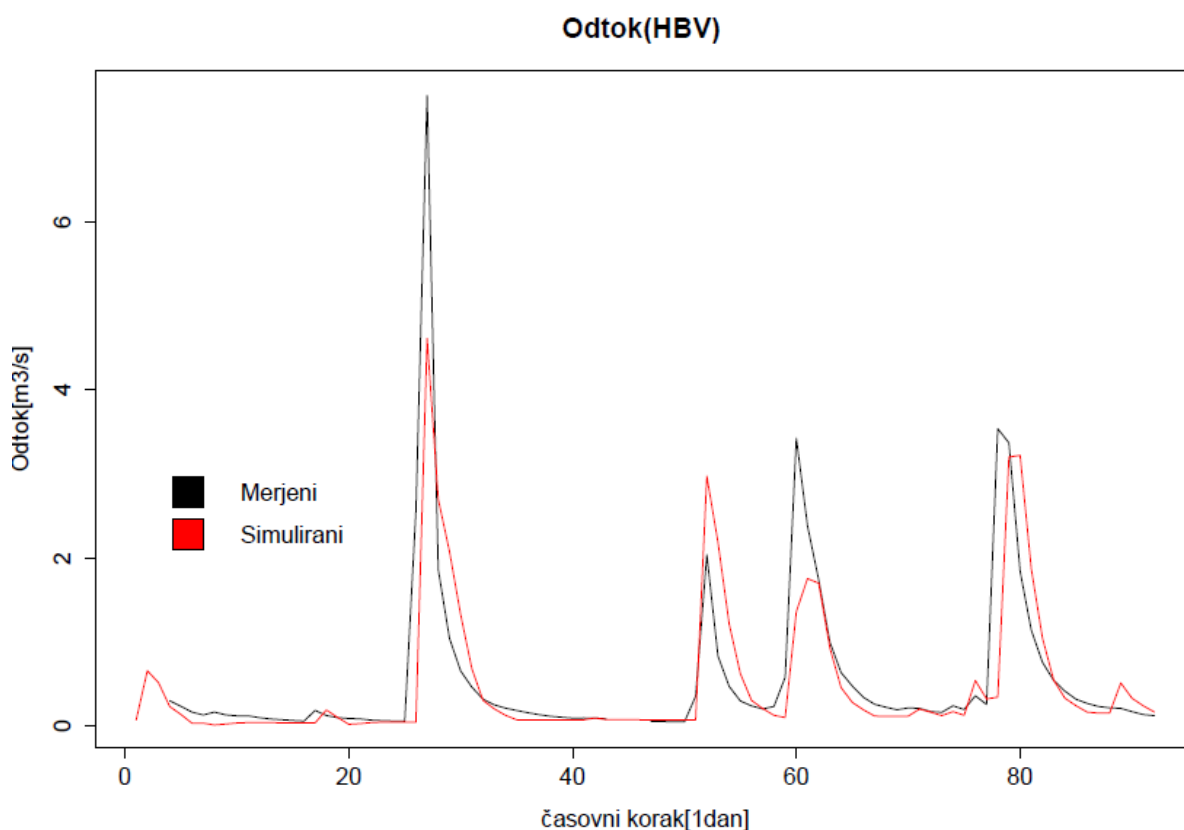
| Kriterij učinkovitosti | Opis parametra | Obdobje umerjanja | Obdobje validacije |
|-------------------------------|--|--------------------------|---------------------------|
| <i>NSE</i> | Nash-Sutcliffe-ov koeficient | 0,655 | 0,3367 |
| <i>mNSE</i> | modificirani Nash-Sutcliffe koeficient | 0,527 | 0,3698 |
| <i>rNSE</i> | relativni Nash-Sutcliffe koeficient | 0,927 | 0,750 |
| <i>BR2</i> | obteženi koeficient determinacije | 0,421 | 0,236 |
| <i>d</i> | indeks strinjanja | 0,863 | 0,753 |
| <i>md</i> | modificirani indeks strinjanja | 0,746 | 0,675 |
| <i>rd</i> | relativni indeks strinjanja | 0,971 | 0,907 |
| <i>pbias</i> | odstotek korekcije | -52,3 | -54,1 |

Kot je razvidno iz slike 23, so časi nastopa konic merjenih in simuliranih odtokov dobro sovpadali, razen zadnje konice, kjer simulirani odtok malo odstopa. Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi pri simulaciji s programom TOPMODEL. Nekoliko slabše je sovpadanje v velikosti konic, kjer je vidno tako precenjevanje kot podcenjevanje odtoka. Podobno kot v primeru TOPMODEL-a, se z meritvami najbolje ujema zadnja konica, prva in tretja sta podcenjeni, druga pa nekoliko precenjena.

Učinkovitost modela je potrebno oceniti objektivno z pomočjo t.i. kriterijev učinkovitosti. Izračuni osmih različnih kriterijev učinkovitosti so pokazali pričakovane rezultate, saj so ocene za obdobje umerjanja veliko boljše od ocen za obdobje validacije. Iz sorazmerno dobrih ocen relativnih kriterijev (*rNSE*, *rd*) lahko sklepamo, da je ocena baznega odtoka zadovoljiva, slabše ocene (*NSE*, *d*) drugih kriterijev pa kažejo, da so bile konice slabše ocenjene. Modificirani kriteriji predstavljajo kompromis med relativnimi in osnovnimi kriteriji. Kažejo najbolj realno sliko o učinkovitosti modela in so dosegali splošno nižje ocene (*BR2*, *mNSE*, *md*). Rezultati kriterijev učinkovitosti kažejo veliko

raznolikost na področju ocenjevanja, saj njihove vrednosti močno nihajo in ponekod dajejo bistveno preveč optimistično oceno (*d*).

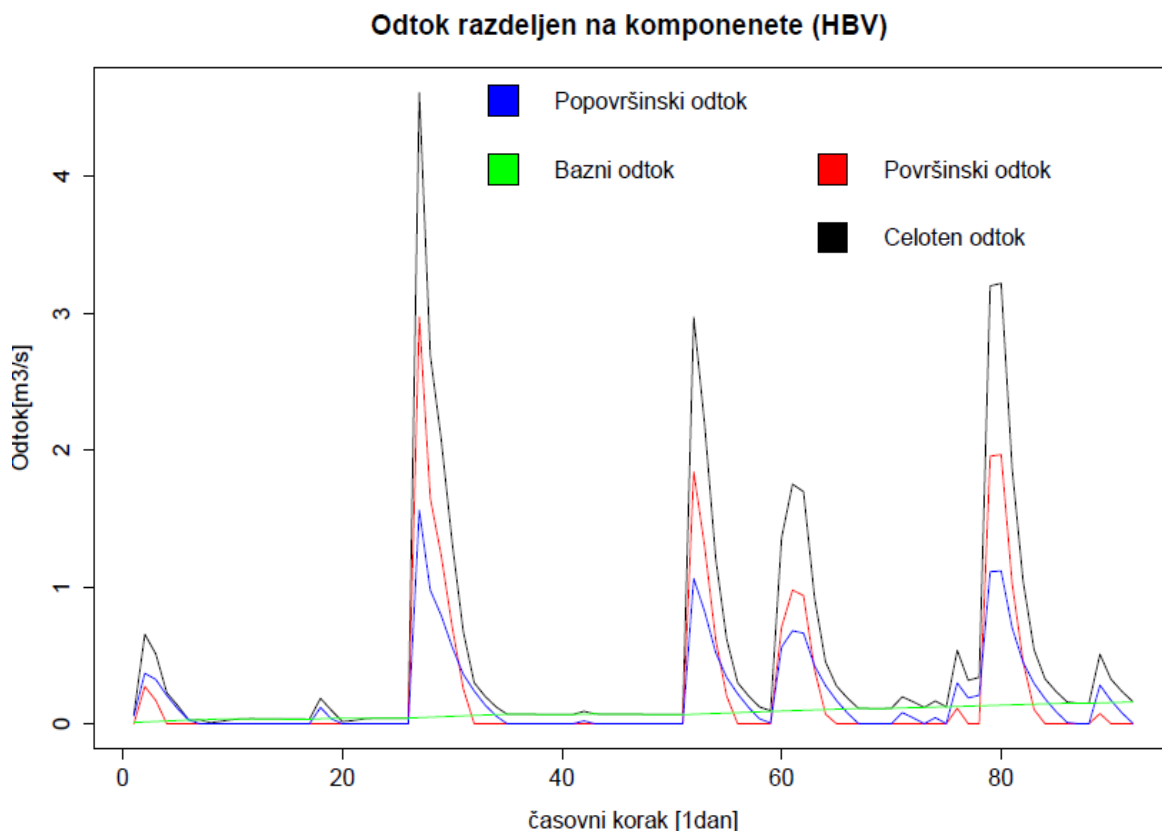
Kljub temu, da so bili rezultati v smislu kriterijev učinkovitosti razmeroma dobri, je nihanje teh lahko problematično, saj ne moremo podati objektivne ocene kako o splošni ustreznosti modela, vendar z uporabo več različnih kriterijev lahko dobimo sliko, kje se je model dobro obnesel in kje ne.



Slika 23: Prikaz merjenega in simuliranega odtoka z modelom HBV za porečje Glinščice

6.3.3.1 Rezultati posameznih komponent odtoka (HBV)

Večino obdobja površinski odtok presega podpovršinskega (slika 24), kar je pričakovano, saj je podpovršinski odtok zaradi toka skozi zemljino načeloma počasnejši, medtem ko je površinski pogosto neoviran in neposredna posledica padavin. Bazni odtok predstavlja podpovršinski odtok, ki je posledica predhodnih razmer v zemljini ter izcejanje podzemnih voda v strugi vodotoka (Dirnbek, 2009). Najmanjši bazni odtok kot posledico izcejanja podzemnih voda zaznamo v strugi vodotoka, ko dalj časa ni padavin ter odtoka površinskih voda, kmalu po pojavu večjih padavin začne pretok vode v vodotoku naraščati, precej hitro doseže maksimum in nato začne upadati (Brilly in Šraj, 2005). Bazni odtok narašča linearno z časom, kar pomeni da z povečanjem padavin narašča tudi bazni odtok, posledično padavine vplivajo na naraščanje baznega odtoka in lahko sklepamo da bo tudi obratno. To kaže na sezonsko nihanje baznega odtoka in neposredno odvisnost od padavin.



