

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:

Trušnovec, O., 2016. Izračun vodne bilance z modelom SIMPEL. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M.): 35 str.

Datum arhiviranja: 16-12-2016

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:

Trušnovec, O., 2016. Izračun vodne bilance z modelom SIMPEL B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M.): 35 pp.

Archiving Date: 16-12-2016

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 PRVE STOPNJE  
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

**OŽBE TRUŠNOVEC**

**IZRAČUN VODNE BILANCE Z MODELOM SIMPEL**

Diplomska naloga št.: 284/B-GR

**CALCULATION OF WATER BALANCE USING SIMPEL  
MODEL**

Graduation thesis No.: 284/B-GR

**Mentorica:**

doc. dr. Mojca Šraj

Ljubljana, 21. 11. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani študent Ožbe Trušnovec, vpisna številka 26105954, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Izračun vodne bilance z modelom SIMPEL

### IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Podpis študenta:

\_\_\_\_\_



## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>556.512(497.4)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Ožbe Trušnovec</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Mojca Šraj</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Izračun vodne bilance z modelom SIMPEL</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>35 str., 8 pregl., 16sl., 9 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>SIMPEL, vodna bilanca, evapotranspiracija, površinski odtok,</b>

### **Izveleček**

Diplomska naloga obravnava vodno bilanco in njene člene ter program SIMPEL, namenjen takim izračunom. Namen ustvarjalcev programa je bil zmanjšati zahtevnost izračunavanja členov vodne bilance ter narediti hidrološki program, namenjen širšemu krogu uporabnikov.

V prvem delu naloge smo predstavili osnovne člene vodne bilance ter sam program SIMPEL in njegovo delovanje. Razložili smo, kateri so potrebni začetni podatki in kam ter v kakšni obliki jih moramo vnašati. Nato smo podrobneje predstavili metode za izračun evapotranspiracije (ETp), in sicer Haude, Thornthwaite, Blaney/Criddle, Turc, Penman, Makkink, Wendling za obalna območja, Penman/Monthieith za iglaste gozdove, Penman/Monthieith – EPIC. Opisali smo tudi model veder, na principu katerega deluje program ter predstavili metode, s katerimi izračuna površinski odtok.

V praktičnem delu naloge smo s pomočjo programa SIMPEL naredili izračun vodne bilance porečja reke Tolminke. Prikazane so izračunane vrednosti ETp in površinskega odtoka za 'mokro' leto 2009 in 'suho' leto 2011. Naredili smo primerjavo modeliranih in izmerjenih vrednosti ter s pomočjo koeficienta Nash-Sutcliffe ocenili učinkovitost modela. Izkaže se, da poda model zadovoljive rezultate pri izračunu ETp, pri izračunu površinskega odtoka pa ga je težko zadovoljivo umeriti, kar je pogost problem hidroloških modelov.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 556.512(497.4)(043.2)  
**Author:** Ožbe Trušnovec  
**Supervisor:** assist. prof. Mojca Šraj, Ph.D.  
**Title:** Calculation of water balance using SIMPEL model  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Contents:** 35 p., 8 tab., 16 fig., 9 ann.  
**Key words:** SIMPEL, water balance, evapotranspiration, surface runoff

### **Abstract**

The thesis deals with a general explanation of water balance, its components, and SIMPEL software designed for water balance calculations. The aim of the creators of the software was to reduce the complexity of calculations and to create a hydrological program designed for a wide range of users.

In the first part of the thesis, there is a general explanation of water balance and its components and a description of SIMPEL software. We described the necessary input data as well as where and in what form to insert them. Then methods for calculating evapotranspiration (ET<sub>p</sub>) e.g. the Haude, Thornthwaite, Blaney/Criddle, Turc, Penman, Makkink, Wendling for coastal areas, Penman/Monteith for coniferous woods and Penman/monteith – EPIC are described. The bucket model which is the basis for calculation of the surface runoff is also introduced.

In the practical part of the thesis we calculated water balance for the catchment of Tolminka river using SIMPEL software. We compare the calculated values of ET<sub>p</sub> and surface runoff for one 'wet' year 2009 and one 'dry' year 2011. We compared measured and calculated values and assessed the predictive power of the model with Nash-Sutcliffe coefficient. The results demonstrate that model for calculations of ET<sub>p</sub> returned satisfactory results. However, it is difficult to satisfactorily calibrate the model of surface runoff, which is often the problem of hydrological models.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem doc. dr. Mojci Šraj.  
Zahvaljujem se tudi svoji družini, ki mi je v času študija stala ob strani in me podpirala.

## KAZALO VSEBINE

KAZALO VSEBINE .....	VI
KAZALO SLIK .....	VIII
KAZALO PREGLEDNIC.....	IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	X
1 UVOD .....	1
2 VODNA BILANCA.....	2
2.1 Enačba vodne bilance.....	2
2.2 Vplivni dejavniki.....	2
2.3 Členi vodne bilance.....	3
2.3.1 Padavine .....	3
2.3.2 Evapotranspiracija.....	3
2.3.3 Pretoki .....	3
2.3.4 Pretočni režimi .....	4
3 MODEL SIMPEL .....	5
3.1 Osnove.....	5
3.2 Opis modela .....	6
3.2.1 Začetni podatki za izračun evapotranspiracije .....	6
3.2.2 Fizikalni podatki o zemljini.....	7
3.3 Metode izhlapevanja .....	7
3.3.1 Začasne spremenljivke .....	7
3.3.1.1 Trajanje sončnega obsevanja in globalna radiacija .....	7
3.3.1.2 Vlaga .....	8
3.3.2 Transpiracija rastlin.....	8
3.3.3 Thornthwaite-ova metoda.....	9
3.3.4 Turc-ova metoda .....	9
3.3.5 Blaney/Criddle-ova metoda.....	10
3.3.6 Makkink-ova metoda.....	10
3.3.7 Wendling-ova metoda za obalna območja .....	10
3.3.8 Penman-ova metoda (modificirana po Wendling-u) .....	10
3.3.9 Metoda Penman/Monteith za iglaste gozdove.....	11
3.3.10 Metoda Penman/Monteith – EPIC .....	12
3.3.11 Haude-va metoda.....	13
3.4 Model vode v zemljini.....	14
3.4.1 Model vedra listov za prestrezanje padavin .....	14
3.4.2 Model vedra listja na tleh za prestrezanje padavin.....	15
3.4.3 Osnovni model vode v zemljini.....	16
3.5 Površinski odtok.....	16
3.6 Rezultati .....	17

3.7 Dodatne verzije modela.....	18
4 IZRAČUN ČLENOV VODNE BILANCE ZA POREČJE TOLMINKE Z MODELOM SIMPEL .....	19
4.1 Predstavitev obravnavanega območja .....	19
4.1.1 Lega in relief .....	19
4.1.2 Podnebje .....	20
4.1.3 Kamnine in prsti .....	20
4.1.4 Rastlinstvo .....	21
4.1.5 Antropogeni dejavniki v dolini Tolminke .....	21
4.2 Členi vodne bilance .....	22
4.2.1 Padavine .....	22
4.2.2 Izhlapevanje .....	22
4.2.3 Pretoki .....	22
4.2.4 Pretočni režimi .....	22
4.3 Učinkovitost modela .....	23
4.4 Rezultati modeliranja .....	23
5 ZAKLJUČEK.....	32
VIRI.....	34

## KAZALO SLIK

Slika 1: Poenostavljen model vodnega kroga.....	3
Slika 2: Srednje mesečne vrednosti pretoka na postaji Tolmin za obdobje 1953-2004.....	4
Slika 3: Struktura modela SIMPEL.....	5
Slika 4: Prikaz delovnega lista v datoteki toolbox_evaporation.xls.....	7
Slika 5: Prikaz delovnega lista v datoteki simpel2_e.xls.....	14
Slika 6: Dolina Polog, po kateri teče reka Tolminka.....	19
Slika 7: Porečje Tolminke in Zadlaščice.....	19
Slika 8: Izsek geološke karte za dolino Tolminke in njene širše okolice.....	20
Slika 9: Raba tal v porečju Tolminke.....	21
Slika 10: Merilno mesto Tolmin I – most čez Tolminko.....	22
Slika 11: Graf mesečnih vrednosti ETp izračunanih po različnih metodah za leto 2009.....	24
Slika 12: Graf letnih vrednosti ETp izračunanih po različnih metodah za leto 2009.....	24
Slika 13: Primerjava izmerjenega ter modeliranega odtoka za leto 2009.....	26
Slika 14: Graf mesečnih vrednosti ETp izračunanih po različnih metodah za leto 2011.....	28
Slika 15: Graf letnih vrednosti ETp izračunanih po različnih metodah za leto 2011.....	28
Slika 16: Primerjava izmerjenega ter modeliranega odtoka za leto 2011.....	30

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava različnih modelov za računanje ETp v letu 2009 ter ocene njihove učinkovitosti.....	23
Preglednica 2: Primerjava merjenega in modeliranega površinskega odtoka z uporabo treh, po Nash-Suttcliffe najbolj ocenjenih, modeliranih ETp v letu 2009 ter ocene njihove učinkovitosti.....	25
Preglednica 3: Primerjava merjenega in modeliranega površinskega odtoka z uporabo Penmanovega modela ETp ter dveh zemljin z različnimi fizikalnimi lastnostmi za leto 2009 .....	25
Preglednica 4: Vodna bilanca za leto 2009 .....	25
Preglednica 5: Primerjava različnih modelov za računanje ETp v letu 2011 ter ocene njihove učinkovitosti.....	27
Preglednica 6: Primerjava merjenega in modeliranega površinskega odtoka z uporabo treh, po Nash-Suttcliffe najbolj ocenjenih, modeliranih ETp v letu 2011 ter ocene njihove učinkovitosti.....	29
Preglednica 7: Primerjava merjenega in modeliranega površinskega odtoka z uporabo Penmanove ETp ter dveh zemljin z različnimi fizikalnimi lastnostmi za leto 2011.....	29
Preglednica 8: Vodna bilanca za leto 2011 .....	30

## **OKRAJŠAVE IN SIMBOLI**

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
DVWK	Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (Nemško združenje za okolje in vodo)
EPIC	The Environmental Policy Integrated Climate
ETp	potencialna evapotranspiracija
FAO	Organizacija Združenih narodov za prehrano in kmetijstvo
LAI	indeks listne površine
P	padavine
SWC	vsebnost vode v zemljini
WC SR	začetek redukcije



## 1 UVOD

Voda sestavlja precejšen odstotek zemeljskega površja ter je najpomembnejši element našega življenja. Vsa voda na Zemlji kroži v tako imenovanem vodnem krogu. Poznamo mali in veliki vodni krog. Mali poteka med atmosfero in oceani, veliki pa na kopnem. Večina izmenjave vode se zgodi v malem vodnem krogu. Veliki vodni krog je kompleksnejši in ima veliko število spremenljivk. Njihovo opazovanje nam pomaga pri razumevanju naravnih pojavov. Običajno nas bolj zanimajo elementi velikega vodnega kroga, ki jih lahko s pridom uporabljamo v različnih panogah povezanih z vodo (Kozakiv, 2013).

V hidrologiji so raziskave usmerjene predvsem k uporabi zapletenih metod in velikih obravnavanih območij. Modeli hitro postanejo kompleksni in za uporabnika težko razumljivi. Mnogi uporabniki pri svojem delu še vedno uporabljajo preprosto klimatsko vodno bilanco in tradicionalno oceno "čez palec". Ti uporabniki namesto kompleksnih modelov, za katere potrebujemo veliko časa, da jih lahko poženemo, potrebujejo enostavne, enodimenzionalne modele. To poskuša vpeljati model SIMPEL, ki je razmeroma lahko osvojljiv ter prijazen uporabniku.

Namen naloge je predstaviti model SIMPEL, njegove delovne liste in njihovo uporabo. V nalogi so podrobneje razložene tudi metode in enačbe z razlago parametrov, ki jih model uporablja za izračun posameznih členov vodne bilance. V praktičnem delu naloge je predstavljen primer izračuna členov vodne bilance za porečje Tolminke. Narejena je primerjava modeliranih in merjenih vrednosti površinskega odtoka za eno 'mokro' (2009) in eno 'suho' leto (2011). Posebej je narejena tudi analiza in primerjava izračunanih vrednosti potencialne evapotranspiracije po različnih metodah. Ocenili smo tudi učinkovitost modela s pomočjo koeficienta Nash-Sutcliffe.

## 2 VODNA BILANCA

Z vodno bilanco ocenjujemo količino vode na izbranem območju v izbranem časovnem obdobju. Pri tem moramo upoštevati vse dotoke in odtoke ter spremembe zalog. Za model vedra ali posode, kjer lahko dotok in odtok preprosto izmerimo, izračun bilance ni zelo zahteven. Pri bilanci malega vodnega kroga nam padavine predstavljajo dotok, izhlapevanje pa odtok (Ritter, 2006, cit. po Bat et al., 2008). Kompleksnejši in bolj zapleten je izračun vodne bilance posameznega porečja. Le tega vedno vzamemo kot poenostavljen matematičen model dejanskih razmer, kjer poskušamo zajeti vse pomembne elemente sistema ter njihovo interakcijo (Bat et al., 2008).

### 2.1 Enačba vodne bilance

Osnovna enačba vodne bilance, ki opisuje izmenjavo vode med ozračjem in zemeljskim površjem (Bat et al., 2008):

$$P = Q + I + dS, \quad (1)$$

kjer je:

P	padavine,
Q	odtok,
I	izhlapevanje,
dS	sprememba zalog.