Slika 24: Prikaz simuliranega odtoka, razdeljenega na posamezne komponente (HBV)

6.3.4 Analiza občutljivosti parametrov

Analiza občutljivosti parametrov predstavlja ugotavljanje vpliva posameznega parametra modela na rezultat. Te analize se poslužujemo za boljše razumevanje modela in njegovih komponent v smislu pomena in učinka parametrov na odtok. Hidrološki model HBV v programu R vsebuje štirinajst parametrov in štiri začetne pogoje. Ker je HBV konceptualni model in je povezavo parametrov s fizičnimi prvinami težko določiti, je težko določiti parameter, ki na splošno najbolj vpliva na odtok, saj vsak parameter služi točno določenemu namenu v modelu.

Precej parametrov ima majhen vpliv na sam odtok. Temperaturni pragi (T_m , T_r , T_s) npr. nimajo močnejšega vpliva, saj služijo le kot meje za vrednosti dnevni temperatur. Podobne rezultate sta pokazala faktor stopinja dan (DDF) in snežni korekcijski faktor (SCF), ki ob spreminjanju nista imela vidnega vpliva na sam hidrogram, kar je posledica tega, da sta enako kot temperaturni pragi odvisna od samih dnevni temperatur in imata večjo vlogo le ob ekstremnih temperaturah, ki pa v opazovanem časovnem obdobju niso bile zabeležene.

Izhlapevanje igra pomembno vlogo pri določitvi odtoka, saj določa količino vode, ki se bo vrnila v atmosfero in posledično ne bo prispevala k odtoku. Parameter, ki omejuje izhlapevanje (L_{prat}), tako

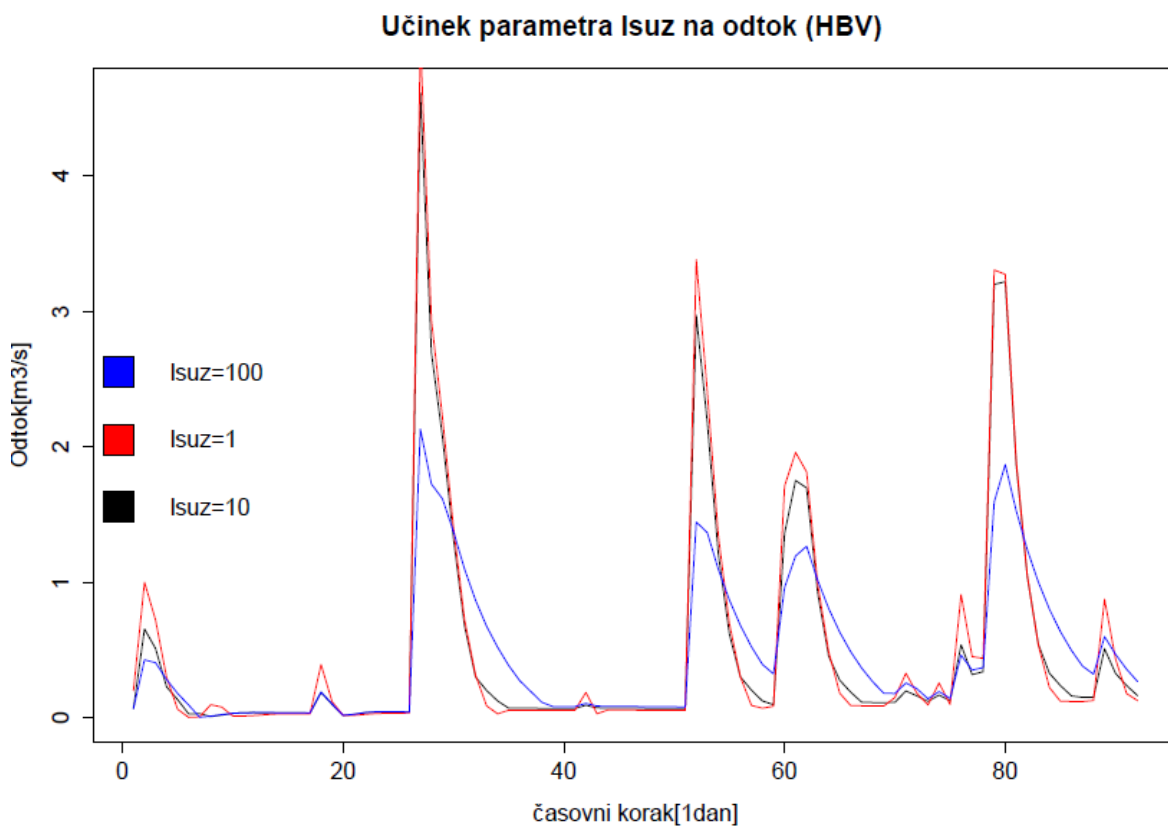
ob zviševanju poveča odtočne konice, medtem ko zmanjšanje nima bistvenega vpliva, kar kaže na obratno sorazmernost parametra z izhlapevanjem. Zmožnost skladiščenja vode porečja močno vpliva na sam odtok, saj določa, koliko vode lahko zemljina zadrži in s tem vpliva na časovno razporeditev odtoka. Parameter, ki določa maksimalno zmožnost skladiščenja (*FC*) je pokazal pričakovane rezultate. Z zviševanjem na splošno znižamo odtoke, vendar le do točke zasičenja, medtem ko znižanje poveča odtoke, še posebej na začetku simulacije (vpliv večji ob pojavu predhodnih padavin).

V modelu se pojavijo tudi parametri, ki nimajo velikega vpliva na samo količino odtoka ampak vplivajo bolj na samo razporeditev odtoka. Nelinearni parameter za izračun odtoka (*BETA*) ima dokaj majhen vpliv na sam odtok, vendar vpliva na razporeditev. Zniževanje parametra rahlo poveča odtok, zviševanje pa malenkost zniža odtok, vendar le do neke meje.

V modelu HBV voda zapusti porečje preko treh poti: preko površinskega odtoka, ki ga določa koeficient za zelo hitri odziv (*k0*), preko nizke podtalnice odtoka, ki ga določa koeficient za hitri odziv (*k1*) ter preko globoke podzemne vode, ki jo določa koeficient za počasni odziv (*k2*). Pričakovali bi, da imajo parametri zaradi podobne narave tudi enak vpliv na odtok, vendar so zaradi preprostega dejstva, da je površinski odtok veliko hitrejši od podpovršinskega, njihovi učinki do neke mere obratni. Povečevanje koeficienta za zelo hitri odziv poveča odtočne konice, vendar ko se bližamo mejni vrednosti začne odtok padati, znižanje pa pričakovano zniža odtok. Obratno pa velja za koeficient za hitri odziv, ki ob zmanjšanju poveča odtok. Tudi koeficient za počasni odziv se obnaša podobno, vendar ima veliko manjši vpliv na odtok. Treba je poudariti, da so vsi trije parametri povezani z drugimi parametri in med seboj. Eden od teh parametrov je tudi prag stanja skladiščenja oz. prag, ko se bo aktiviral zelo hitri odziv porečja (*lsuz*). Parameter določa mejo, ko se bo začel površinski odtok in pričakovano se bo z zmanjšanjem povečal površinski odtok, ter zmanjšal bazni odtok kot je prikazano na sliki 25.

Nekateri parametri pa močno vplivajo le na določeno komponento odtoka kot je npr. konstanta precejanja (*cperc*), ki določa hitrost precejanja vode v globlje sloje zemljine in s tem neposredno vpliva na bazni odtok. Pričakovano zvišanje zmanjša bazni odtok zaradi procesa hitrejše infiltracije vode v globljo podtalnico, ki še dolgo ne bo imela vpliva na odtok zaradi počasne hitrosti globljega podzemnega toka.

Kot vsak model ima tudi HBV parametre, ki razporedijo odtok in služijo kot usmerjevalna in razporeditvena funkcija modela. Ta dva parametra sta prosti parameter (*croute*) ter maksimalno izhodišče pri nizkih pretokih (*BMAX*). *BMAX* je pokazal nizko občutljivost in ima zelo majhen vpliv na količino odtoka, vpliva le na razporeditev odtoka. Prosti parameter ob znižanju močno zniža bazni odtok.

Slika 25: Prikaz vpliva parametra *lsuz* na odtok

6.4 Izdelava empiričnega modela IHACRES za porečje Glinščice

IHACRES (identifikacija enotnega hidrograma in komponent padavin, izhlapevanja in odtočnih podatkov) je prostorsko točkovni model za okoljsko hidrologijo (Andrews, 2011). Prostorsko-točkovni modeli eksplicitno ne upoštevajo prostorske raznolikosti porečij. Modeli se običajno umerjajo na izbrane časovne intervale in se sklepa, da se razmerja med vhodnimi podatki in parametri modela ne spreminjajo, oz. povezave med podatki so v simulaciji predvidene kot stacionarne (Andrews, 2011). Padavinsko odtočni model IHACRES uporabi nelinearni modul za izračun učinkovitih padavin in linearni modul, ki učinkovite padavine pretvori v odtok (Croke in Jakerman, 2004).

V tem poglavju sta izdelana prostorsko točkovna hidrološka modela po vzoru IHACRES z skupno usmerjevalno komponento (Expuh) ter različno metodo za določitev učinkovitih padavin (*CWI* in *CMD*). Ker je model empiričen, je priprava vhodnih podatkov zelo preprosta, zato je izdelava razdeljena na naslednje dele:

- priprava vhodnih podatkov,
- umerjanje in simulacija,
- rezultati,

- analiza občutljivosti.

6.4.1 Priprava vhodnih podatkov

Empirični modeli so močno osredotočeni na opazovanje in je njihov cilj opisati odzive modela s pomočjo obstoječih podatkov (Kokkonen in Jakeman, 2001). Empirični modeli predstavljajo matematično idealizirane razmere v naravi, običajno vsebujejo zelo majhno število parametrov, ki se jih določi z postopkom umerjanja in le na podlagi že merjenih podatkov. Zaradi tega uporabljajo tudi minimalno število vhodnih podatkov kot so padavine (datoteka *pqdat\$P*), evapotranspiracija (datoteka *tdat\$T*) ter za potrebe umerjanja še merjene odtoke (datoteka *pqdat\$Q*). Priprava podatkov je preprosta, vendar ker je paket *hydromad* osnovan na časovnih vrstah (objekti *zooreg*), je potrebno predhodno pretvoriti vhodne podatke v časovne vrste kot je prikazano v primeru 12.

6.4.2 Umerjanja in simulacija

Enako kot v predhodnih primerih, je obravnavano obdobje (1.11.2003-31.1.2004) razdeljeno na dve obdobji, obdobje umerjanja (1.11.-31.12.2003) ter obdobje validacije (1.1.-31.1.2004). Paket *hydromad* ponuja več metod za umerjanje: s funkcijo *fitBy()*, umerjanje na podlagi izbranega kriterija učinkovitosti ali pa na podlagi optimalnega ujemanja. V našem primeru je bila uporabljena funkcija *fitByOptim()*, ki model umeri na podlagi najboljšega ujemanja z merjenimi vrednostmi. Ker sta bila izdelana dva modela z enako usmerjevalno komponento in različno komponento za določitev učinkovitih padavin, se ponekod parametri ponavljajo in ponekod pa razlikujejo. Postopek umerjanja je prikazan v primerih 12 in 13. V preglednici 8 so prikazani izbrani parametri za metodo *CWI* z usmerjevalno komponento *Expuh*, v preglednici 9 pa so prikazani izbrani parametri za metodo *CMD* z usmerjevalno komponento *Expuh*.

Preglednica 8: Prikaz izbranih parametrov za metodo *CWI*

| Parameter | Opis parametra | Izbrani parametri |
|--------------|---|-------------------|
| <i>tau_s</i> | časovna konstanta | 4,756 |
| <i>v_s</i> | frakcijski volumen | 0,514 |
| <i>tw</i> | faktor, ki opisuje padanje faktorja <i>CWI</i> kot posledica evapotranspiracije | 9,735 |
| <i>f</i> | stresni prag | 0,393 |
| <i>scale</i> | oblikovni faktor | 0,010 |

Preglednica 9: Prikaz izbranih parametrov za metodo *CMD*

| Parameter | Opis parametra | Izbrani parametri |
|--------------|---------------------------------|-------------------|
| <i>tau_s</i> | časovna konstanta | 4,827 |
| <i>v_s</i> | frakcijski volumen | 0,532 |
| <i>f</i> | stresni prag | 0,197 |
| <i>e</i> | evapotranspiracijski koeficient | 1,5 |
| <i>d</i> | prag odtoka [mm] | 84,370 |

6.4.3 Rezultati

Empirični modeli so zasnovani tako, da so čimbolj preprosti in uporabljajo zelo majhno število parametrov in podatkov, vendar zaradi te enostavnosti za razliko od drugih modelov določijo le celotni odtok in ne posameznih komponent odtoka.

6.4.3.1 Rezultati za metodo *CWI* in usmerjevalno komponento *expuh*

Podobno kot v predhodnem primeru, model podcenjuje odtok, kar kaže negativna vrednost odstotka korekcije (*pbias*). Ker gre za empirični model, ki temelji na optimalnem prileganju v določenem obdobju, je razlika med učinkovitostjo modela med dobo validacije in umerjanja velika. Visoke ocene relativnih kriterijev (*rNSE*, *rd*) kažejo, da je bazni odtok dobro ujet, vendar zaradi empirične narave modela te v dobi validacije modela bistveno padejo. Kriteriji, ki bolje opisujejo prileganje konic (*NSE*, *d*), kažejo zadovoljivo mero ujemanja, vendar kot je razvidno iz slike 26 je ponekod model močno precenil odtok. Modificirani kriteriji (*md*, *mNSE*, *bR2*) kažejo zadovoljivo splošno ujemanje, vendar se pokaže velik padec vrednosti v dobi validacije. Treba je poudariti, da je paket *hydromad* narejen za daljša obdobja, zato je bilo potrebno narediti kompromis, saj vsebuje model tudi t.i dobo za ogrevanje (ang. *warmup period*), ki je bila zaradi krajšega časovnega obdobja postavljena na minimalno možno.

Primer 12: Prikaz izdelave hidrološkega modela z metodama CWI-Expuh

```
> setwd("c:/Users/Blaž/Desktop/seminar/Rdelo")
> pqdat<-
read.table("hydrmadPQ1dan.csv", sep=",", col.names=c("P", "Q", "Datum"), as.
is=T)
> pqdat$Datum<-as.Date(pqdat$Datum, "%d.%m.%Y")
>
> tdat<-
read.table("hydrmadT1dan.csv", sep=",", col.names=c("T", "Datum"), as.is=T)
> tdat$Datum<-as.Date(tdat$Datum, "%d.%m.%Y")
> tsPQ<-zoo(pqdat[,1:2], pqdat$Datum, frequency=1)
> tsT<-zoo(tdat[,1], tdat$Datum, frequency=1)
> Glin<-merge(tsPQ, E=tsT, all=F)
> Glin<-na.trim(Glin)
> xyplot(Glin, xlab="časovni korak")
> ts1<-window(Glin, start="2003-11-01", end="2003-12-31")
> ts2<-window(Glin, start="2004-01-01", end="2004-01-31")
> hydromad.options(objective = hmadstat("r.sq.sqrt"))
> GlinMod<-
hydromad(ts1, sma="cwi", routing="expuh", tau_s=c(2,100), v_s=c(0,1), warmup
=1)
> GlinFit<-fitByOptim(GlinMod)
  0:  -0.53873252:  94.9495 0.888889  3.97980 0.505050
 10:  -0.59985690:  9.84126 0.270063  6.43322 0.517064
 20:  -0.60552980:  6.26956 0.735982  4.79969 0.515697
> xyplot(allMods[1:2], scale=list(y=list(log=T)), main="Odtok po metodi
CWI in Expuh (IHACRES)", xlab="časovni korak[1dan]", ylab="Odtok
[mm/dan]">#merjeni proti simuliranim validacijsko obdobje in
kalibracijsko obdobje
> summary(simVer)#povzetki za obdobje verifikacije

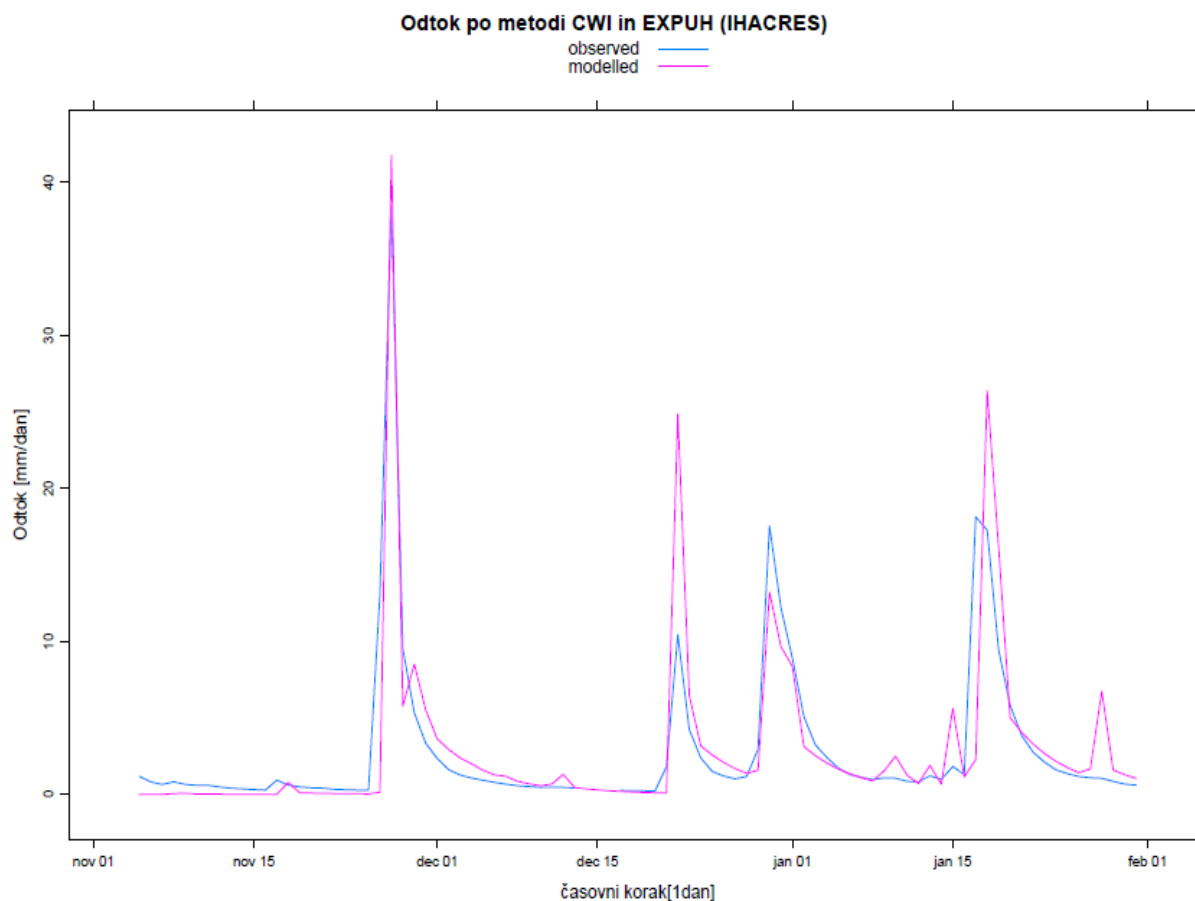
Call:
hydromad(DATA = ts2(), tau_s = 4.75622, v_s = 0.513984, sma = "cwi",
  routing = "expuh", warmup = 1, tw = 9.73519, f = 0.39281,
  scale = 0.0103144)

Time steps: 30 (0 missing).
Runoff ratio (Q/P): (3.093 / 3.507) = 0.8819
rel bias: -0.3612
r squared: 0.3224
r sq sqrt: -0.1524
r sq log: -0.4561

> summary(GlinFit)#povzetki za obdobje kalibracije

Call:
hydromad(DATA = ts1, tau_s = 4.75622, v_s = 0.513984, sma = "cwi",
  routing = "expuh", warmup = 1, tw = 9.73519, f = 0.39281,
  scale = 0.0103144)

Time steps: 57 (3 missing).
Runoff ratio (Q/P): (2.778 / 3.978) = 0.6984
rel bias: 1.413e-16
r squared: 0.7661
r sq sqrt: 0.6054
r sq log: 0.3087
> GlinMod<-hydromad(tsAll, sma="cwi", routing="expuh", tau_s = 4.75622,
v_s = 0.513984, tw = 9.73519, f = 0.39281, scale = 0.0103144, warmup=1)
```