Analizo vodne bilance nam olajšajo tista porečja, za katera lahko pretok izmerimo na iztočnih profilih. Za njen izračun si je smiselno izbrati povirna hidrometrična zaledja, kjer nimamo problemov z dotoki iz drugih zaledij. Presežek padavin, ki se ne ujame v proces evapotranspiracije, odteče in ga lahko na vodomerni postaji izmerimo kot odtok. In ta pretok nam predstavlja že kar neto odtok ( $Q_n$ ) (Bat et al., 2008).

$$Q = Q_n. \quad (2)$$

Padavine in izhlapevanje navadno podajamo v [mm] ozirom [mm/dan], pretoke pa v [ $m^3/s$ ]. Da jih med seboj lahko uspešno primerjamo, potrebujemo podatek o površini obravnavanega porečja. Pri usklajevanju členov vodne bilance – padavin ( $P$ ), izhlapevanja ( $I$ ) in odtoka ( $Q$ ), primerjamo odtoke, ki so preračunani iz pretokov vodomernih postaj ( $Q$ ), z odtoki ( $Q_b$ ), ki jih izračunamo z bilančno enačbo (Bat et al., 2008):

$$Q_b = Q = P - I. \quad (3)$$

### 2.2 Vplivni dejavniki

Glavni vplivni dejavniki na vodno bilanco so:

- lega in relief,
- podnebje,
- kamnine in prsti,
- rastlinstvo,
- antropogeni dejavniki.

## 2.3 Členi vodne bilance

Osnovni členi vodne bilance so prikazani na sliki 1.



Slika 1: Poenostavljen model vodnega kroga

### 2.3.1 Padavine

Padavine so atmosferska voda, ki po procesu kondenzacije in pod vplivom težnosti pade proti tlem. V Sloveniji jih merimo s Hellmannovim ombrometrom in različnimi tipi ombrografov. Na razporeditev padavin v Sloveniji najbolj vpliva razgibanost terena in bližina morja. To se jasno vidi tudi iz podatkov, saj največ padavin (v povprečju 2600 mm letno) pade na jugozahodni strani Julijskih Alp, na najvišjih grebenih celo več kot 3200 mm na leto (Bat et al., 2008).

### 2.3.2 Evapotranspiracija

Izhlapevanje ali evaporacija je prehajanje vode iz tekočega agregatnega stanja v vodno paro in poteka s površja vode, tal in rastlin. Transpiracija pa je proces, pri katerem se voda, ki je v proces vstopila preko fiziološkega procesa rastlin, izloči v ozračje (Brilly in Šraj, 2005). Oba izraza skupaj poimenujemo evapotranspiracija. Le ta je pomemben člen vodnih izgub pri računanju vodne bilance. Prav tako je pomemben člen vodnega kroga in pomemben podatek predvsem za kmetijska zemljišča. Meritve evapotranspiracije v Sloveniji izvajamo le na nekaterih klimatoloških postajah. Vendar pa ti podatki, tako kot meteorološki parametri, veljajo le za posamezna območja, kjer so meritve izvedene. Zato za računanje potencialne evapotranspiracije (ETp) uporabljamo različne empirične enačbe (Cesar, 2010).

### 2.3.3 Pretoki

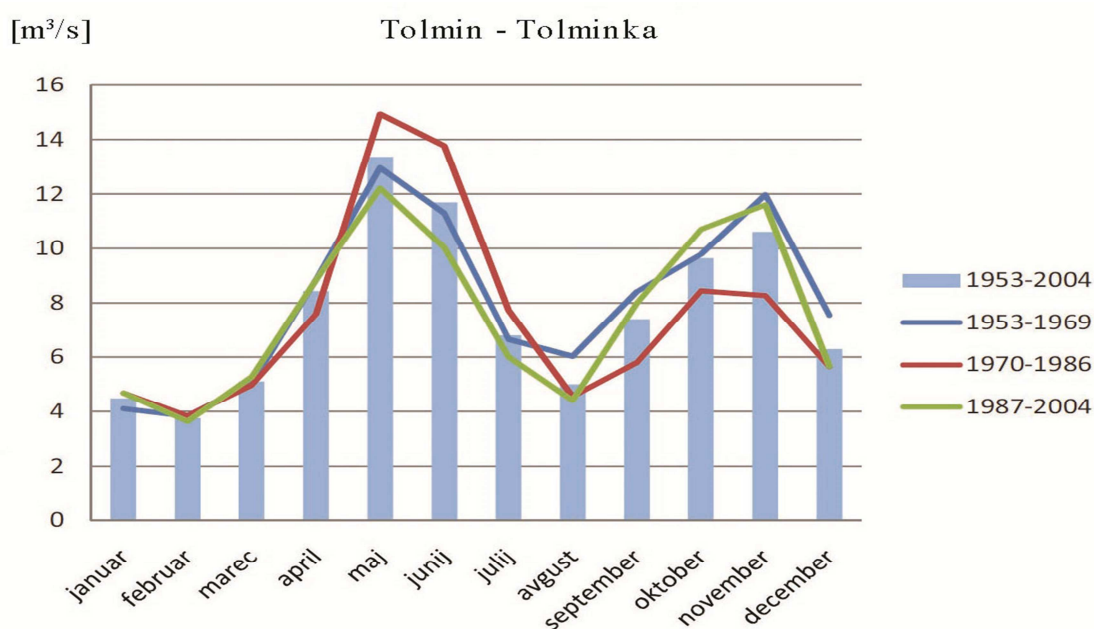
Z izrazom »odtok« opisujemo ostanek padavin, ki se ne ujame v proces evapotranspiracije. Z njim poimenujemo različne vrste odtekanja vode od površinskega odtoka, pretoka po zemljini, do tokov podzemne vode in vodotokov. Če je tega odtoka dovolj, se zbere v vodotokih, na katerih lahko merimo pretok. Običajno je pretok najnatančneje izmerjen element vodnega kroga (Bat et al., 2008).

### 2.3.4 Pretočni režimi

Pretočni režim nam pokaže obnašanje pretoka reke preko leta (slika 2). Najpomembnejši dejavniki, ki vplivajo na pretočni režim porečja so: podnebje, relief, kamninska podlaga, prst, rastlinstvo in človek. V Sloveniji s svojim vplivom prevladuje podnebje, saj so pretočni režimi odvisni predvsem od letne razporeditve padavin, temperature ter trajanja snežne odeje.

V Sloveniji poznamo pet tipov pretočnih režimov (Frantar in Hrvatin, 2008, cit. po Bat et al., 2008):

- alpski snežno-dežni režim,
- alpski dežno-snežni režim,
- dinarsko dežno-snežni režim,
- panonski dežno-snežni režim,
- sredozemski dežni režim.



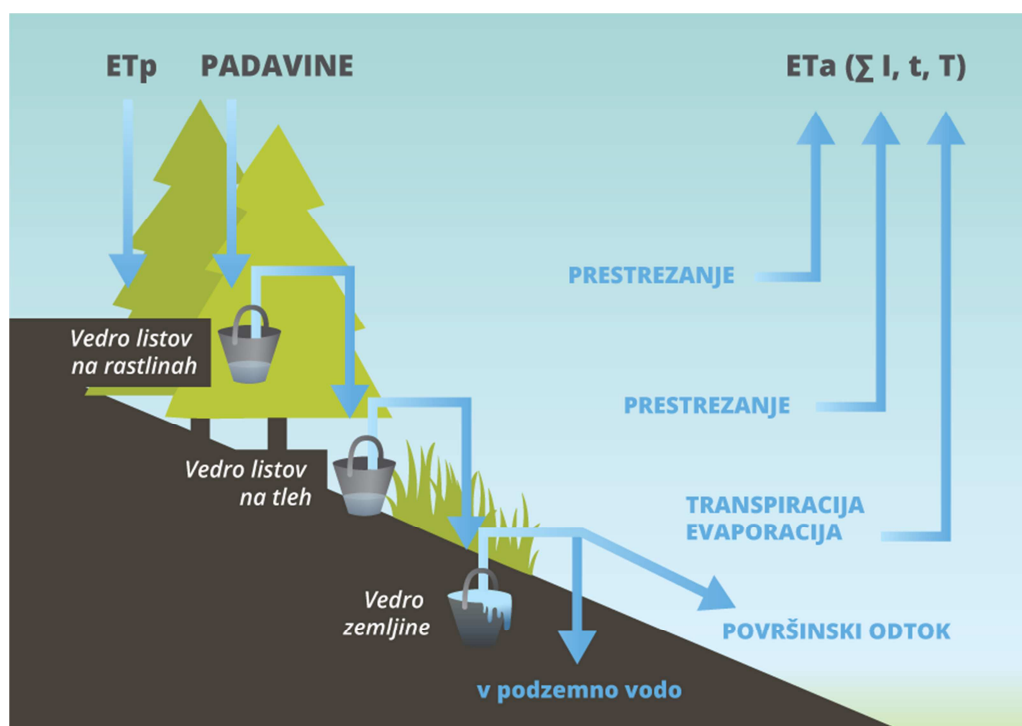
Slika 2: Srednje mesečne vrednosti pretoka na postaji Tolmin za obdobje 1953-2004 (Podgornik, 2011)

### 3 MODEL SIMPEL

#### 3.1 Osnove

Najenostavnejša metoda za računanje vodne bilance območja je z izračunom razlike med količino padavin in potencialno evapotranspiracijo. Tako izračunamo grob približek, brez da bi kaj dosti povedali o dejanski evapotranspiraciji ter zadrževalnih lastnostih zemljine. Natančnejše rezultate lahko dosežemo z uporabo modelov, ki temeljijo na Darcy Richards-ovi enačbi in metodah, ki potrebujejo večje število dejanskih meritev. Ti modeli so natančnejši, vendar zahtevajo veliko znanja in podatkov. Praktična rešitev je lahko uporaba tako imenovanega modela z vedri, ki jih uporabljamo tudi za modele velikih razsežnosti, kot so recimo globalni klimatski modeli. S temi simuliramo vsebnost vode v zemljini, na mestih brez podzemnih voda in v koreninski coni, z enostavnimi in lahko dostopnimi podatki. Model vode v zemljini računa vodno bilanco v različnih plasteh zemljine, ki jih upoštevamo kot samostojna vedra. Pri najpreprostejši verziji upoštevamo samo plast zemljine s koreninami. Hidrološki modeli navadno delujejo s prestreznimi vedri (listi na rastlinah, listi na tleh, ena ali več plasti zemljine in zajetje podzemne vode) (Hörmann, 2012).

Kot je prikazano na sliki 3, nam sistem veder predstavljajo vedro listov na rastlinah, vedro listov na tleh ter vedro zemljine. Vhodne podatke nam predstavljajo padavine, potencialna evapotranspiracija, indeks listne površine (LAI, angl. orig. leaf area index) [ $m^2/m^2$ ] in fizikalni parametri zemljine. Rezultati so prikazani kot pretok med posodami, dejanska evapotranspiracija (kot seštevek prestrezanja, evaporacije in transpiracije), pronicanje v podzemno vodo ter površinski odtok (Hörmann, 2012).



Slika 3: Struktura modela SIMPEL (prirejeno po Hörmann, 2012)

Modela listov na rastlinah in listov na tleh upoštevamo kot preprosti pretočni vedri. Izračunamo ju tako, da za njiju določimo dejansko kapaciteto. Dodajamo padavine in odvezujemo evapotranspiracijo. Ko je kapaciteta zapolnjena, prične višek odtekati v naslednjo vedro (npr. iz listov na rastlinah na liste na tleh). Slaba stran takega preprostega pristopa je, da se pretok pojavi šele, ko je zapolnjena kapaciteta predhodnega vedra. Tako se lahko v poletnih mesecih zgodi, da pretoka v podtalnico ni, kljub temu, da je vedro, ki nam predstavlja vodo v zemljini, skoraj popolnoma zapolnjeno. Da bi v takšnih primerih prišli do realnejših rezultatov, lahko uporabimo nelinearno funkcijo za ustvarjanje toka iz koreninske cone, ki je odvisen od količine vode v zemljini ne glede na njeno nasičenost. Za izračun pretoka v zemeljski posodi je v tem modelu izbran pristop po Glugli (Hörmann, 2012).

### 3.2 Opis modela

Program SIMPEL (Hörmann, 2012) je napisan v delovnem okolju Microsoft Excel. Datoteke so razdeljene na vhodne podatke, na tiste za izračun evapotranspiracije in na model vode v zemljini, ki nam omogoča različne kombinacije vhodnih podatkov. Vhodni podatki se nahajajo v datoteki `input_evaporation.xls` (časovne vrste in statični začetni podatki). Modeli za izračun evapotranspiracije se nahajajo v datoteki `toolbox_evaporation.xls`. Model pretočnih veder pa se nahaja v datoteki `simpel2_e.xls`.

#### 3.2.1 Začetni podatki za izračun evapotranspiracije

Vse začetne podatke za izračun ETp imamo zbrane v datoteki `input_evaporation.xls`. Različne metode uporabljajo različne podatke.

Datoteka vsebuje:

- časovno vrsto LAI,
- statične parametre (zemljepisna širina itd.),
- rastlinske parametre za Penman/Monteith (metodi EPIC in iglasti gozd),
- časovno vrsto (dnevni klimatski podatki),
- povprečne mesečne temperature za metodo Thornthwaite.

V časovno vrsto vpišemo:

$T$	povprečno dnevno temperaturo zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ],
$SD$	trajanje sončnega obsevanja [h],
$R_g$	globalno radiacijo [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ],
$R_f$	povprečno vlažnost zraka [%],
$U$	povprečno hitrost vetra [ $\text{m}/\text{s}$ ],
$T_{14}$	temperaturo zraka ob 14h [ $^{\circ}\text{C}$ ] (samo za Haude-ovo enačbo),
$R_{f14}$	relativno vlažnost zraka ob 14h [%] (samo za Haude-ovo enačbo).

Časovna vrsta indeksa listne površine (LAI) ima lahko poljubno število merjenj in razmikov med njimi. Podatki so nato z linerano interpolacijo pretvorjeni v dnevne vrednosti. Statični parametri so uporabljeni za izračun globalne radiacije (največje sončno obsevanje za neto radiacijo). V primeru, da nam podatki za globalno radiacijo niso dostopni, nam program le-to izračuna na podlagi zemljepisne širine ter dneva v letu. Vsi ostali podatki se nanašajo na Penman/Monteith-ovo metodo in so privzeti iz EPIC (ang. *The Environmental Policy Integrated Climate*) dokumentacije (Hörmann, 2012).