Slika 26: Prikaz merjenega in simuliranega odtoka z modelom IHACRES (CWI-Expuh) za porečje Glinščice

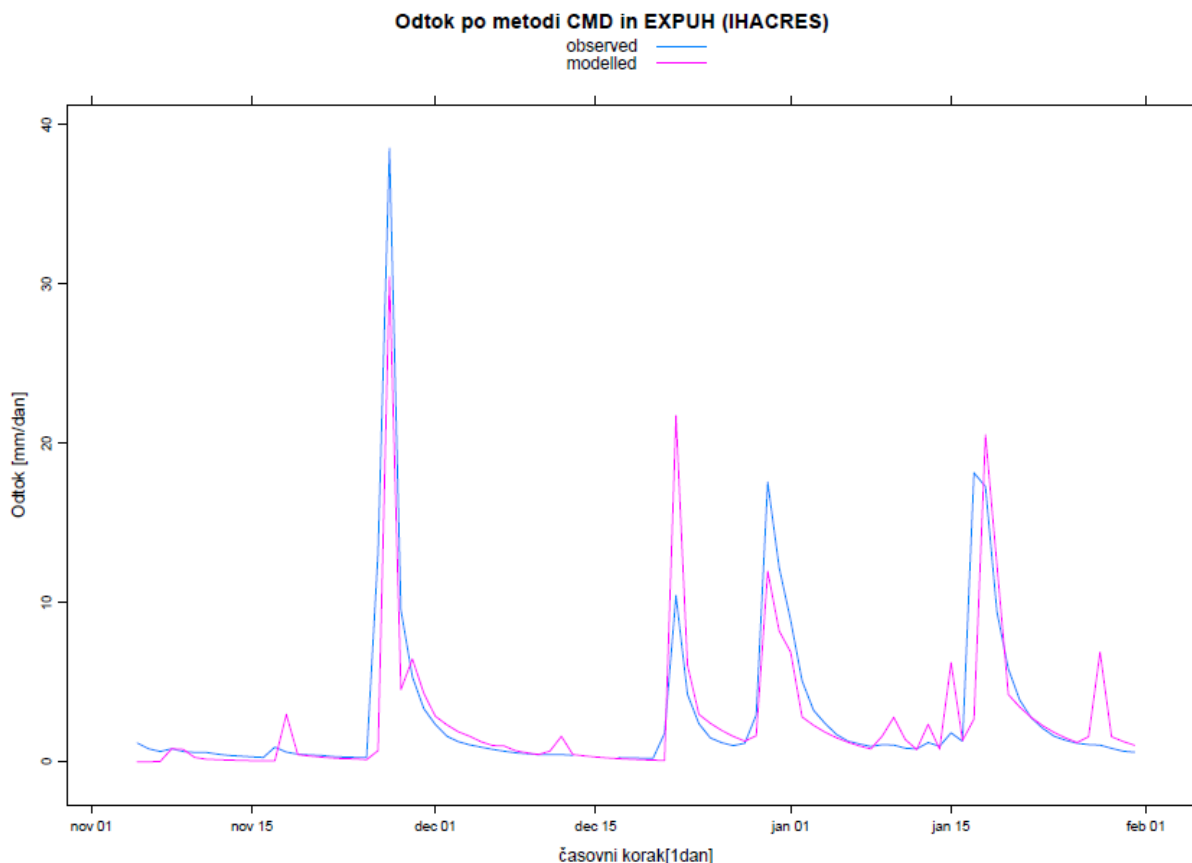
Preglednica 10: Prikaz rezultatov kriterijev učinkovitosti za metodi CWI-Expuh

| Kriterij učinkovitosti | Opis parametra | Obdobje umerjanja | Obdobje validacije |
|------------------------|--|-------------------|--------------------|
| <i>NSE</i> | Nash-Sutcliffe-ov koeficient | 0,763 | 0,245 |
| <i>mNSE</i> | modificirani Nash-Sutcliffe koeficient | 0,576 | 0,339 |
| <i>rNSE</i> | relativni Nash-Sutcliffe koeficient | 0,870 | 0,481 |
| <i>bR2</i> | obteženi koeficient determinacije | 0,807 | 0,219 |
| <i>d</i> | indeks strinjanja | 0,945 | 0,772 |
| <i>md</i> | modificirani indeks strinjanja | 0,795 | 0,674 |
| <i>rd</i> | relativni indeks strinjanja | 0,970 | 0,843 |
| <i>pbias</i> | odstotek korekcije | -1,000 | -41,800 |

6.4.3.2 Rezultati za metodo CMD in usmerjevalno komponento expuh

Ponovno rezultati kažejo na podcenjevanje odtoka, na kar kaže negativna vrednost odstotka korekcije (*pbias*). Podobno kot za metodo *CWI*, ki temelji na empiričnem pristopu in optimalnem ujemanju v določenem obdobju, je padec kriterijev učinkovitosti za dobo validacije velik v primerjavi z dobo umerjanja. Visoke ocene relativnih kriterijev (*rNSE*, *rd*) kažejo, da je bazni odtok dobro ujet, vendar

zaradi empirične narave modela te v dobi validacije modela bistveno padejo. Kriteriji, ki bolje opisujejo prileganje konic (NSE , d), kažejo zadovoljivo mero ujemanja, vendar kot je razvidno iz slike 27 je ponekod model precej precenil odtok. Modificirani kriteriji (md , $mNSE$, $br2$) kažejo zadovoljivo splošno ujemanje, vendar se ponovno pokaže precejšen padec vrednosti v dobi validacije. Opazna je tudi zelo podobna učinkovitost v primerjavi z metodo CWI , kar je logično, saj si izračuna delita usmerjevalno komponento. Opazna razlika med metodama je, da CMD rahlo podceni največjo konico, medtem ko jo CWI ulovi skoraj popolno.



Slika 27: Prikaz merjenega in simuliranega odtoka z modelom IHACRES (CMD -Expuh) za porečje Glinščice

Preglednica 11: Prikaz rezultatov kriterijev učinkovitosti za metodi CMD -Expuh

| Kriterij učinkovitosti | Opis parametra | Obdobje umerjanja | Obdobje validacije |
|------------------------|--|-------------------|--------------------|
| NSE | Nash-Sutcliffe-ov koeficient | 0,777 | 0,352 |
| $mNSE$ | modificirani Nash-Sutcliffe koeficient | 0,600 | 0,379 |
| $rNSE$ | relativni Nash-Sutcliffe koeficient | 0,858 | 0,246 |
| $br2$ | obteženi koeficient determinacije | 0,608 | 0,274 |
| d | indeks strinjanja | 0,933 | 0,793 |
| md | modificirani indeks strinjanja | 0,792 | 0,677 |
| rd | relativni indeks strinjanja | 0,957 | 0,760 |
| $pbias$ | odstotek korekcije | -13,600 | -23,700 |

Primer 13: Prikaz izdelave hidrološkega modela z metodama *CMD-Expuh*

```

> setwd("C:/Users/Blaž/Desktop/seminar/Rdelo")
> pqdat<-
read.table("hydrmadPQ1dan.csv", sep=",", col.names=c("P", "Q", "Datum"), as.is=T)
> pqdat$Datum<-as.Date(pqdat$Datum, "%d.%m.%Y")
>
> tdat<-read.table("hydrmadT1dan.csv", sep=",", col.names=c("T", "Datum"), as.is=T)
> tdat$Datum<-as.Date(tdat$Datum, "%d.%m.%Y")
> tsPQ<-zoo(pqdat[,1:2], pqdat$Datum, frequency=1)
> tsT<-zoo(tdat[,1], tdat$Datum, frequency=1)
> Glin<-merge(tsPQ, E=tsT, all=F)
> Glin<-na.trim(Glin)
> xyplot(Glin, xlab="č časovni korak")
> ts1<-window(Glin, start="2003-11-01", end="2003-12-31")
> ts2<-window(Glin, start="2004-01-01", end="2004-01-31")
> hydromad.options(objective = hmadstat("r.sq.sqrt"))
> GlinModAll<-
hydromad(tsAll, sma="cmd", routing="expuh", tau_s=c(2,100), v_s=c(0,1), warmup=1)
> GlinMod<-
hydromad(ts1, sma="cmd", routing="expuh", tau_s=c(2,100), v_s=c(0,1), warmup=1)
> GlinFit<-fitByOptim(GlinMod)
  0:   -0.68754636: 0.161010 0.371212  252.020  6.94949 0.444444
 10:  -0.69894086: 0.168264 0.376241  270.441  4.59619 0.528668
> simts1<-update(GlinMod, newdata=ts1)
> simAll<-update(GlinMod, newdata=Glin)
> simVer<-update(GlinFit, newdata=ts2)
> allMods<-runlist(calibration=GlinFit, simVer)
> xyplot(allMods[1:2], scale=list(y=list(log=T)), main="Odtok po metodi CMD in
Expuh (IHACRES)", xlab="č časovni korak[1dan]", ylab="Odtok [mm/dan]")#merjeni
proti simuliranim validacijsko obdobje in kalibracijsko obdobje
> summary(simVer)#povzetki za obdobje verifikacije

```

Call:

```

hydromad(DATA = ts2(), tau_s = 4.8267, v_s = 0.532425, sma = "cmd",
  routing = "expuh", warmup = 1, f = 0.196717, e = 1.5, d = 84.3702)

```

Time steps: 30 (0 missing).

Runoff ratio (Q/P): (3.093 / 3.507) = 0.8819

rel bias: -0.1961

r squared: 0.3769

r sq sqrt: 0.1836

r sq log: -0.0117

For definitions see ?hydromad.stats

```

> summary(GlinFit)#povzetki za obdobje kalibracije

```

Call:

```

hydromad(DATA = ts1, tau_s = 4.8267, v_s = 0.532425, sma = "cmd",
  routing = "expuh", warmup = 1, f = 0.196717, e = 1.5, d = 84.3702)

```

Time steps: 57 (3 missing).

Runoff ratio (Q/P): (2.778 / 3.978) = 0.6984

rel bias: -0.1268

r squared: 0.778

r sq sqrt: 0.7053

r sq log: 0.5536

```

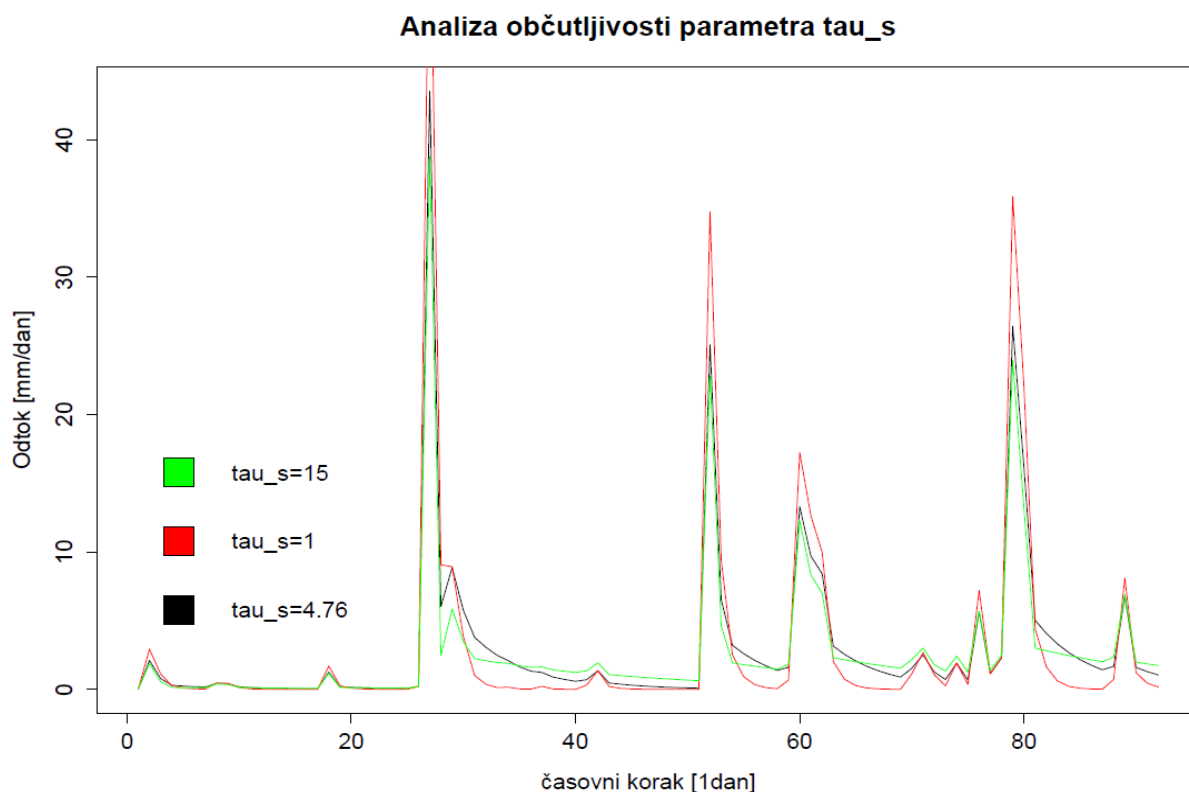
> GlinMod<-hydromad(tsAll, sma="cmd", routing="expuh", tau_s = 4.8267, v_s =
0.532425, f = 0.196717, e = 1.5, d = 84.3702, warmup=1)

```

6.4.4 Analiza občutljivosti

Analize občutljivosti parametrov se poslužujemo za boljše razumevanje modela in njegovih komponent v smislu pomena in učinka parametrov na odtok. V nadaljevanju je predstavljena analiza občutljivosti za dva modela, ki sta bila narejena z enako usmerjevalno komponento Expuh. Expuh predstavlja eksponentno oblika enotnega hidrograma z dvema paralelno povezanima posodama (Jakeman, 1990). Vsaka komponenta je definirana s časovno konstanto τ in frakcijskim volumnom v . Vsak parameter ima počasno (s) in hitro komponento (q) (Andrews in sod., 2011). Ker gre za usmerjevalno komponento, ta nima velikega vpliva na samo količina odtoka, ampak vpliva bolj na časovno razporeditev odtoka.

V paketu *hydromad* nastopajo trije parametri: časovna konstanta (τ_s), frakcijski volumen (v_s) ter stresni prag (f). Usmerjevalna komponenta je osnovana na matematični podlagi, zaradi tega je učinke parametrov težko povezati s procesi v naravi. Časovna konstanta ob povečanju zmanjša bazni odtok, ob znižanju zviša odtok (slika 28). Frakcijski volumen ob povečanju zniža odtočne konice, ob znižanju pa obratno. Stresni prag ob povečanju zmanjša odtočne konice predvsem na začetku opazovanega obdobja, medtem ko zmanjšanje praga zviša odtok predvsem v kasnejšem obdobju.

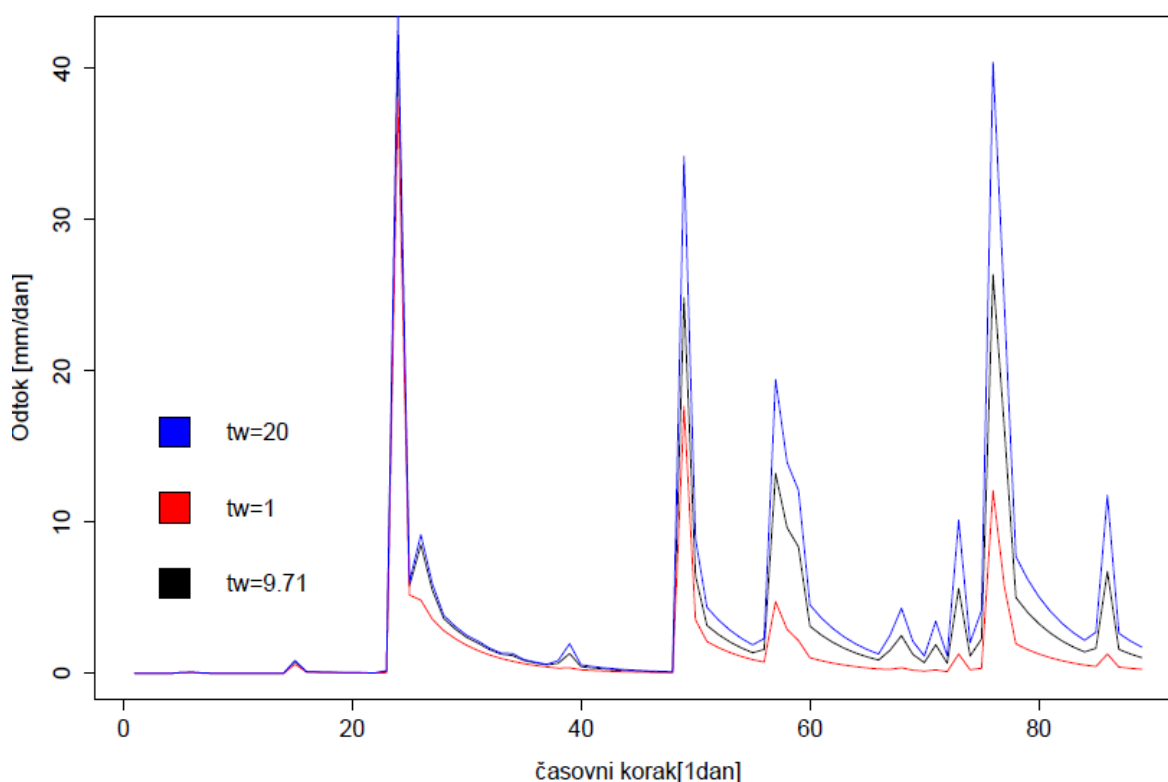


Slika 28: Prikaz vpliva parametra τ_s na odtok

6.4.4.1 Metoda CWI

Metoda *CWI* z upoštevanjem temperature določi evapotranspiracijo in pretvori padavine v učinkovite padavine, torej tisto količino padavin, ki bo po določenem času postala površinski odtok (Andrews, 2011). V programu R jo določimo z dvema parametroma: prvi je faktor (tw), ki določa padanje indeksa vlažnosti (*CWI*) kot posledica evapotranspiracije in drugi je oblikovni faktor (*scale*). Faktor zmanjševanja *CWI* (tw), zmanjša odtok, še posebej na koncu obdobja, zvišanje faktorja tw ima obratne posledice (slika 29). Oblikovni faktor ob znižanju vidno zmanjša odtok, ob povečanju pa obratno.