### 3.2.2 Fizikalni podatki o zemljini

Podatke za zemljino imamo podane ločeno, da lahko računamo različne profile zemljin z enako evapotranspiracijo. Podatke vnašamo v delovnem listu `simpel2_e.xls`. Pridobimo jih lahko z laboratorijskimi raziskavami ali jih poiščemo v referenčnih knjigah ali na kartah (Hörmann, 2012).

### 3.3 Metode izhlapevanja

Vse metode za izračun potencialne evapotranspiracije imamo zbrane v datoteki `toolbox_evaporaton.xls` (slika 4). Ločene so zato, da v primeru spreminjanja ali testiranja enačb za izračun ETp ne spreminjamo tudi začetnih podatkov. Potrebno je samo določiti pravilno povezavo med datotekami.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Date	T	SD	Rg	RF	U	ES	S-Deficit	g(t)	evap.-enthalpy	Penman						
2	1.1.2009	-2,70	0,30	242,2	91,0	0,30	5,01	0,45	0,37		250	0,21					
3	2.1.2009	-7,50	6,95	722,1	92,0	0,30	3,49	0,28	0,29		252	0,51					
4	3.1.2009	-9,30	7,30	750,2	90,0	1,60	3,03	0,30	0,26		252	0,49					
5	4.1.2009	-9,60	7,40	780,9	88,0	0,60	2,98	0,36	0,25		252	0,48					
6	5.1.2009	-6,60	3,35	469,1	52,0	0,50	3,74	1,79	0,30		251	0,38					
7	6.1.2009	-9,80	2,05	376,4	91,0	1,60	2,91	0,26	0,25		252	0,23					
8	7.1.2009	-3,30	2,30	396,9	94,0	0,30	4,79	0,29	0,36		251	0,35					
9	8.1.2009	-9,30	6,25	690,5	89,0	1,20	3,03	0,33	0,26		252	0,44					
10	9.1.2009	-10,10	7,60	794,4	82,0	0,30	2,85	0,51	0,24		252	0,48					
11	10.1.2009	-5,40	7,55	795,1	44,0	0,30	4,09	2,29	0,32		251	0,72					
12	11.1.2009	-3,70	7,30	781,1	35,0	0,20	4,65	3,02	0,35		251	0,77					
13	12.1.2009	-3,80	7,60	808,4	50,0	0,10	4,62	2,31	0,35		251	0,76					
14	13.1.2009	-0,10	6,60	737,8	58,0	0,20	6,07	2,55	0,41		250	0,80					
15	14.1.2009	-6,40	0,00	240,3	92,0	0,40	3,79	0,30	0,31		251	0,18					
16	15.1.2009	-3,90	0,00	242,3	93,0	0,40	4,58	0,32	0,35		251	0,20					
17	16.1.2009	-3,90	7,45	818,3	94,0	0,10	4,58	0,28	0,35		251	0,69					
18	17.1.2009	-3,00	3,15	490,8	89,0	0,50	4,90	0,54	0,36		251	0,44					
19	18.1.2009	0,70	1,00	326,9	93,0	0,20	6,43	0,45	0,42		250	0,33					
20											940	0,40					

Slika 4: Prikaz delovnega lista v datoteki `toolbox_evaporation.xls`

Datoteka `toolbox_evaporation.xls` vsebuje sledeče metode za izračun evapotranspiracije (ETp): Haude, Thornthwaite, Blaney/Criddle, Turc, Penman (poenostavljena po Weldingu), Makkink, Wendling za obalna območja, Penman/Monthieith za iglaste gozdove, Penman/Monthieith – EPIC (Hörmann, 2012), ki so opisane v nadaljevanju naloge.

FAO (ang. *Food and Agriculture Organization of United Nations*) metoda v originalni verziji ni vključena. Lahko jo dobimo kot dodatno datoteko, vendar ni predstavljena v okviru te naloge.

V tej datoteki dobimo izračun LAI po linearni interpolaciji, glede na število podanih merjenj. Od tu nam model nato črpa potrebne podatke o LAI za različne metode.

#### 3.3.1 Začasne spremenljivke

Veliko enačb za izračun ETp je odvisnih od istih začetnih podatkov in uporablja enake parametre. Večinoma gre za podatke o radiaciji in vlažnosti. Te parametre in nekatere vmesne korake imamo zbrane v datoteki `toolbox_evaporation.xls` na delovnem listu `temp_vars`.

##### 3.3.1.1 Trajanje sončnega obsevanja in globalna radiacija

Proces evapotranspiracije je določen s količino energije, ki je potrebna za spreminjanje vode iz tekočega v plinasto stanje. Sončno obsevanje je največji vir te energije. Količina sončnega sevanja, na določenem območju, je odvisna od lokacije in letnega časa (Žugelj, 2012). Trajanje sočnega obsevanja in globalno radiacijo lahko dobimo z meritvami ali z izračunom. Potrebujemo Julijanski dan (številka dneva v letu 1-365), ki se uporabi za izračun spremenljivke, potrebne za izračun astronomsko možnega časa sončnega obsevanja in radiacije, glede na geografski položaj in dan v letu (Hörmann, 2012):

$$S_o = 12,3 + \sin(\zeta) \cdot (4,3 + (\varphi - 51) \cdot 6), \quad (4)$$

$$\zeta = 0,0172 \cdot JT \cdot 1,39, \quad (5)$$

$$R_o = 245 \cdot (9,9 + 7,08 \cdot \sin(\zeta) + 0,18 \cdot (\varphi - 51) \cdot (\sin(\zeta) - 1)), \quad (6)$$

kjer je:

$R_o$  izven-zemeljska radiacija [ $J/cm^2$ ],

$S_o$  astronomsko možno trajanje sončnega obsevanja [h],

$S_d$  izmerjeno trajanje sončnega obsevanja [h],

$JT$  Julijanski dan [1-365],

$\Phi$  zemljepisna širina [°].

Če podatek o globalni radiaciji ni na voljo, ga lahko izračunamo iz izmerjenega trajanja sončnega obsevanja. Priporočljivo je, da uporabljamo podatke, pridobljene z meritvami. Če ti niso na razpolago, uporabimo izračunane.

### 3.3.1.2 Vlaga

Izračun začasnih spremenljivk vlažnosti je odvisen od relativne vlažnosti in povprečne temperature zraka. Nasičen zračni tlak [hPa] je izračunan po enačbi (Hörmann, 2012):

$$e_s = 6,11 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T}}, \quad (7)$$

kjer je:

$T$  povprečna dnevna temperatura zraka [°C].

Parni tlak pa izračunamo iz relativne vlage:

$$S\text{-Deficit} = e_s \cdot \left(1 - \frac{Rf}{100}\right), \quad (8)$$

kjer je:

$Rf$  povprečna vlažnost zraka [%].

Za različne verzije Penman-ove enačbe potrebujemo brezdimenzionalno funkcijo temperature:

$$g(t) = 2,3 \cdot \frac{(T+22)}{(T+123)}, \quad (9)$$

kjer je:

$T$  povprečna dnevna temperatura zraka [°C].

Specifično entalpijo evaporacije izračunamo kot sevalno energijo, potrebno, da izhlapi 1mm vode:

$$J = 249,8 - 0,242 \cdot T, \quad (10)$$

kjer je:

$T$  povprečna dnevna temperatura zraka [°C].

### 3.3.2 Transpiracija rastlin

Večina enačb za izračun evapotranspiracije je osnovanih za standardno rezano in dobro zalito travo. Za druge vrste rastlin moramo koeficient rastline primerno prilagoditi. Samo pri metodah po Haude-ju



in Penman/Monteithu lahko upoštevamo tudi druge rastline. V datoteki toolbox\_evaporation.xls se nahajata dva delovna lista za pretvorbo ET<sub>p</sub> z uporabo koeficientov rastlin. Tu lahko dobimo podatke za izračun ET<sub>p</sub> za posamezne rastline (Hörmann, 2012).

### 3.3.3 Thornthwaite-ova metoda

To je stara metoda, ki je bila v praksi precej razširjena. Uporablja se za oceno mesečnih vrednosti evapotranspiracije. Za njen izračun potrebujemo vrednost srednje mesečne temperature in seštevek števila ur sončnega sevanja za določen mesec. Znano je, da metoda za hladnejša območja in tudi za vlažnejša območja podaja previsoke rezultate, za sušna območja pa zna podati prenizke rezultate. Rezultate je priporočljivo primerjati še z vrednostmi drugih metod (Cesar in Šraj, 2012).

Račun v modelu je razdeljen na dva delovna lista:

Račun ET<sub>p</sub> (Hörmann, 2012):

$$ETp = 0,533 \cdot \left(\frac{S_0}{12}\right) \cdot \left(\frac{10 \cdot T}{J}\right)^a, \quad (11)$$

ter račun koeficientov:

$$J = \sum_{Dec}^{Jan} \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}, \quad (12)$$

kjer je:

$S_0$	astronomsko možno trajanje sončnega obsevanja [h],
$T$	povprečna mesečna temperatura zraka [°C],
$J$	koeficient.

Koeficienti so izračunani na osnovi povprečnih mesečnih vrednosti. Ko so temperature negativne, so negativne tudi vrednosti ET<sub>p</sub>, ki pa nam jih program avtomatsko nastavi na 0.

### 3.3.4 Turc-ova metoda

To je ena izmed najstarejših in najpreprostejših metod za oceno dnevne evapotranspiracije. Najbolje se obnese v vlažnem okolju (Cesar, 2010). Metoda se večinoma uporablja v Franciji in mediteranskih regijah. Globalno radiacijo izračunamo glede na trajanje sončnega obsevanja po že prej predstavljeni metodi ali pa vstavimo izmerjen podatek (Hörmann, 2012):

$$ETp = 0,0031 \cdot C \cdot (R_g + 209) \frac{T}{(T+15)}, \quad (13)$$

pri čemer upoštevamo:

$$\text{če je } Rf < 50 \rightarrow C = 1 + \frac{(50-Rf)}{70}, \quad (14)$$

$$\text{če je } Rf \geq 50 \rightarrow C = 1, \quad (15)$$

kjer je:

$R_g$	globalna radiacija [ $J/cm^2$ ],
$Rf$	povprečna vlažnost zraka [%],
$T$	povprečna dnevna temperatura zraka [°C],
$C$	koeficient.

### 2.3.5 Blaney/Criddle-ova metoda

Ta metoda se dobro obnese v Nemčiji, kjer se najpogosteje uporablja pri upravljanju namakalnih sistemov. Zelo pogosto jo uporabljajo tudi v zahodnih predelih Združenih držav Amerike.  $ET_p$  dobimo iz temperature in maksimalnega sončnega obsevanja ob upoštevanju geografske lege in trajanja sončnega obsevanja (Cesar, 2010). V modelu SIMPEL se uporablja modificirano verzijo po Schrodter-ju (Hörmann, 2012):

$$ET_p = (8,128 + 0,475 \cdot T) \cdot \frac{S_d \cdot 100}{S_{year}}, \quad (16)$$

kjer je:

- $S_d$  izračunano trajanje sončnega obsevanja [h],
- $S_{year}$  izračunano letno trajanje sončnega obsevanja [h],
- $T$  povprečna dnevna temperatura zraka [°C].

### 3.3.6 Makkink-ova metoda

Makkinkova metoda izvira iz Nizozemske in tako kot Wendling-ova metoda predstavlja modificirano Penmanovo enačbo (Hörmann, 2012):

$$ET_p = g(t) \cdot \left( C_1 \cdot \frac{R_g}{L} + C_2 \right), \quad (17)$$

kjer je:

- $R_g$  globalna radiacija [ $J/cm^2$ ],
- $L$  specifična entalpija izhlapevanja,
- $g(t)$  nedimenzionalna funkcija temperature,
- $C_1$  koeficient po Penmanu oz. prevzet iz DVWK (nem. *Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau*),
- $C_2$  koeficient po Penmanu oz. prevzet iz DVWK.

### 2.3.7 Wendling-ova metoda za obalna območja

Ta metoda vpelje obalni koeficient in je narejena specifično za obalna območja (Hörmann, 2012):

$$ET_p = \frac{(R_g + 93 \cdot f_k) \cdot (T + 22)}{150 \cdot (T + 123)}, \quad (18)$$

kjer je:

- $R_g$  globalna radiacija [ $J/cm^2$ ],
- $T$  povprečna dnevna temperatura zraka [°C],
- $f_k$  obalni koeficient.

### 3.3.8 Penman-ova metoda (modificirana po Wendling-u)

Penman-ova metoda je najbolj znana metoda. V modelu SIMPEL uporabljamo malce poenostavljeno verzijo po Wendlingu. Podobna je metodi, ki jo priporoča FAO (Hörmann, 2012):

$$ET_p = g(T) \cdot \left( \frac{0,6 \cdot R_g}{L} + 0,66 \cdot (1 + 1,08 \cdot U) \cdot \left( 1 - \frac{R_f}{100} \right) \cdot S_d \right), \quad (19)$$

kjer je:

- $R_g$  globalna radiacija [ $J/cm^2$ ],
- $L$  specifična entalpija izhlapevanja,

- $g(t)$  nedimenzionalna funkcija temperature,  
 $Sd$  trajanje sončnega obsevanja [h],  
 $Rf$  povprečna vlažnost zraka [%],  
 $U$  povprečna hitrost vetra [m/s].