Analiza občutljivosti parametra tw na odtok (metoda CWI)



Slika 29: Prikaz vpliva parametra tw na odtok (*CWI*-Expuh)

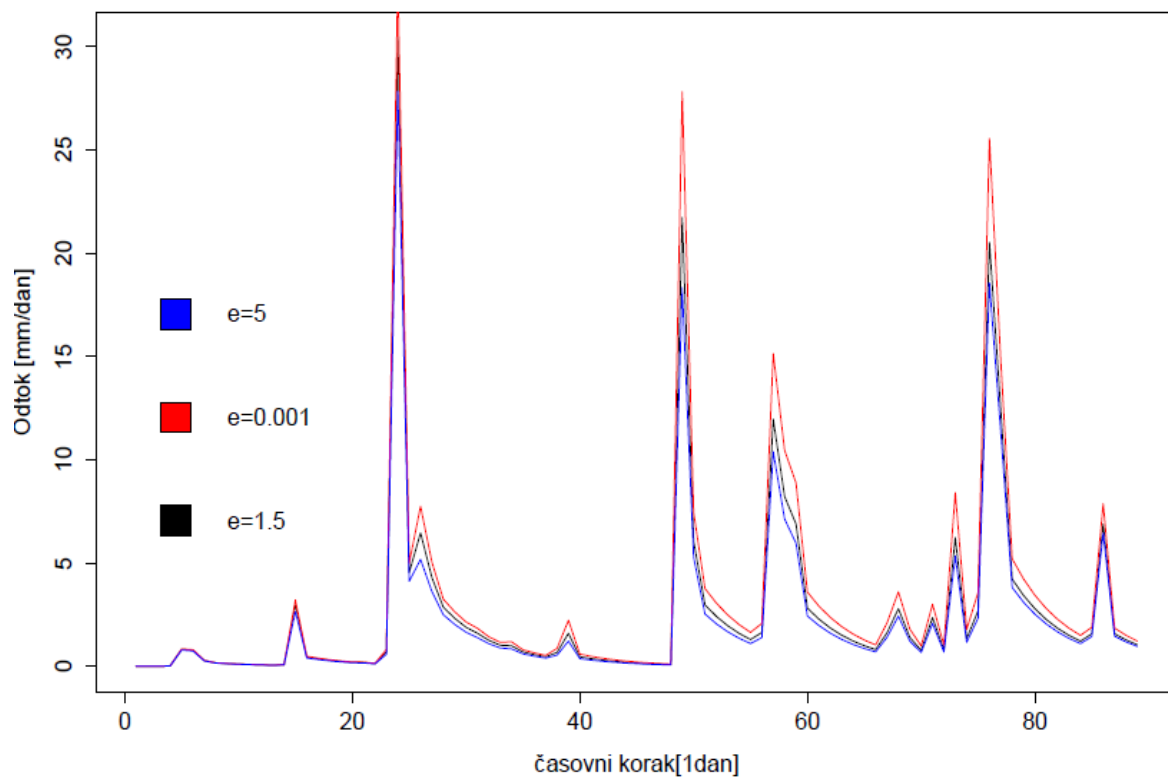
6.4.4.2 Metoda CMD

Metoda primanjkljaja vlažnosti v zemljini (ang. *Catchment Moisture Deficit CMD*) (Croke in Jakeman, 2004) uporabi temperaturo in padavine kot osnovo za izračun evapotranspiracije in odtoka, in predpostavlja, da proces infiltracije ni povezan s temperaturo (Andrews, 2011). V programu R je metoda določena z evapotranspiracijskim koeficientom (e) in pragom odtoka (d).

Prag odtoka se je izkazal za dokaj neobčutljiv parameter, saj odtok naraste šele ob ekstremnem znižanju, vidno pa je neobčutljiv tudi za visoke vrednosti, saj se ob ekstremnem zviševanju odtok zelo

malo zniža. Evapotranspiracijski koeficient pa pričakovano ob naraščanju zmanjša odtok, kar kaže na večje prehajanje vode v atmosfero (slika 30).

Analiza občutljivosti odtoka na parameter e (metoda CMD)



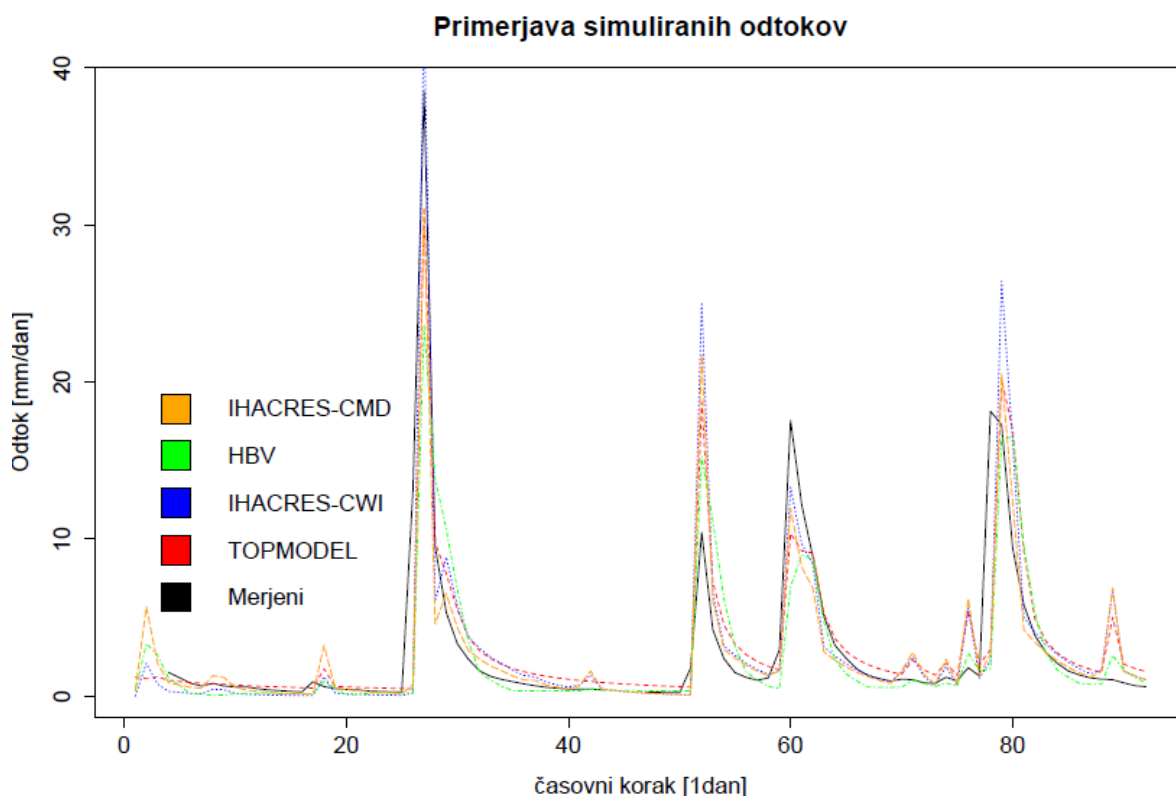
Slika 30: Prikaz vpliva parametra e na odtok (CMD-Expuh)

7 ANALIZA IN PRIMERJAVA REZULTATOV

V splošnem so imeli modeli dokaj podobne vrednosti posameznih kriterijev učinkovitosti, vendar je TOPMODEL vsaj za obdobje validacije pokazal najboljšo učinkovitost (zelo blizu po učinkovitosti v obdobju validacije je IHACRES-CMD), kar je pričakovano, a obenem presenetljivo. Pričakovali smo, da bo najboljše ocene imel model IHACRES, saj za razliko od TOPMODEL-a računa le celoten odtok in ne loči odtoka na posamezne komponente. Za čimbolj objektivno oceno je bilo izbranih osem različnih kriterijev učinkovitosti, vendar so rezultati pokazali, da absolutnega zmagovalca med modeli ni, saj imajo vsi modeli ocene nekaterih kriterijev boljše od drugih.

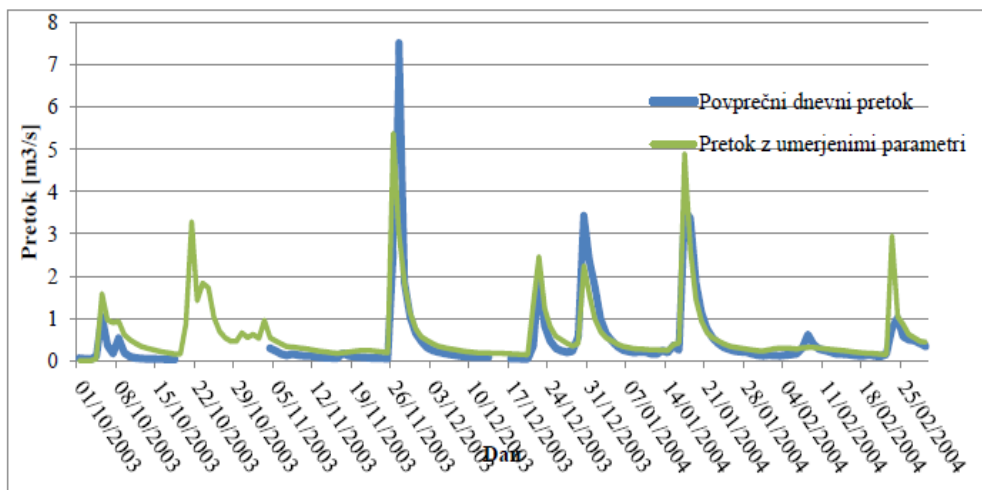
Hidrološki modeli imajo tako kot kriteriji učinkovitosti prednosti in slabosti, kar se kaže tudi v rezultatih. Empirični modeli kot je IHACRES so zelo preprosti modeli, vendar zaradi te preprostosti ne ločijo posameznih komponent odtoka in upoštevajo le minimalno število fizičnih prvin porečja. Vidno je, da ko so se drugi modeli približevali največji konici, je model z metodo *CWI* to konico presegel (slika 29). Najbolj vidna posledica teh dejstev pri modelu IHACRES je strm padec kriterijev učinkovitosti v obdobju umerjanja v primerjavi z obdobjem validacije. V splošnem sta metodi *CWI* in *CMD* podali zelo podobne rezultate razen prej omenjene največje konice, je pa sama oblika hidrograma veliko bolj "ostra" od merjenega hidrograma.

Model IHACRES v osnovi ne temelji na teoretični osnovi, ampak uporabi zelo preproste teze pri izračunu efektivnih padavin. Model HBV pa je izdelan na osnovi konceptov s teoretično podlago ter skuša s samo strukturo modela oponašati naravne procese v porečju, vendar je za razliko od empiričnih modelov njegova struktura lahko velika bolj kompleksna, kar lahko zmanjša učinkovitost modela. Stopnja konceptualizacije je razmerje modelne strukture in njegovih parametrov s hidrološkimi procesi v porečju ter načeloma velja, da model z manjšo stopnjo konceptualizacije poda boljši rezultat (Kokkonen in Jakeman, 2001). Trditev se je v tem primeru pokazala kot pravilna, saj je na splošno dal model IHACRES boljše rezultate od modela HBV, vendar je treba ponovno omeniti, da je bilo umerjanje modela HBV narejeno vizualno oz. z veliko mero subjektivnosti. Model HBV je v splošnem podal zadovoljive rezultate, rezultati pa so tudi pokazali zelo visok bazni odtok v primerjavi z dugimi modeli. TOPMODEL je v smislu kriterijev učinkovitosti podal najboljše rezultate za obdobje validacije, kar je bilo pričakovano, saj za razliko od drugih dveh modelov upošteva topografijo porečja, medtem ko HBV in IHACRES upoštevata minimalno količino fizičnih prvin porečja. Pri večini modelov je opazno podcenjevanje največje konice, kar velja tudi za TOPMODEL, kar je najverjetneje posledica tega, da topografski indeks ne zmore dobro določiti vpliva gorvodnih pobočij na gladino podtalnice in rabi tok dalj časa, da aktivno vpliva na odtok, kot je omenil Seibert (1997). V splošnem so vsi modeli dali dobre rezultate, če upoštevamo dejstvo, da je bilo obdobje opazovanja relativno kratko. Iz slike 31 je razvidno, da noben od modelov ni uspel ujeti tretje večje konice, ki je nastopila okoli novega leta 2004 (konica okoli časovnega koraka 60).



Slika 31: Primerjava simuliranih odtokov s porečja Glinščice s štirimi različnimi modeli in z merjenimi odtoki

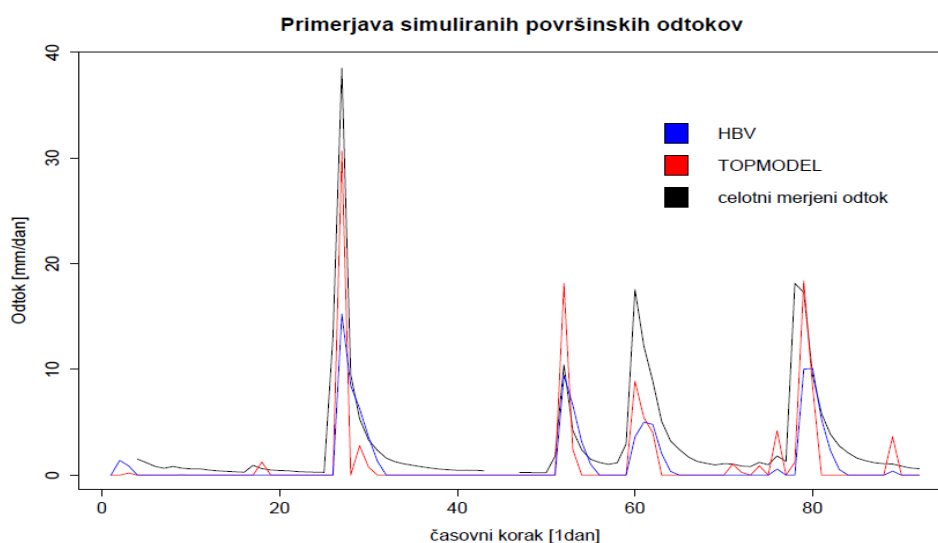
Kovačec (2012) je za porečje Glinščice izdelal hidrološki model z programom SWAT za obdobje 1.11.2003-31.1.2004. Po umerjanju je bila učinkovitost modela $NSE=0,79$ za celotno obdobje, kar je primerljivo z rezultati učinkovitosti TOPMODEL-a (preglednica 5). Kot je razvidno iz slike 32 se tudi pri rezultatih hidrološkega modela SWAT (Kovačec, 2012) pojavijo podobna odstopanja med simuliranimi in merjenimi podatki. Druga in četrta konica sta enako kot v predstavljenih modelih (IHACRES-CWI, TOPMODEL, HBV) precenjeni, tretja in prva konica pa podcenjeni. Na splošno je učinkovitost modela močno odvisna od obdobja umerjanja. Rezultati bi bili boljši, če bi pretok umerili v daljšem časovnem obdobju, saj bi na ta način upoštevali več naravnih dejavnikov, kot so razlike ob menjavi letnih časov, pojav ekstremnih padavinskih dogodkov idr. hkrati pa bi bili fizični procesi, ki se vršijo na porečju, bolj celostno zajeti v umerjenih parametrih (Kovačec, 2012).



Slika 32: Primerjava povprečnega dnevnega pretoka in simuliranega odtoka z programom SWAT (Kovačec, 2012)

7.1 Primerjava simuliranih površinskih odtokov

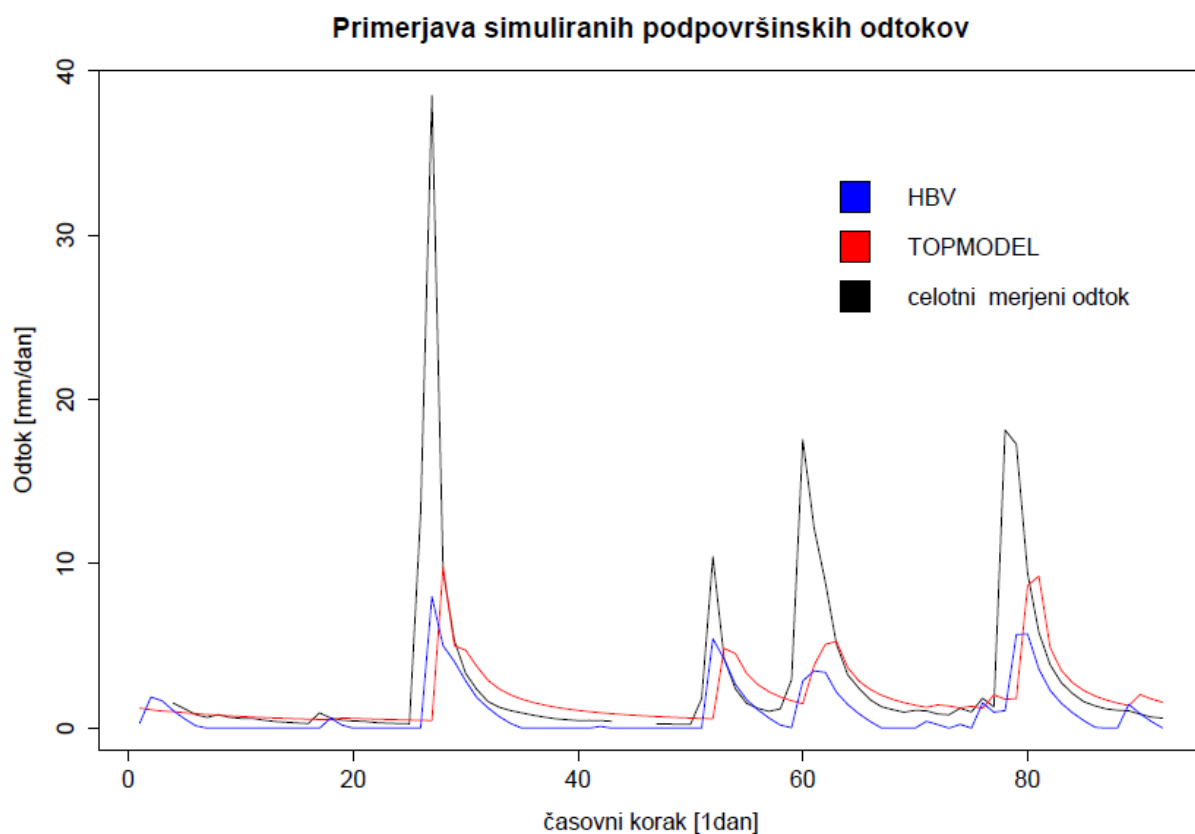
Primerjani so le simulirani podatki modela HBV in TOPMODEL-a, saj model IHACRES ne razdeli celotnega odtoka na posamezne komponente. Iz slike 33 je opazno, da je površinski odtok TOPMODEL-a bolj koničast od rezultatov modela HBV in hkrati tudi višji. To je najverjetneje posledica dejstva, da imata modela različne parametre za določitev prepustnosti zemljine in različno intepretirata zemljinsko prepustnost, ki vpliva na izračun posamezne komponente odtoka. Na splošno velja, da na zelo prepustnih tleh površinskega odtoka niti ne zaznamo, poveča se le bazni odtok, medtem ko na slabše prepustnih površinah povečanja baznega odtoka ni, saj padavine v celoti površinsko odtečejo (Brilly in Šraj, 2005). V smislu časovne razporeditve sta simulirana površinska odtoka podobna.



Slika 33: Primerjava simuliranih površinskih odtokov z merjenim celotnim odtokom

7.2 Primerjava simuliranih podpovršinskih odtokov

Primerjani so le simulirani podatki modela HBV in TOPMODEL-a, saj model IHACRES ne razdeli celotnega odtoka na posamezne komponente. Iz slike 34 je opazno, da sta podpovršinska odtoka obeh modelov oblikovno zelo podobna, s tem da je podpovršinski odtok TOPMODEL-a ves čas rahlo višji, kar je najverjetneje posledica dejstva, da model HBV posebej upošteva še bazni odtok, ki igra pomembno vlogo pri določanju podpovršinskega odtoka. V smislu časovne razporeditve sta simulirana podpovršinska odtoka podobna, vendar rahlo zamaknjena, kar je možna posledica drugačne strukture modelov. Kljub različni strukturi modelov pa sta podpovršinska odtoka v smislu dinamike zelo podobna in je le na začetku simulacijskega obdobja manjša razlika, ko TOPMODEL kaže precej enakomeren odtok, medtem ko je podpovršinski odtok HBV modela bolj razgiban.



Slika 34: Primerjava simuliranih podpovršinskih odtokov z merjenim celotnim odtokom

8 ZAKLJUČKI

Pri hidroloških modelih iščemo čim manjšo kompleksnost in čim večjo natančnost, vendar imajo vsi modeli prednosti in slabosti, ki jih moramo dobro poznati, saj so lahko osnovani na predpostavkah, ki niso najbolj optimalne za izbrani primer. Poznavanje in razumevanje delovanja modelov je pomembno, a enako pomembno je tudi poznavanje indikatorjev ocene modelov. Nekatere statistične ocene prepogosto kažejo predobro ali preslabo oceno in s tem lahko zavedejo, v najslabšem primeru zaradi napačne intepetacije rezultatov zgrešimo potencialno nevarnost poplave.

Proces hidrološkega modeliranja sam po sebi ni zahteven, zahtevnost je odvisna od kompleksnosti samega modela, bodisi v smislu števila vhodnih podatkov ali pa v smislu računske zahtevnosti. Pred samo simulacijo je potrebno model umeriti. Najpogostejši način umerjanja modelov je s pomočjo že znanih merjenih količin, ki nam služijo kot idealen rezultat simulacije. Kljub natančnemu umerjanju modela vedno pride do odstopanj, saj se v naravi razmere lahko hitro spremenijo in s tem znižajo natančnosti modela, poleg tega pa noben model danes še ne more popolnoma opisati naravnih procesov.