### 3.3.9 Metoda Penman/Monteith za iglaste gozdove

Ta metoda se precej razlikuje od ostalih. V programu lahko to opazimo tudi po tem, da je za njo potrebno precej dodatnega preračunavanja različnih količin. Povzeta je po Jochen Schmitu posebej za iglaste gozdove (Hörmann, 2012):

$$rf = \frac{Rf}{100}, \quad (20)$$

$$rfhPa = e_s \cdot rf, \quad (21)$$

$$Srefl = alb \cdot R_g, \quad (22)$$

$$alb = 1 - AB, \quad (23)$$

$$temp = b \cdot (T + 273,15)^4, \quad (24)$$

$$temp2 = 0,34 - 0,044 \cdot \sqrt{(rf \cdot e_s)}, \quad (25)$$

$$rnd = Srefl - temp \cdot (0,1 + 0,9 \cdot (1,82 \cdot \frac{R_g}{R_0} - 0,35)) \cdot temp2, \quad (26)$$

$$rndm = \frac{rnd}{8,64}, \quad (27)$$

$$rnx = \frac{(Srefl - temp \cdot (0,1 + 0,9 \cdot \frac{R_g}{R_0}) \cdot temp2)}{8,64}, \quad (28)$$

$$rnh = 0,87 \cdot R_g - 27,1, \quad (29)$$

$$de = (1 - rf) \cdot e_s, \quad (30)$$

$$rc_{act} = rc \cdot \frac{(1 - 0,3 \cdot \cos(2 \cdot 3,14 \cdot \frac{(JT - 222)}{365}))}{(1 - 0,045 \cdot ((1 - rf) \cdot e_s))}, \quad (31)$$

$$swds_{act} = e_s \cdot \frac{4284}{(243,12 + T)^2}, \quad (32)$$

$$pl_{act} = -4,8178 \cdot T + 1289,3, \quad (33)$$

$$lvwe = \frac{(swds_{act} \cdot rndm) + (pl_{act} \cdot cp \cdot (\frac{1}{ra} \cdot de))}{swds_{act} + pk \cdot (1 + \frac{rc_{act}}{ra})}, \quad (34)$$

$$ETp = ut = \frac{lvwe}{(28,9 - 0,028 \cdot T)}, \quad (35)$$

kjer je:

- $Rf$  povprečna vlažnost zraka [%],  
 $e_s$  nasičen zračni tlak [hPa],  
 $AB$  albedo (vzet iz input\_evaporation.xls delovni list static input parameter),  
 $R_g$  globalna radiacija [ $J/cm^2$ ],  
 $R_o$  nezemeljska radiacija [ $J/cm^2$ ],  
 $b$  Boltzmanova konstanta,  
 $T$  povprečna dnevna temperatura zraka [°C],  
 $e_s$  nasičen zračni tlak [hPa],  
 $JT$  Julijanski dan [1-365],  
 $pk$  konstanta [hPa/K],  
 $cp$  konstanta [ $J/(g \cdot K)$ ].

### 3.3.10 Metoda Penman/Monteith – EPIC

Metoda je privzeta iz modela EPIC. EPIC je model za pomoč pri vzgoji rastlin. Razvit je bil z namenom ocenjevanja rodovitnosti zemlje pod vplivom erozije in simuliranja do osemdesetih različnih vrst rastlin v enem modelu ob uporabi pripadajočih parametrov za vsako rastlino posebej. Ima mnogo nastavitvev, in sicer za kolobarjenje pridelkov in drugih vegetativnih sistemov, sistemov za pridelovanje in drugih obdelovalnih strategij. Predvidi vplive odločitev o načinu upravljanja zemljišča, vode, gnojil, pesticidov in njihovem skupnem vplivu na homogene zemljine (Blackland, 2016).

V modelu SIMPEL je njegova velika uporabnost v tem, da vsebuje podatke za veliko število poljedelskih kultur. V modelu so podani parametri za pokošeno travo, ki je običajno osnova za računanje ETp. Nato so tu še poljski pridelki, kot so žito, rž, oves, ječmen, sladka pesa, krompir in repa. Uporabniki lahko vnašamo podatke za poljubne rastline, vendar moramo biti pri uporabi pazljivi na pravilno povezovanje podatkov in datotek. Metoda je v program SIMPEL dodana tako, da lahko sledimo vsaki enačbi posebej (Hörmann, 2012).

Spremembe in poenostavitve, ki se pojavijo:

- atmosferski tlak in vse fiziometrične konstante so podane s konstanto,
- albedo za pokrito zemljo ni izračunan glede na biomaso, temveč je izpeljan iz LAI,

$$VPD = e_a - e_d, \quad (36)$$

$$\delta = \left( \frac{e_a}{t+273} \right) \cdot \left( \frac{6791}{T+273} \right) - 5,03, \quad (37)$$

$$\gamma = 6,6 \cdot 10^{-4} \cdot PB, \quad (38)$$

$$G = 0,12 \cdot \left( T_i - \frac{T_{i-1} + T_{i-2} + T_{i-3}}{3} \right), \quad (39)$$

$$FV = 1 - (b_v \cdot (VPD - VPD_i)) \geq 0,1, \quad (40)$$

$$g_0^* = g_0 \cdot FV, \quad (41)$$

$$SC = \min\left(1; \frac{LAI}{LAI_{si}}\right), \quad (42)$$

$$z_0 = 0,131 \cdot CHT^{0,997}, \quad (43)$$

$$z_d = 0,702 \cdot CHT^{0,979}, \quad (44)$$

$$AR = \frac{6,25 \cdot \ln\left(\frac{10-z_d}{z_0}\right)^2}{V}, \quad (45)$$

$$AR = \frac{350}{V}, \quad (46)$$

$$CR = \frac{p_1}{LAI \cdot g_0^* \cdot (1,4 - (0,00121 \cdot CO_2))}, \quad (47)$$

$$HV = 2,5 - (0,0022 \cdot T), \quad (48)$$

$$AB = AB_p \cdot (1 - SC) + AB_s \cdot SC, \quad (49)$$

$$RAB = 4,8 \cdot 10^{-9} \cdot 0,34 - (0,14 \cdot \sqrt{e_d}) \cdot (T + 273)^4, \quad (50)$$

$$h_0 = RA \cdot (1 - AB) - RAB \cdot \left( \frac{0,9 \cdot RA}{RAMX} + 0,1 \right), \quad (51)$$

$$E_p = \frac{\delta \cdot (h_0 - G) + \frac{87,7 \cdot AD \cdot VPD}{AR}}{HV \cdot \left( \delta + \gamma \cdot \left( 1 + \frac{CR}{AR} \right) \right)}, \quad (52)$$

kjer je:

- $h_0$  neto radiacija ( $MJ/m^2$ ),
- $CO_2$  prisotnost ogljikovega dioksida v atmosferi [ppm] (konstanta, začetni podatki),
- $e_a$  zasičen parni tlak [%] (časovna vrsta),
- $e_d$  parni tlak [%] (časovna vrsta),

$g_0^*$	konduktivnost listov (korigirana s FV) [m/s],
$z_0$	sprememba višine rastlin,
$z_d$	parameter hrapavosti površja,
$g_0$	konduktivnost listov [m/s],
$p1$	parameter z vrednostjo med 1 in 2, za izračun odpornosti kultur (koeficient za prilagoditev, katerega izvor prav tako ni dokumentiran),
$SC$	indeks pokritosti zemlje (za razliko od modela izračunan iz LAI),
$\gamma$	fiziometrična konstanta (v modelu je izračunana iz atmosferskega tlaka, tukaj pa nastavljena kot konstanta z atmosferskim tlakom),
$\delta$	naklon krivulje zasičenega parnega tlaka ,
$AB$	albedo,
$ABp$	albedo listov,
$ABs$	albedo zemlje,
$AD$	gostota zraka v [ $g/m^3$ ],
$AR$	zračni upor pokrite (46) in nepokrite (47) zemljine,
$CHT$	višina rastlin [m] (konstanta),
$CR$	upornost rastlinskega pokrova,
$ETp$	evapotranspiracija [mm],
$FV$	faktor popravka padca parnega tlaka VPD,
$G$	sprememba toplote zemlje (v modelu je nastavljena na 0),
$HV$	latentna toplota izhlapevanja [ $MJ/kg$ ],
$LAI$	indeks listne površine [ $m^2/m^2$ ],
$LAI_{si}$	LAI, ko je pokritost = 1 (konstanta) (Ta vrednost je potrebna za izračun albeda površine. Model EPIC dobi albedo iz izračuna biomase. Ker tega podatka v modelu SIMPEL ni, je vrednost ocenjena iz LAI.),
$PB$	barometrični tlak [ $kPa$ ] (konstanta),
$RA$	sončna radiacija [ $MJ/m^3$ ] (časovna vrsta: izmerjena ali izračunana iz trajanja sončnega obsevanja),
$RAB$	neto izhodno dolgovalovno valovanje [ $MJ/m^2$ ],
$RAMXN$	največja možna sončna radiacija (časovna vrsta, izračunana v 2.2.1.1),
$T$	povprečna dnevna temperatura zraka [°C],
$U$	povprečna dnevna hitrost vetra v [m/s] na višini 10 m (časovna vrsta, dobljena iz hitrosti na višini 2m),
$VPD$	padec parnega tlaka[kPa],
$VPDt$	mejni padec parnega tlaka [kPa] (povzet po EPIC),
$bv$	koeficient za prilagajanje (v modelu SIMPEL je prevzet po parametrih iz EPIC-a, kjer pa izvor ni dokumentiran).

### 3.3.11 Haude-va metoda

Ta metoda potrebuje drugačne začetne podatke kot ostale (Hörmann, 2012), in sicer:

$$e_{s14} = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_{14}}{237,3 + T_{14}}}, \quad (53)$$

$$ET_p = a \cdot e_{s14} \left(1 - \frac{RF_{14}}{100}\right), \quad (54)$$

kjer je:

$Rf_{14}$  relativna vlažnost ob 14h [%],

- $T_{14}$  temperatura ob 14h [°C],  
 $a$  Haude-ov koeficient, odvisen od meseca in vrste rastline.

Koeficiente za nekatere rastline najdemo v delovnem listu toolbox\_evapotration.xls, Haude v tabeli v stolpcih od I3 do N15.

### 3.4 Model vode v zemljini

Model vode v zemljini je prikazan v datoteki simpel2\_e.xls (slika 5).

Osnovni koraki modela so (Hörmann, 2012):

- padavine padejo na liste na rastlinah;
- ko se konča prestrezanje in se vedro listov na rastlinah napolni, prične voda odtekati v vedro listov na tleh;
- ko se konča prestrezanje listov na tleh in se vedro listov na tleh napolni, prične voda odtekati v zemljino;
- kapaciteta zemljine je izračunana iz fizikalnih podatkov o zemljini;
- površinski odtok je izračunan s pomočjo Gluglove metode za pretok po zemljini.

Slika 5: Prikaz delovnega lista v datoteki simpel2\_e.xls

#### 3.4.1 Model vedra listov za prestrezanje padavin

Prestrezanje in izhlapevanje padavin s površin listov je odvisno od razvitosti listov. Pridobiti moramo podatke o tem, koliko vode je sposobna zadržati vegetacija. To ponovadi izračunamo iz indeksa listne površine (LAI). V modelu to izračunamo v datoteki toolbox\_evaporation.xls na delovnem listu LAI\_time\_series. Le ta je izračunana na podlagi časovne vrste, podane v datoteki input\_evaporation.xls, delovni list LAI\_time\_series. Potrebujemo vsaj podatek ob pričetku rasti ter podatek ob največjem možnem LAI oziroma ob času košnje, žetve ali sečnje. Dnevno vrednost LAI nato izračunamo s pomočjo linearne interpolacije (Hörmann, 2012).

Prestrezanje listov:

$$I_{cl} = \min(LAI) + LAI \cdot \frac{I_{cl,max}}{maxLAI}, \quad (55)$$

$$ET_{i_l} = \min \left\{ \begin{matrix} ETP_i \\ I_{cl} \end{matrix} \right., \quad (56)$$

$$B_l = P - ET_{i_l}, \quad (57)$$

$$P_{rl} = \max \left\{ \begin{matrix} 0 \\ B_l \end{matrix} \right., \quad (58)$$

$$ET_{p_l} = ETP_i - (\min \left\{ \begin{matrix} 0 \\ B_l \end{matrix} \right\}) - ET_{i_l}, \quad (59)$$

kjer je:

$I_{cl}$	zmogljivost listov rastlin za prestrežanje padavin,
$I_{cl,max}$	največja kapaciteta listov rastlin za prestrežanje padavin,
$minLAI$	najmanjši LAI,
$maxLAI$	največji LAI,
$ETi_l$	količina prestreženih padavin listov na rastlinah,
$B_l$	bilanca listov na rastlinah,
$P_{rl}$	neprestrežene padavine,
$ETp_l$	ostanek ETp,
$ETp_i$	začetni podatki ETp (izračunani z eno izmed metod v

toolbox\_evaporation.xls).

### 3.4.2 Model vedra listja na tleh za prestrežanje padavin

Vrhni sloj zemljine se zaradi neposredne izpostavljenosti atmosferi suši hitreje kot sloji pod njim. Tu je zelo pomemben vrhni sloj v gozdu oziroma sloj listov na tleh oziroma stelje, ki ima povsem drugačno sestavo in teksturo kot običajna mineralna zemljina. Študije so pokazale, da je mogoče sušenje tega sloja oceniti z enostavnimi enačbami. V tem modelu sušenje kontroliramo z redukcijskim faktorjem stelje (ang. *litter reduction factor*), ki določi maksimalno evaporacijo, izraženo kot del količine vode, ki se ujame na listih. Faktor 2 pomeni, da lahko izhlapi največ polovica kapacitete listov (Hörmann, 2012).

$$ETi_t = \min \left\{ \begin{array}{l} ETp_l \\ \min \left\{ \begin{array}{l} I_{cl,max} \\ \frac{V_t + P_{rl}}{f_{rt}} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (60)$$

$$B_t = +V_t + ETp_l - ETi_t, \quad (61)$$

$$V_t = \begin{cases} B_t \geq I_{cl,max} \rightarrow I_{cl,max} \\ B_t < I_{cl,max} \rightarrow \max \{0, B_t\} \end{cases} \quad (62)$$

$$P_{rt} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ B_t - V_t \end{array} \right. \quad (63)$$

$$ETp_t = ETp_l - ETi_t, \quad (64)$$

kjer je:

$ETi_t$	količina prestreženih padavin listov na tleh,
$I_{cl,max}$	maksimalna kapaciteta listov na tleh za prestrežanje padavin,
$V_t$	količina vode v vedru listov na tleh,
$B_t$	bilanca vedra listov na tleh,
$P_{rt}$	preostali del padavin,
$ETp_t$	ostanek ETp,
$f_{rt}$	faktor redukcije.

### 3.4.3 Osnovni model vode v zemljini

Vodna nihanja so izračunana na podlagi klimatskih pogojev, potencialne evapotranspiracije in lastnosti zemljine. Rezultate in izračune imamo prikazane v datoteki *simpel2.xls* v delovnem listu *bucket\_model*. Osnovna spremenljivka pri modelu vode v zemljini (*SWC* - *soil water content*) je pričetek redukcije (*WC SR* - *start of reduction*). To je točka, v kateri rastline zaradi omejene količina vode ne morejo več v popolnosti izvajati procesa transpiracije ( $ET_a < ET_p$ ). Vrednost pada linearno od 1 (točka začetka redukcije) do 0 (točka venenja) (Hörmann, 2012):

$$\text{če } SWC \geq WC SR \rightarrow ET_a = ET_p, \quad (65)$$

$$\text{če } SWC < WC SR \rightarrow ET_a = ET_p \cdot \frac{SWC}{WC SR}, \quad (66)$$

$$B_z = P_{rt} - V_z, \quad (67)$$

$$ET_{a_z} = \begin{cases} B_z > V_r \rightarrow ET_{p_t} \\ B_z < V_r \rightarrow ET_{p_t} \cdot \frac{(ET_{p_t} - W_p)}{(WC SR - W_p)} \end{cases}, \quad (68)$$

$$ET_{p_z} = B_z - ET_{a_z}, \quad (69)$$

kjer je:

$B_z$	bilanca v zemljini,
$V_z$	začetna vrednost vode v zemljini,
$V_r$	količina vode v zemljini, pri kateri se prične redukcija,
$W_p$	točka venenja,
$ET_{a_z}$	ostanek $ET_p$ ,
$ET_{p_z}$	bilanca $ET_p$ ,
$SWC$	vsebnost vode v zemljini,
$WC SR$	začetek redukcije.

### 3.5 Površinski odtok

Program je narejen tudi z namenom proučevanja hidroloških ekstremov. Seznanimo se lahko s površinskim odtokom. V modelu SIMPEL je za račun površinskega odtoka uporabljena metoda po Glugli. Ta metoda uporablja izraz o ohranitvi mase v enačbi za vodno bilanco (Bonta in Müller, 1999).

$$GWR = P - E_a - Q \pm dS, \quad (70)$$

$$R = R_0 + R_t, \quad (71)$$

kjer je:

$GWR$	polnjenje vode v zemljini,
$P$	padavine,
$E_a$	dejanska evapotranspiracija,
$Q$	površinski odtok, ki ne pride do vode v zemljini,
$R$	celotni odtok, ki ne doseže podzemne vode,
$R_0$	površinski odtok,
$R_t$	vmesni tok,
$dS$	sprememba v vedru.

V *simpel2\_e.xls* pa neprej izračunamo (Hörmann, 2012):



$$Q_g = \begin{cases} ETp_z \leq V_{cz} \rightarrow \lambda \cdot (ETp_z - Wp)^2 \\ ETp_z > V_{cz} \rightarrow 0 \end{cases}, \quad (72)$$

$$V_z = \begin{cases} ETp_z > V_{cz} \rightarrow V_{cz} \\ ETp_z \leq V_{cz} \rightarrow ETp_z - Q_g \end{cases}, \quad (73)$$

$$Q_{simpel} = \begin{cases} ETp_z > V_{cz} \rightarrow ETp_z - V_{cz} \\ ETp_z \leq V_{cz} \rightarrow Q_g \end{cases}, \quad (74)$$

kjer je:

$Q_g$	površinski odtok po Glugli,
$V_z$	začetna vrednost vode v zemljini,
$Q_{simpel}$	površinski odtok po modelu SIMPEL,
$V_{cz}$	kapaciteta zemljine za zadrževanje vode,
$\lambda$	koeficient.

### 3.6 Rezultati

Rezultati vsebujejo časovne vrste, bilance, merjene vrednosti ter grafe ki prikazujejo časovne vrste nekaterih spremenljivk. Rezultati so dejanska evaporacija, prestrezanje, površinski odtok, ter količina vode v vsakem vedru (Hörmann, 1998).

$$I_l = ETp_l - ETp_t, \quad (75)$$

$$I_t = ETp_l - ETp_t, \quad (76)$$

$$ETA_t = ETA_z + I_l + I_t, \quad (77)$$

kjer je:

$I_l$	skupna količina vode, ki se zadrži na listih rastlin,
$I_t$	skupna količina vode, ki se zadrži na listih na tleh,
$ETA_t$	skupna evapotranspiracija.

Serije podatkov so podane za vsak dan posebej. Nekatero rezultate pa imamo nato zbrane in seštete za celotno opazovano serijo, in sicer vsoto padavin (začetni podatek), vsoto ETp (začetni podatek), vsoto ETa in vsoto površinskega odtoka.

Iz začetnih podatkov naredimo klimatsko bilanco ( $C_b$ ):

$$C_b = P - ETp_i. \quad (78)$$

Bilanco modela ( $B_{simpel}$ ) iz izračunanih podatkov dobimo kot:

$$B_{simpel} = \sum P - \sum ETA_t. \quad (79)$$

Lahko preverimo tudi natančnost modela:

$$\sum P - \sum ETA_t - \sum Q_{simpel} - V_{zn} + V_{z1} \cong 0. \quad (80)$$

Bližje ničli je naš rezultat, manjša je napaka v izračunih modela.

### 3.7 Dodatne verzije modela

Na spletni strani univerze v Kiel-u lahko dobimo še nekatere razširitve modela (CAU, 2016):

- Model mokrišča. Omogoča račun nivoja vode v zemljini v mokriščih, kot funkcijo potencialne evaporacije. Ne upošteva odštevanja ETp od ETa.
- Model štirih slojev. Ta verzija nam omogoča model vedra zemljine razdeliti na štiri sloje. Sloj korenin lahko upoštevamo ali pa tudi ne. Vsakemu sloju lahko določimo različne fizikalne lastnosti. Lahko se računa pretok v različne sloje in iz njih. Omogoča povezavo z odlaganjem materiala v smislu merjenih koncentracij v izračunanem vodnem toku.
- Model hidrograma enote.
- Dodaten model za mokrišča z drugačnim postopkom za podvodna zajetja.
- Metoda Penman/Monteith za izračun ETp po FAO.

## 4 IZRAČUN ČLENOV VODNE BILANCE ZA POREČJE TOLMINKE Z MODELOM SIMPEL

### 4.1 Predstavitev obravnavanega območja

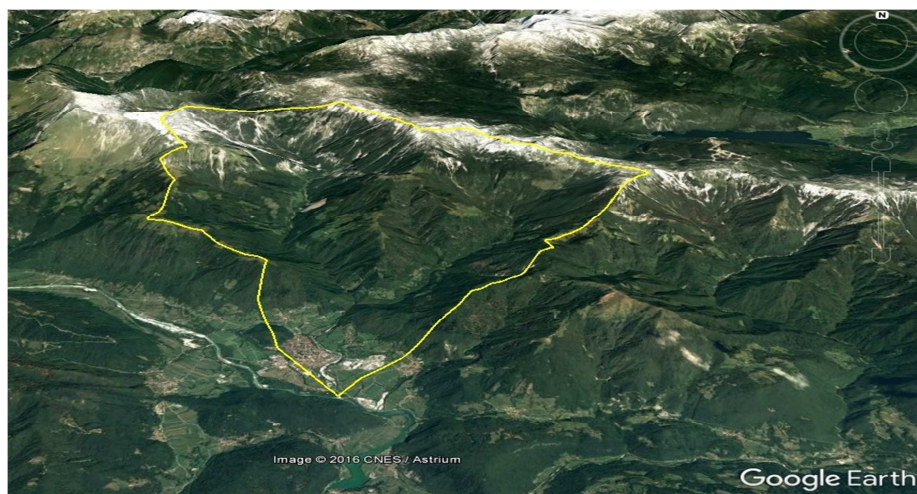
#### 4.1.1 Lega in relief

Dolini Tolminke in Zadlaščice sta značilni izvorni alpski dolini, ki se z obrobja globoko zajedata v osrčje Julijskih Alp (slika 7). Podobni sta stranskim dolinam v Baški grapi, deloma pa tudi dolinam na Bovškem in v Trenti. Dolina Tolminke je z dolžino skoraj 10 km med najdaljšimi od omenjenih dolinskih zarez in je celo daljša od doline Planice ter enako dolga kot dolina Krme. Dolina Zadlaščice je skoraj za polovico krajša od doline Tolminke. Po obeh dolinah je najlažji dostop v osrčje Tolminskih Julijskih Alp s tolminske strani oziroma iz srednjega Posočja. Dolina Tolminke (slika 6) je ločila Krnsko gorsko skupino od Spodnjih Bohinjskih gora ter njihovega južnega predgorja. Zarezana je v poldnevniški smeri od Tolmina daleč v notranjost srednjih Julijskih Alp, kjer se nahaja njeno hudourniško povirje ob Bogatinu in Mahavščku. (Kunaver, 1993)

Površina zaledja Tolminke znaša  $73,08 \text{ km}^2$  (Bat et al., 2008). Izliv Tolminke v Sočo leži na zemljepisni širini  $N46^{\circ} 10'$  in zemljepisni dolžini  $E13^{\circ} 44'$ . Najnižja točka porečja je sotočje, ki leži na nadmorski višini 157 m, najvišja točka porečja, Tolminski Kuk, pa meri 2086 m. (Geopedia, 2016)



Slika 6: Dolina Polog, po kateri teče reka Tolminka (foto: Trušnovec, 2012)



Slika 7: Porečje Tolminke in Zadlaščice (vir nodelage: Google Earth, 2016)

### 4.1.2 Podnebje

Podnebje je dejavnik, ki ima največji vpliv na vodni krog (Bat et al., 2008). V porečju Tolminke in Zadlaščice se stikata vpliv gorske klime s severa in submediteranski vpliv, ki prodira po dolini reke Soče. Rečemo lahko, da se od podnebja v severnem delu Julijskih Alp razlikuje z milejšimi zimami ter bolj toplimi in suhimi poletji. Padavine so obilne preko vsega leta in znašajo med 2500 do 3000 mm na leto. Največ jih pade jeseni, drugi višek je ob prehodu iz pomladi v poletje, najmanj pa ob prehodu iz zime v pomlad in v poletnih mesecih. Vegetacijska doba traja od 4 do 7 mesecev, odvisno od nadmorske višine (Mlekuž, 1993).

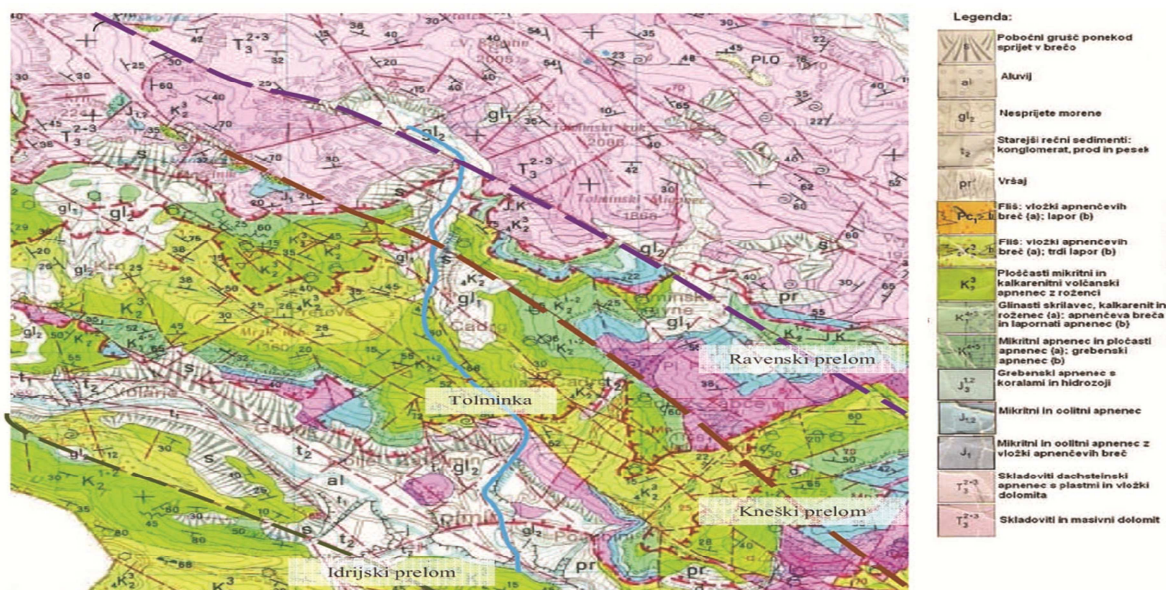
### 4.1.3 Kamnine in prsti

Kamnine s svojo prepustnostjo vplivajo tako na rastje kot na pretok in odtok vode. Izvirne vode Tolminke in Zadlaščice se pojavljajo na stikih mezozojskih karbonatnih in flišnih kamnin. Gostota rečne mreže Tolminkega porečja je odraz geološke zgradbe in stopnje vodoprepustnosti kamnin ter znaša  $1,08 [km/km^2]$  (Kolbezen et al., 1998). Večji del porečja Tolminke in Zadlaščice je zgrajen iz jurskih in krednih kamnin. Sem spadajo lapor in skrilavec s plastmi breče ter apnenec z rožencem (slika 8). Osrednje grebene Julijskih Alp gradi dachsteinski apnenec s prehodi v dolomit. Ob njihovem vznožju so dokaj obširna pobočja, zgrajena iz pobočnega grušča in morenskega drobirja, delno sprijetega v brečo. Na mehkejši in vododržni matični podlagi iz krede in jure so nastala sveža in rodovitna rjava tla ali rjava pokarbovatna tla z ugodnimi fizikalnimi in kemičnimi lastnostmi. Na triasnih apnencih in dolomitih najdemo največkrat plitve in srednje goloboke, suhe rendzine, redkeje pa tudi plitva, suha pokarbovatna tla (Kunaver, 1993).

V nalogi smo uporabili dva različna seta podatkov za fizikalne lastnosti zemljine:

Zemljino 1 s poljsko kapaciteto 50 %, točka venenja 15 % in začetek redukcije 25 % (Šijanec, 2009).