Danes je za hidrološko modeliranje na voljo veliko orodij, vendar privlačnost R-a leži v njegovi brezplačnosti in sami možnosti dodajanja novih funkcij, zaradi česar lahko trdimo, da ima R neskončen potencial. V diplomski nalogi so bili izdelani trije različni hidrološki modeli za porečje Glinščice. Uporabljen je bil semi-distribuiran hidrološki model TOPMODEL, konceptualni model HBV in empirični model IHACRES. Vsi trije modeli imajo različne strukturne osnove, vendar so kljub temu v splošnem podali podobne rezultate.

Prednosti in pomanjkljivosti posameznih modelov se pokažejo šele po bolj detajlni analizi s pomočjo kriterijev učinkovitosti. Rezultati hidroloških modelov so bili ocenjeni z osmimi kriteriji učinkovitosti. Ti so pokazali prednosti in slabosti vsakega posameznega modela. Poleg tega smo v nalogi pokazali, da imajo hidrološki modeli različno strukturo in osnovne predpostavke, ki lahko močno vplivajo na same rezultate in opozarjajo na nujnost poznavanja teh predpostavk ter pravilne izbire kriterijev učinkovitosti pri sami izdelavi modelov ter interpetaciji rezultatov. Zaradi različne občutljivosti kriterijev učinkovitosti na majhna in velika odstopanja je opazen velik raztros pri oceni učinkovitosti, vendar ob pravilni izbiri kriterijev lahko dobimo zadovoljivo oceno, kje se model dobro odreže in kje so njegove pomanjkljivosti.

VIRI

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements, Rome, FAO Irrigation and drainage paper 56: 15 str.
http://www.engr.scu.edu/~emaurer/classes/ceng140_watres/handouts/FAO_56_Evapotranspiration.pdf
(Pridobljeno 26. 12. 2013.)
- Andrews, F.T 2011. Hydromad Tutorial. <http://hydromad.catchment.org/> (Pridobljeno 26.10.2013.)
- Andrews, F.T., Croke, B.F.W., Jakeman, A.J. 2011. An open software environment for hydrological model assessment and development. *Environmental Modelling and Software* 26, 10: 1171-1185.
- ARSO, 2013. Izpis podatkov agrometeoroloških spremenljivk od leta 1961 naprej.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/> (Pridobljeno 27. 12. 2013.)
- ARSO, 2014. Atlas okolja.
http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (Pridobljeno 20. 5. 2014.)
- Arnold, J.G., Allen, P.M. 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology* 176, 1-4: 57-77.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R. 1998. Large area modeling and assessment, Part 1: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association* 34, 1: 73-89.
- ASCE (American Society of Civil Engineers), 1996. *Hydrology Handbook* Second edition. ISBN 0-7844-0138-1: 824 str.
- Beck, M.B. 1991. Forecasting environmental change. *Journal of Forecasting* 10, 1-2: 3-19.
- Bergström, S. 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Report No. RHO 7, Norrköping: 134 str.
- Berner, E.K., Berner, R.A. 1987. *The Global Water Cycle*, Prentice Hall, New Jersey: 397 str.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24, 1: 43-69.

- Beven, K.J., Wood, E.F. 1983. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. *Journal of Hydrology* 65, 1-3: 139-158.
- Beven, K. 1984. Infiltration into a class of vertically nonuniform soils. *Hydrological Sciences* 29, 4: 425-434.
- Beven, K.J., Lamb, R., Quinn, P.F., Romanowicz, R., Freer, J. 1995. TOPMODEL. In: Singh V.P. (ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado, Water Resources Publications: p. 627–668.
- Brilly, M., Šraj, M. 2005. *Osnove hidrologije*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.
- Brilly, M., Rusjan, S., Vidmar, A. 2006. Monitoring the impact of urbanisation on the Glinscica stream. *Physics and Chemistry of the Earth* 31, 17: 1089-1096.
- Buytaert, W. 2011. Package 'topmodel': 14 str.
<http://cran.rproject.org/web/packages/topmodel/> (Pridobljeno 10. 10. 2013.)
- Campling, P., Gobin, A., Chen, D., Beven, K., Feyen, J. 2002. Rainfall-runoff modelling of a humid tropical catchment: the TOPMODEL approach. *Hydrological Processes* 16, 2: 231-253.
- Cesar, P. 2010. Primerjava različnih metod izračuna evapotranspiracije. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Cesar): 150 f.
- Childs, E.C., Bybordi, M. 1969. The vertical movement of water in stratified porous material 1: Infiltration. *Water Resources Research* 5, 2: 446-459.
- Croke, B. F. W., Jakeman, A. J., 2004. A catchment moisture deficit module for the IHACRES rainfall-runoff model. *Environmental Modelling and Software* 19, 1: 1-5.
- Dirnberk, L. 2009. Vpliv histograma efektivnih padavin na hidrogram odtoka. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Dirnberk): 99 f.
- Dye, P.J., Croke, B.F.W. 2003. Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environmental Modelling and Software* 18, 8-9: 705-712.

Fogleman, B. 2009. Modeling the Ungauged Basin Using TOPMODEL in GRASS GIS: 39 f.
http://geomodeler.com/Documents/waterShed_presentFinal.pdf (Pridobljeno 20. 12. 2013.)

Gong, L., Xu, C., Chen, D., Halldin, S., Chen, Y.D. 2006. Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology* 329, 3-4: 620-629.

Green, W.H., Ampt, G.A. 1911. Studies in soil physics I: The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4, 1: 1-24.

Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of the American Geophysical Union* 14, 1: 446–460.

Jakeman, A.J., Littlewood, I.G., Whitehead, P.G. 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology* 117, 1-4: 275-300.

Jakeman, A.J., Hornberger, G.M. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model. *Water Resources Research* 29, 8: 2637–2649.

Kokkonen, T.S., Jakeman, A.J. 2001. A comparison of metric and conceptual approaches in rainfall-runoff modeling and its implications. *Water Resources Research* 37, 9: 2345-2352.

Koster, R.D., Suarez, M.J., Ducharne, A., Stieglitz, M. in Kumar, P. 2000. A catchment based approach to modeling land surface processes in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research* 105, 20: 809-822.

Kovačec, M. 2012. Hidrološki model Glinščice z modelom SWAT. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kovačec): 104 f.

Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geoscience* 5: 89-97.

Matloff, N. 2009. *The Art of R Programming*: 139 str.
<http://heather.cs.ucdavis.edu/~matloff/132/NSPpart.pdf/> (Pridobljeno 1. 11. 2013.)

Mein, R.G., Larson, C.L. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research* 9: 384-394.

Morel-Seytoux, H.J., Khanji, J. 1974. Derivation of an equation of infiltration. *Water Resources Research* 10, 4: 795-800.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles, *Journal of Hydrology* 10, 3: 282-290.

Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G. 2007. Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: Case study in 320 Austrian catchments. *Hydrol. Process.* 21, 34: 435-446.

Parajka, J., Viglione, A. 2012. Package 'TUWmodel': 6 str.
<http://cran.r-project.org/web/packages/TUWmodel/index.html> (pridobljeno 26. 10. 2013.)

Partington, D., Werner, A.D., Brunner, P., Simmons, C.T., Dandy, G.C., Maier, H.R. 2009. Using a fully coupled surface water-groundwater model to quantify streamflow components. 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia, 13-17 July 2009: 3102-3108.
<http://www.mssanz.org.au/modsim09/I1/partington.pdf> (Pridobljeno 29. 6. 2014.)

Pestotnik, S. 2011. Hidrološki model Glinščice s programom Flo-2D. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Pestotnik): 95 f.

R-project, version 3.0.2, 2013. <http://www.r-project.org/> (Pridobljeno 10. 10. 2013.)

Robson, A.C., Beven, K.J., Neal, C. 1992. Towards identifying sources of subsurface flow: a comparison of components identified by a physically based runoff model and those determined by chemical mixing techniques. *Hydrol. Processes* 6, 2: 199-214.

Rusjan, S., Fazarinc, R., Mikoš, M. 2003. Možnosti za revitalizacijo urbanih vodotokov na primeru Glinščice v Ljubljani = (River rehabilitation of urban watercourses on the example of the Glinščica river in Ljubljana). *Acta hydrotechnica* 21: 1-22.

Seibert, J. 1997. On TOPMODEL's ability to simulate groundwater dynamics. In: Diekkrüger, B. (ed.), Kirkby, M.J. (ed.), Schröder, U. (ed.). *Regionalization in Hydrology: Proc. Conf. at Braunschweig, Germany, March 1997.* Oxfordshire, IAHS Publication: p. 211-220.

Seibert, J. 1999. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99: 279-293.

Shaman, J., Stieglitz, M., Engel, M., Koster, R., Stark, C. 2002. Representation of subsurface storm flow and a more responsive water table in a TOPMODEL-based hydrology model. *Water Resources Research* 38, 8: (31)1-(31)16.

Styles, S.W., Burt, C.M, 1999. Subsurface flows water balance for components for irrigation districts in the San Joaquin Valley. Conference on benchmarking irrigation system performance using water measurements and water balances USCID, Denver, ITRC Paper 99, 2: 1-10.
http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1039&context=bae_fac (Pridobljeno 29. 6. 2014.)

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

Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C., Rodhe, A. 1999. Prediction uncertainty of conceptual rainfall runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. *Hydrological Sciences* 44, 5: 779-797.

Venables, W.N., Smith, D.M., R Core Team 2013. An Introduction to R Version 3.0.2: 105 str.
<http://cran.r-project.org/doc/manuals/R-intro.pdf> (Pridobljeno 20. 1. 2014.)

Wagener, T., Wheater, H.S. 2006. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of hydrology* 320, 1-2: 132-154.

Ward, A.D., Trimble, S.W. 2004. Environmental hydrology. Second edition, Lewis publishers, ISBN 1-56670-616-5: 504 str.

Willmott, C. J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2, 2: 184-194.

Zambrano-Bigiarini, M. 2013. Package 'hydroGOF': 74 str.
<http://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/index.html> (Pridobljeno 26. 10. 2013.)