Zemljino 2 s poljsko kapaciteto 30 %, točka venenja 12 % in začetek redukcije 20 % (Hörmann, 2012).



Slika 8: Izsek geološke karte za dolino Tolminke in njene širše okolice (vir podlage: Podgornik, 2011)



#### 4.1.4 Rastlinstvo

Vrsta in gostota rasti na nekem območju sta zelo odvisni od vode in vrste tal. Vse rastline potrebuje vodo za rast. S procesom transpiracije vsaka rastlina na svoj način vpliva na vodni krog. Količine vode, ki jih pri transpiraciji porabijo posamezne vrste, se precej razikujejo (Bat et al., 2008). Zato je dobro poznavanje opazovanega območja lahko zelo pomembno. Teh podatkov pa primankuje. Največ jih lahko dobimo za poljedelske rastline. V porečju Tolminke in Zadlaščice je večina pobočij poraslih z gozdom (slika 9). Na prisojnih pobočjih so prisotni sestoji bukve, belega gabra in velikega jesena, na osojnih pobočjih pa prevladuje bukov gozd, ki ga v višjih predelih dopolnjujejo še smreka, gorski javor in ponekod tudi macesen. Na območju najdemo še kmetijske površine, pašnike ter visokogorske travnike (Mlekuž, 1993).

V nalogi smo maksimalno vrednost LAI (7) povzeli po raziskovalni študiji (Šraj, 2004).



Slika 9: Raba tal v porečju Tolminke (vir podlage: Geoportal ARSO, 2016)

#### 4.1.5 Antropogeni dejavniki v dolini Tolminke

Na vodni krog vplivamo tudi ljudje s svojimi dejavnostmi. Da bi naravna bogastva čim boljše izkoristili in na njih čim manj vplivali, moramo dobro spoznati posamezne elemente pokrajine, v kateri živimo (Bat et al., 2008). Večina ozemlja v porečju Tolminke spada pod Triglavski narodni park. V porečju se nahajajo hidroelektrarna in zajetje pitne vode na Zadlaščici, hidroelektrarna na Tolminki ter dve ribogojnici Ribiške družine Tolmin.

## 4.2 Členi vodne bilance

### 4.2.1 Padavine

Podatke o padavinah smo privzeli s strani Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO, 2016b). Uporabili smo dnevne količine padavin na padavinski postaji Kneške Ravne (lon=13.8248, lat=46.2152, viš=737m). V nalogi smo za primerjavo izbrali podatke za eno 'mokro' in eno 'suho' leto, in sicer za leto 2009 z 2900,1 [mm] padavin (priloga A) in leto 2011 z 2187,9 [mm] padavin (priloga A).

### 4.2.2 Izhlapevanje

Podatke za ETp smo dobili na spletnih straneh ARSO (ARSO, 2016c). Uporabili smo dneve količine s klimatološke postaje Vojsko (lon=13.9031, lat=46.0250, viš=1067 m) za leti 2009 in 2011. Porečju najbližja postaja je sicer klimatološka postaja Vogel (lon=13.8409, lat=46.2635, viš=1535 m), vendar se le ta nahaja na bohinjski strani gorske verige ter na razmeroma visoki nadmorski višini, kar vpliva na kvaliteto meritev.

### 4.2.3 Pretoki

Podatke o pretokih za reko Tolminko na merilni postaji 8332 Tolmin I (slika 10) smo pridobili iz hidrološkega arhiva ARSO (ARSO, 2016a). Uporabili smo pretoke za leti 2009 in 2011 (prilogi D in E).



Slika 10: Merilno mesto Tolmin I – most čez Tolminko (foto: Trušnovec, 2016)

### 4.2.4 Pretočni režimi

Za reko Tolminko je značilen alpski dežno-snežni režim (slika 2). Njegov vpliv se čuti do sotočja Soče in Idrijce. Pri opazovanju odtoka se pozno pomladi, zaradi taljenja snega in spomladanskega deževja, pojavi prvi višek, v jeseni, zaradi jesenskega deževja, pa nastopi drugi. Nizke vode se pojavijo v času visokega poletja ter nekje od decembra do marca, z najnižjimi vrednostmi od januarja do februarja (Bat et al., 2008). To lahko lepo vidimo tudi na grafih pretokov in odtokov (Prilogi D in E).

### 4.3 Učinkovitost modela

Učinkovitost modela smo preverili z različnimi metodami:

Koeficient Nash-Suttcliffe

$$NS = 1 - \frac{\sum(O_i - M_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (83)$$

Standardni odklon

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}} \quad (84)$$

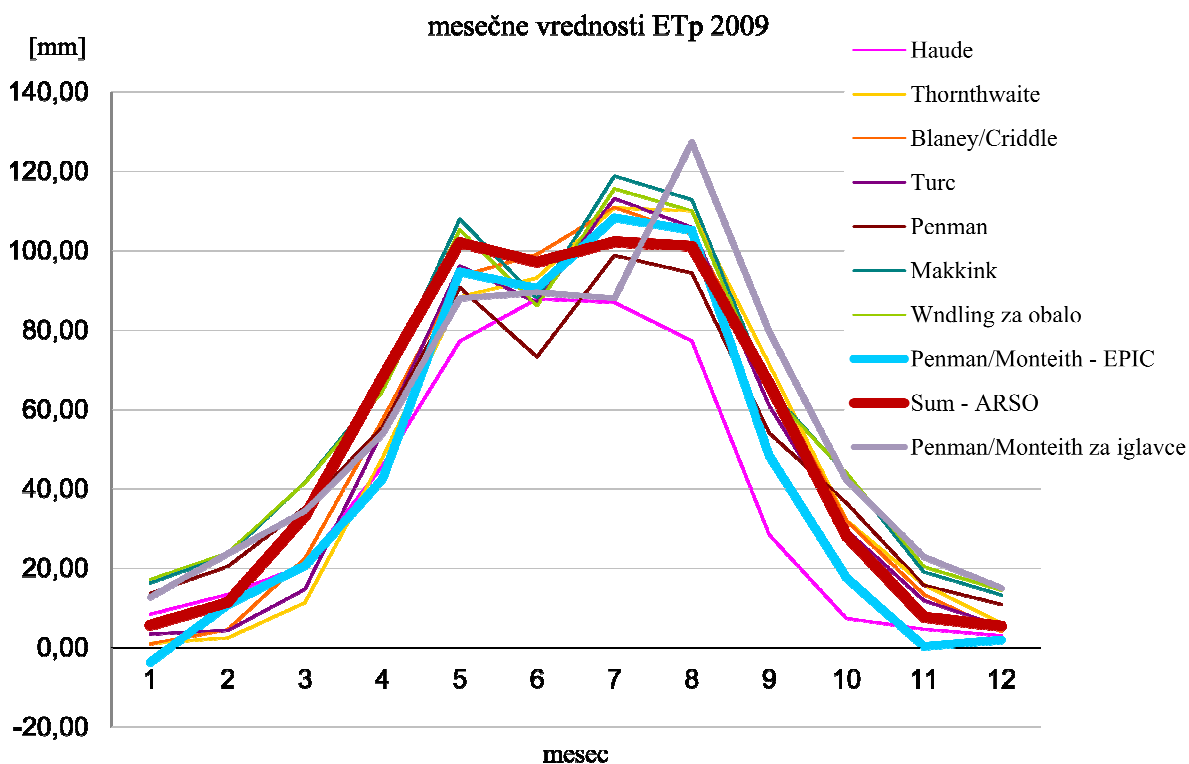
- $O_i$  izmerjena vrednost,
- $M$  izračunana vrednost,
- $\bar{O}$  povprečje izmerjene vrednosti,
- $N$  število meritev.

### 4.4 Rezultati modeliranja

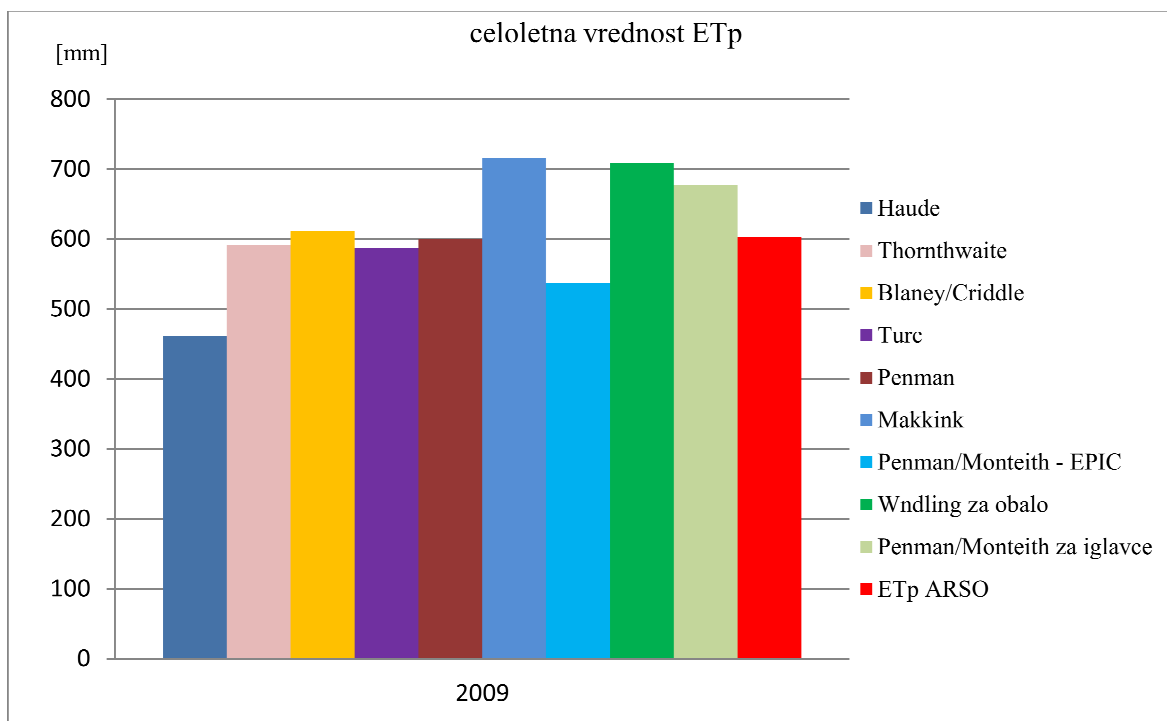
Rezultati modeliranja vodne bilance porečja Tolminke za suho leto 2009 in mokro leto 2011 so prikazani v preglednicah 1 do 8, na slikah 11-16 ter v prilogah B-E.

Preglednica 1: Primerjava različnih modelov za računanje ET<sub>p</sub> v letu 2009 ter ocene njihove učinkovitosti

ET <sub>p</sub>	Celoletni seštevek [mm]	Aritmetična sredina [mm]	Koeficient NS [-]	Standardni odklon [mm]
ARSO (izmerjeni)	603,6	1,65		
Haude	462,1	1,27	0,39	1,05
Thornthwaite	591,3	2,01	0,82	0,55
Blaney/Criddle	611,3	1,67	0,89	0,45
Turc	587,9	1,61	0,88	0,47
Penman	600,3	1,64	0,86	0,50
Makkink	716,4	1,96	0,80	0,48
Wendling za obalna območja	708,4	1,94	0,82	0,57
EPIC- Penman/Monteith	537,8	1,48	0,80	0,61
Penman/Monteith za iglaste gozdove	280,1	0,77	-0,04	1,38



Slika 11: Graf mesečnih vrednosti ETp izračunanih po različnih metodah za leto 2009



Slika 12: Graf letnih vrednosti ETp izračunanih po različnih metodah za leto 2009



Preglednica 2: Primerjava merjenega in modeliranega površinskega odtoka z uporabo treh, po Nash-Sutcliffe najboljše ocenjenih, modeliranih ETp v letu 2009 ter ocene njihove učinkovitosti

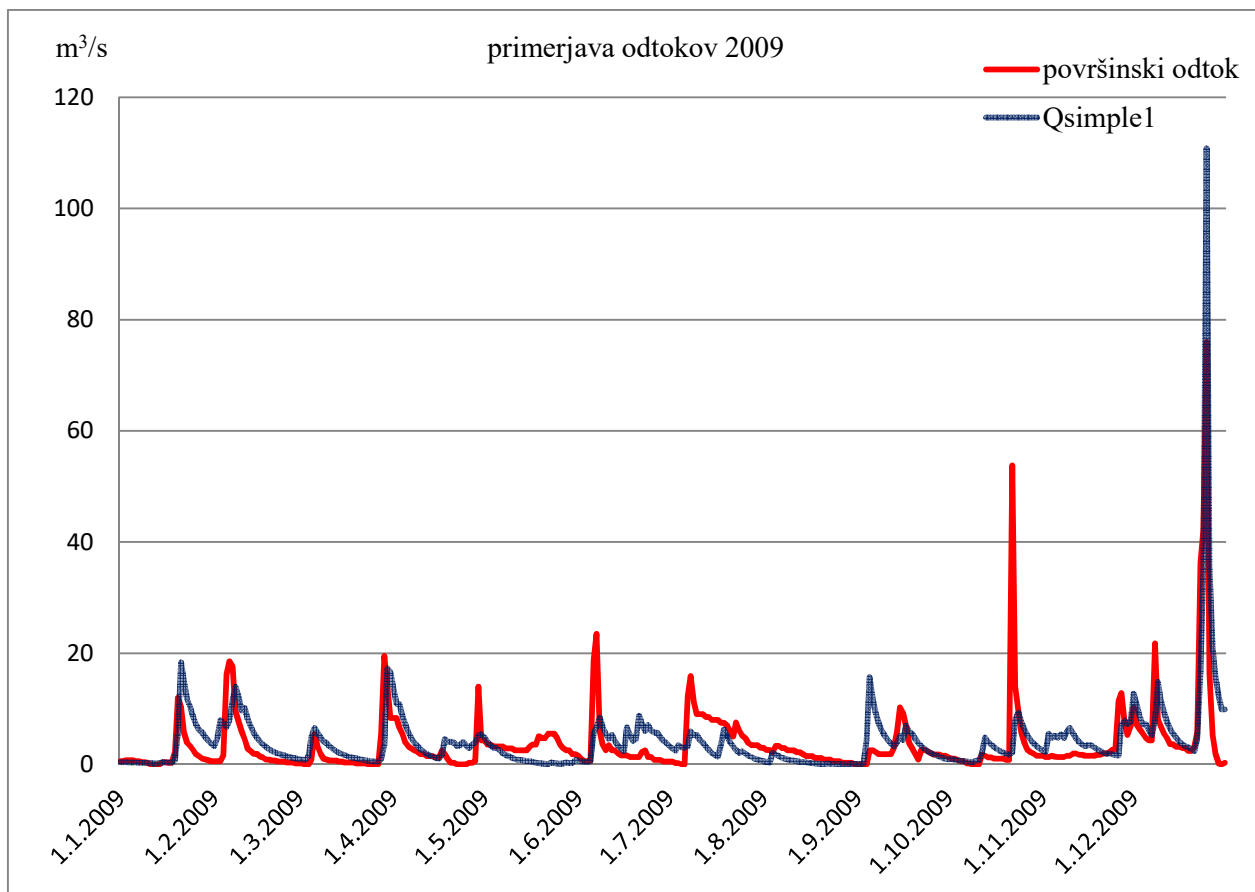
	Celoletni seštevek [m <sup>3</sup> /s]	Aritmetična sredina [m <sup>3</sup> /s]	Koeficient NS [-]	Standardni odklon [mm]
Izmerjeni odtok	1314,64	3,60		
Blaney/Criddle ETp	1532,04	4,20	0,33	5,32
Turc ETp	1551,25	4,25	0,33	5,32
Penman ETp	1534,28	4,20	0,34	5,27

Preglednica 3: Primerjava merjenega in modeliranega površinskega odtoka z uporabo Penmanovega modela ETp ter dveh zemljin z različnimi fizikalnimi lastnostmi za leto 2009

	Celoletni seštevek [m <sup>3</sup> /s]	Aritmetična sredina [m <sup>3</sup> /s]	Koeficient NS [-]	Standardni odklon [mm]
Izmerjeni odtok	1314,64	3,60		
<i>Q<sub>simple 1</sub></i> Penman ETp Poljska kapaciteta 50 % Točka venenja 15 % Začetek redukcije 25 %	1534,28	4,20	0,34	5,27
<i>Q<sub>simple 2</sub></i> Penman ETp Poljska kapaciteta 30% Točka venenja 12% Začetek redukcije 20%	1617,24	4,366	-0,60	8,19

Preglednica 4: Vodna bilanca za leto 2009

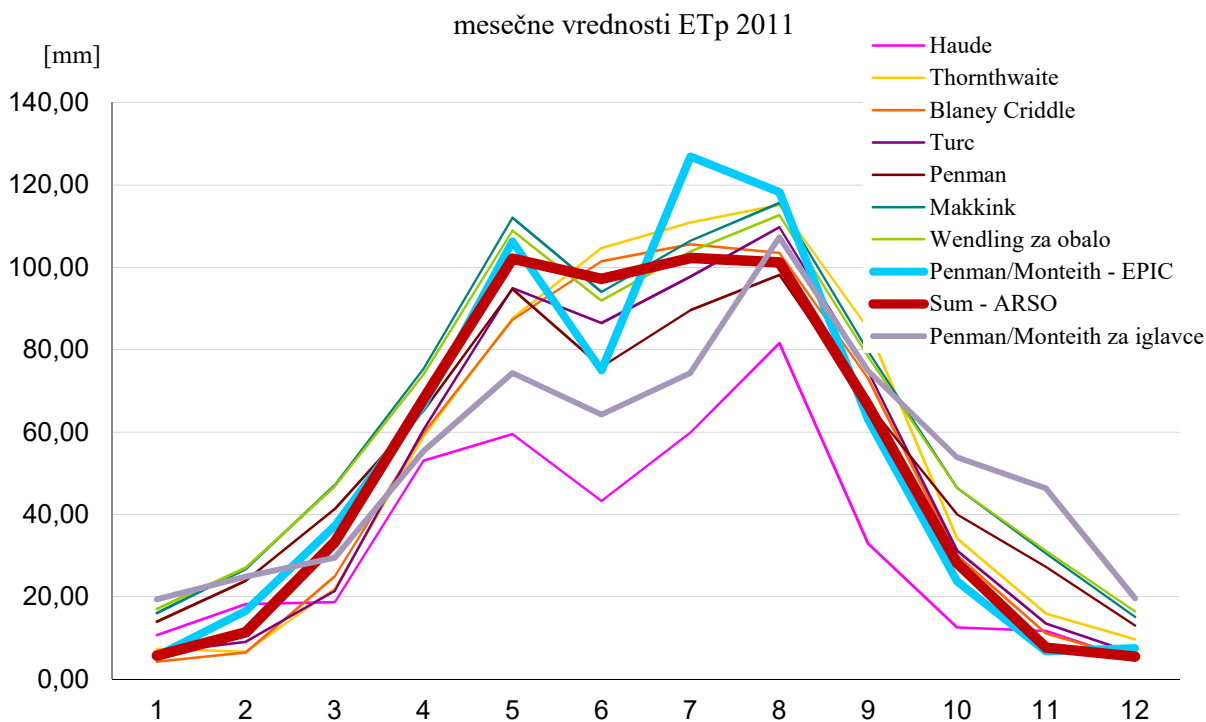
	[mm]
$\sum P$	2900,1
$\sum ETp$	600,3
$\sum ETa_t$	544,1
$\sum Q_{simple 1}$	2297,4
Klimatska bilanca	2299,8
Bilanca modela	2356,0



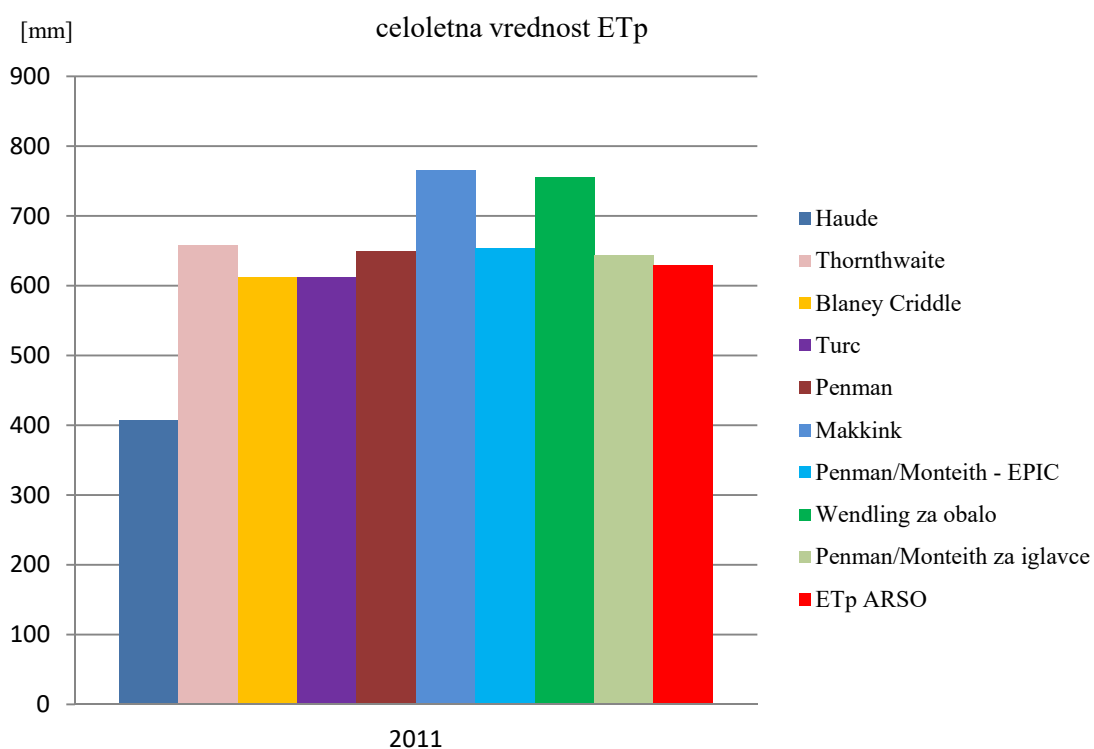
Slika 13: Primerjava izmerjenega ter modeliranega odtoka za leto 2009

Preglednica 5: Primerjava različnih modelov za računanje ETp v letu 2011 ter ocene njihove učinkovitosti

ETp	Celoletni seštevek [mm]	Aritmetična sredina [mm]	Koeficient NS [-]	Standardni odklon [mm]
ARSO (izmerjeni)	629,2	1,72		
Haude	406,7	1,11	0,25	1,22
Thornthwaite	658,5	2,22	0,79	0,61
Blaney/Criddle	612,5	1,68	0,89	0,46
Turc	612,1	1,68	0,88	0,49
Penman	649,9	1,780	0,84	0,56
Makkink	629,2	2,10	0,79	0,64
Wendling za obalna območja	754,8	2,07	0,81	0,61
EPIC- Penman/Monteith	653,7	1,79	0,51	0,98
Penman/Monteith za iglaste gozdove	664,5	1,82	0,46	1,03



Slika 14: Graf mesečnih vrednosti ETp izračunanih po različnih metodah za leto 2011



Slika 15: Graf letnih vrednosti ETp izračunanih po različnih metodah za leto 2011

Preglednica 6: Primerjava merjenega in modeliranega površinskega odtoka z uporabo treh, po Nash-Suttcliffe najbolj ocenjenih, modeliranih ETp v letu 2011 ter ocene njihove učinkovitosti

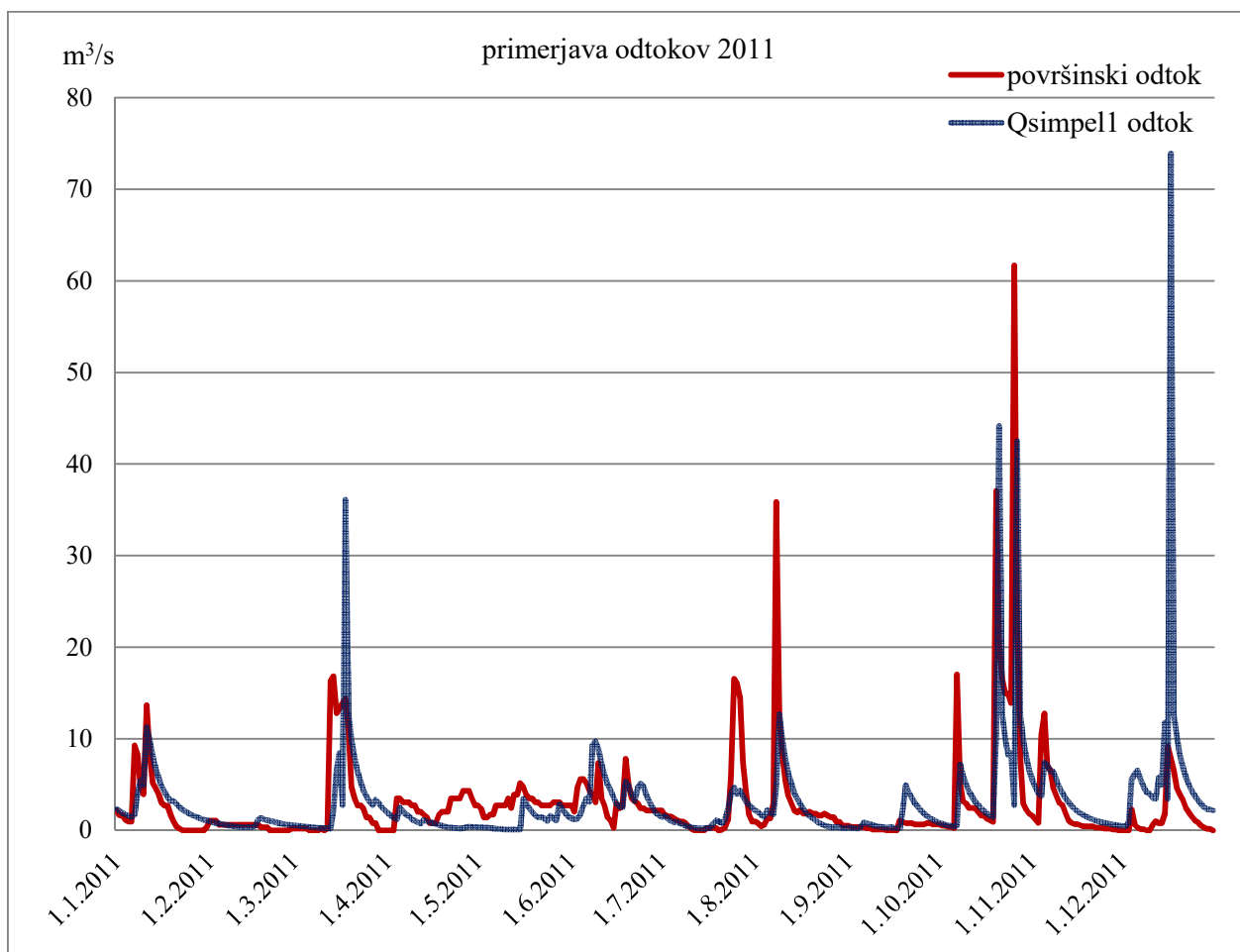
	Celoletni seštevek [m <sup>3</sup> /s]	Aritmetična sredina [m <sup>3</sup> /s]	Koeficient NS [-]	Standardni odklon [mm]
Izmerjenega odtoka	1059,95	2,90		
Blaney/Criddle ETp	1151,15	3,15	-0,36	6,25
Turc ETp	1156,64	3,17	-0,34	6,22
Penman ETp	1132,73	3,10	-0,34	6,21

Preglednica 7: Primerjava merjenega in modeliranega površinskega odtoka z uporabo Penmanove ETp ter dveh zemljin z različnimi fizikalnimi lastnostmi za leto 2011

	Celoletni seštevek [m <sup>3</sup> /s]	Aritmetična sredina [m <sup>3</sup> /s]	Koeficient NS [-]	Standardni odklon [mm]
Izmerjeni odtok	1059,95	2,90		
<i>Q<sub>simple</sub> 1</i> Penman ETp Poljska kapaciteta 50% Točka venenja 15% Začetek redukcije 25%	1132,73	3,10	-0,34	6,21
<i>Q<sub>simple</sub> 2</i> Penman ETp Poljska kapaciteta 30% Točka venenja 12% Začetek redukcije 20%	1169,95	3,15	-0,80	7,16

Preglednica 8: Vodna bilanca za leto 2011

	[mm]
$\sum P$	2187,9
$\sum ETp$	649,9
$\sum ETa_t$	568,2
$\sum Q_{simpel} 1$	1639,9
Klimatska bilanca	1537,9
Bilanca modela	1619,7



Slika 16: Primerjava izmerjenega ter modeliranega odtoka za leto 2011

Model se je pri izračunu ETp izkazal za dokaj uspešnega. Za leto 2009 sta bili samo dve metodi z Nash-Suttclifovim koeficientom (NS) ocenjeni slabše kot 0,80. Najbolje ocenjena je bila Bliney/Criddle-ova metoda z vrednostjo NS 0,89, sledili sta ji Turc-ova metoda z vrednostjo NS 0,88 in Penman-ova z vrednostjo NS 0,86. V letu 2011 pa so bile z Nash-Suttclifovim koeficientom tri metode ocenjene slabše kot 0,79. Najbolje ocenjena je bila Bliney/Criddle-ova metoda z vrednostjo NS 0,89, sledili sta ji Turc-ova metoda z vrednostjo NS 0,88 in Penman-ova metoda z vrednostjo NS 0,84.

Nato smo te tri izračunane vrednosti ETp vstavili v `simpel2_e.xls` in izračunali površinski odtok. Za leto 2009 je bil odtok, izračunan na podlagi izračunane ETp po metodi Bliney/Criddle, ocenjen z vrednostjo NS 0,33. Tudi odtok, izračunan na podlagi ETp po Turc-ovi metodi, je bil ocenjen z vrednostjo NS 0,33. Odtok, izračunan na podlagi ETp po metodi Penman, pa je bil ocenjen z vrednostjo NS 0,34. Za leto 2011 je bil odtok, izračunan na podlagi izračunane ETp po metodi Bliney/Criddle, ocenjen z vrednostjo NS -0,36. Odtok, izračunan na podlagi ETp po Turc-ovi metodi, je bil ocenjen z vrednostjo NS -0,34 in odtok, izračunan na podlagi ETp po metodi Penman, z -0,34.

Ugotavljali smo tudi vpliv spremembe fizikalnih lastnosti zemljine na površinski odtok. Za leto 2009 smo dobili za model Qsimpel1 (poljska kapaciteta 50 %, točka venenja 15 %, začetek redukcije 25 %) oceno NS 0,34 in za model Qsimpel2 (poljska kapaciteta 30 %, točka venenja 12 %, začetek redukcije 20 %) oceno -0,60. Za leto 2011 pa za model Qsimpel1 dobili oceno NS -0,34 in za Qsimpel2 oceno -0,80. Rezultati kažejo na boljšo odzivnost modela Qsimpel1.

Vrednost koeficienta *NS* se teoretično lahko giblje od minus neskončno do vrednosti 1. Vrednost  $NS = 1$  pomeni, da se model povsem ujema z merjenimi vrednostmi. Izračunane vrednosti *NS* nam kažejo, da program SIMPEL podaja zadovoljive rezultate pri izračunu ETp. Pokaže pa tudi, da samo natančna ETp ni dovolj za zadovoljivo natančnost pri izračunu odtoka. Opazimo lahko tudi, da spreminjanje fizikalnih lastnosti zemljine močno vpliva na izračun površinskega odtoka.

## 5 ZAKLJUČEK

Model SIMPEL je zasnovan v okolju Microsoft Excel, ki je računalniški program, dostopen velikemu krogu uporabnikov. Dandanes si življenje brez računalniške tehnologije težko predstavljamo, saj jo uporabljamo praktično povsod. Zaradi tega je v razcvetu tudi razvijanje računalniških programov in modelov. Večina programov in aplikacij je še vedno v komercialno tržni oziroma lastniški obliki, vendar je v razcvetu tudi nastajanje odprtokodnih programov, ki prav tako postajajo vse celovitejši, učinkovitejši in uporabnikom prijazni. Sam program Excel sicer ni prosto dostopen, vendar je s svojimi močnimi algoritmi primerno orodje za ustvarjanje najrazličnejših računalniških modelov in simulacij. Prednosti modela SIMPEL so:

- *Dostopnost.* Model SIMPEL si lahko prosto prekopiramo s spleta (CAU, 2016). Kot je bilo že omenjeno, je model SIMPEL narejen v programu Microsoft Excel, do katerega ima dostop skoraj vsak, ki poseduje računalnik z operacijskim sistemom Windows.
- *Zahtevnost uporabe.* Uporaba modela SIMPEL je precej jasna in enostavna, saj od nas zahteva samo vstavljanje potrebnih podatkov. Je pa res, da je potrebno poznati ozadje posameznih metod in pomen posameznih parametrov.
- *Transparentnost.* Delovno okolje v MS Excel-u nam omogoča pisanje formul v posamezna okenska ter nam tako dovoli njihov ogled. S tem lahko sledimo količini, ki nas zanima, skozi vse korake do začetnih vrednosti. Enako lahko sledimo začetnim podatkom do končnega rezultata.
- *Prilagodljivost.* Sam Excel ima že vgrajeno kopico matematičnih algoritmov in drugih funkcij, ki jih lahko s pridom uporabimo za računanje in prikaz zelenih podatkov, ne da bi se nam bilo potrebno ukvarjati s kodiranjem dotičnih algoritmov. V modelu SIMPEL nam to omogoči, da lahko osnovnim datotekam nato prosto dodajamo razširitve, ki jih želimo uporabljati. Prav tako pa lahko spreminjamo in popravljamo formule v samem programu, če ugotovimo, da je to potrebno.
- *Podpora.* V MS Excelu najdemo uporabniški vmesnik Help, ki nam lahko odgovori na marsikatero vprašanje v zvezi z uporabo programa. Ob precejšnjem številu uporabnikov pa obstaja tudi na spletu velika skupnost s številnimi navodili, tečaji, nasveti in pomočjo, ki nam pomagajo pri ustvarjanju lastnih modelov.
- *Združljivost.* Dobra stran Excelovega delovnega okolja je tudi to, da lahko podatke iz njega brez težav izvozimo v druge programe v okviru Microsoft Office. Običajno nam težav ne povzroča niti izvoz v programe drugih ustvarjalcev.

Tudi pri takšnem programu pa naletimo na slabosti oziroma pomanjkljivosti, ki so:

- *Navigacija.* Ob uporabi se nam hitro zgodi, da imamo hkrati odprtih pet ali več Excelovih datotek. Preskakovanje iz enega okna v drugo lahko postane nepregledno in zamudno.
- *Stabilnost.* Delo z velikimi količinami podatkov v več datotekah hkrati večkrat povzroči, da program zamrzne. Zato je treba biti zelo pozoren na sprotno shranjevanje tekočega dela.



- *Ekonomičnost.* Čeprav je program SIMPEL brezplačen, pa temu ni tako z Microsoft Excelom, ki ga nujno potrebujemo za njegovo delovanje.
- *Lastništvo.* To, da je program prosto dostopen, je seveda pozitivno. Vendar pa v primeru, da imamo s programom težave, od ustvarjalcev ne moremo pričakovati in zahtevati pomoči in pojasnil.
- *Razširitve in razvoj.* Če se zgodi, da so rezultati, ki jih poda model SIMPEL, le del rezultatov, ki jih potrebujemo, lahko sami naredimo razširitev. Pri tem pa potrebujemo poleg inženirskega znanja tudi dobro poznavanje programa Excel.

Pri delu smo imeli največ težav pri iskanju primernih vhodnih podatkov. Agencija Republike Slovenije za okolje ima obsežno bazo podatkov, ki so dostopni na spletu (ARSO, 2016a; 2016b; 2016c). Čeprav je postaj v Sloveniji veliko, pa se, razen vodomerne postaje na Tolminki, nobena od padavinskih ali klimatoloških postaj ne nahaja v porečju oziroma njegovi neposredni bližini. Tako smo morali biti pri izbiri vhodnih podatkov previdni.

Pri delu s samim programom SIMPEL nam je sprva težave povzročalo povezovanje formul iz literature s tistimi v programu, saj zapisi niso enaki. Tu nam je prav prišlo predhodno znanje in vgrajena pomoč v Excelu ter razna navodila na spletu.

V diplomski nalogi smo izračunali vodno bilanco za porečje Tolminke. Osredotočili smo se predvsem na izračun evapotranspiracije in površinskega odtoka. Rezultati bi bili še boljši, če bi bile meteorološke meritve in meritve, povezane z lastnostmi zemljine in rastja, opravljene na opazovanem območju. Tako pa smo se morali zadovoljiti s podatki, ki so bili na voljo, kot je to tudi sicer pogosta praksa pri obravnavi relativno majhnih porečij.

Vseeno menimo, da daje naloga dober vpogled v delovanje modela SIMPEL ter njegove zmogljivosti. Pri delu z njim dobimo tudi dober občutek za vrsto in količino potrebnih podatkov pri računanju vodne bilance ter za pomen sleherne meritve.

## VIRI

ARSO 2016a. Arhiv hidroloških podatkov - dnevni podatki.

[http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov\\_arhiv\\_tab.php](http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php) (Pridobljeno 14. 6. 2016.)

ARSO 2016b. ARHIV - opazovani in merjeni meteorološki podatki po Sloveniji.

<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (Pridobljeno 14. 06. 2016.)

ARSO 2016c. Evapotranspiracija, višina padavin, temperatura zraka na 2 m in 5 cm za izbrano postajo, leto in mesec.

<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/month/> (Pridobljeno 14. 06. 2016.)

Bat, M., Dolinar, M., Frantar, P., Hrvatin, M., Kobold, M., Kurnik, B., Nadbath, M., Ožura, V., Uhan, J., Ulaga, F. 2008. Vodna bilanca Slovenije 1971–2000. = Water Balance of Slovenia 1971–2000. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje: 119 str.

Blackland Texas A&M AgriLife Research, Research and Extension Center, 2016. EPIC: Environmental Policy Integrated Climate Model.

<http://blackland.tamu.edu/models/epic/> (Pridobljeno 6. 9. 2016.)

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.

Bonta, V.J., Müller, M. 1999. Evaluation of the Glugla method for évapotranspiration and groundwater recharge. Estimating. Hydrological sciences-journal-des sciences hydrologiques 44-5, 743-761.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.399.7476&rep=rep1&type=pdf> (Pridobljeno 6. 9. 2016.)

CAU, 2016. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

<http://www.hydrology.uni-kiel.de/en/research/projects/simpel-en> (Pridobljeno 14. 6. 2016.)

Cesar, P. 2010. Primerjava različnih metod izračuna evapotranspiracije. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Cesar): 133 str.

Cesar, P., Šraj, M. 2012. Evapotranspiracija: pregled vplivnih dejavnikov in metod izračuna. Geografski vestnik 84-2, 73-87.

[http://zgs.zrc-sazu.si/Portals/8/Geografski\\_vestnik/gv\\_84-2\\_cesar\\_sraj.pdf](http://zgs.zrc-sazu.si/Portals/8/Geografski_vestnik/gv_84-2_cesar_sraj.pdf) (Pridobljeno 10. 4. 2015.)

Geoportal ARSO, 2016.

[http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas\\_Okolja\\_AXL@Arso](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso) (Pridobljeno 15. 9. 2016.)

Geopedia, 2016.

[http://www.geopedia.si/lite.jsp#T105\\_x404376\\_y122184\\_s13\\_b4](http://www.geopedia.si/lite.jsp#T105_x404376_y122184_s13_b4) (Pridobljeno 6. 9. 2016.)

Google Earth. 2016.

<http://www.google.com/earth> (Pridobljeno 15. 9. 2016.)

Hörmann, G. 1998. The SIMPEL soil water spreadheets: defining the low end of hydrologic computing. Paper, Kiel, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Ecosystem Research Center: 20 str.  
[www.hydrology.uni-kiel.de/simpel/](http://www.hydrology.uni-kiel.de/simpel/) (Pridobljeno 14. 6. 2016.)

Hörmann, G. 2012. The SIMPEL soil water models. Paper, Kiel, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Department of Hydrology and Water Resources Management: 68 str.  
[www.hydrology.uni-kiel.de/simpel/](http://www.hydrology.uni-kiel.de/simpel/) (Pridobljeno 10. 4. 2015.)

Kolbezen, M., Pristov, J., Bat, M., Pristov, N., Špiler, T., Šporn, B., Ulaga, F., Župančič, B. 1998. Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije = Surface streams and water balance of Slovenia. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije: 29 str.

Kozakiv, D. 2013. Vpliv vegetacije na vodno bilanco porečja. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Kozakiv): 113 str.

Kunaver, J. 1993. Prispevek h poznavanju pokrajine in geomorfologije dolin Tolminke in Zadlaščice. V Lipušček, R. (ur.). Dolini Tolminke in Zadlaščice. Zbornik, Tolmin, ZOTK Slovenije – RO gibanje Znanost mladini, Triglavski narodni park: str. 7-44.

Mlekuž, I. 1993. Gozdovi v dolini Tolminke in Zadlaščice. V Lipušček, R. (ur.). Dolini Tolminke in Zadlaščice. Zbornik, Tolmin, ZOTK Slovenije – RO gibanje Znanost mladini, Triglavski narodni park: 54-61 str.

Podgornik, J. 2011. Geografski oris doline Tolminke. Diplomsko delo, Koper, Univerza na Primorskem, Fakulteta za humanistične študije (samozaložba J. Podgornik): 112 str.

Šijanec, M. 2009. Sposobnost izbranih tal za zadrževanje vode. Diplomsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta (samozaložba M. Šijanec): 41 str.

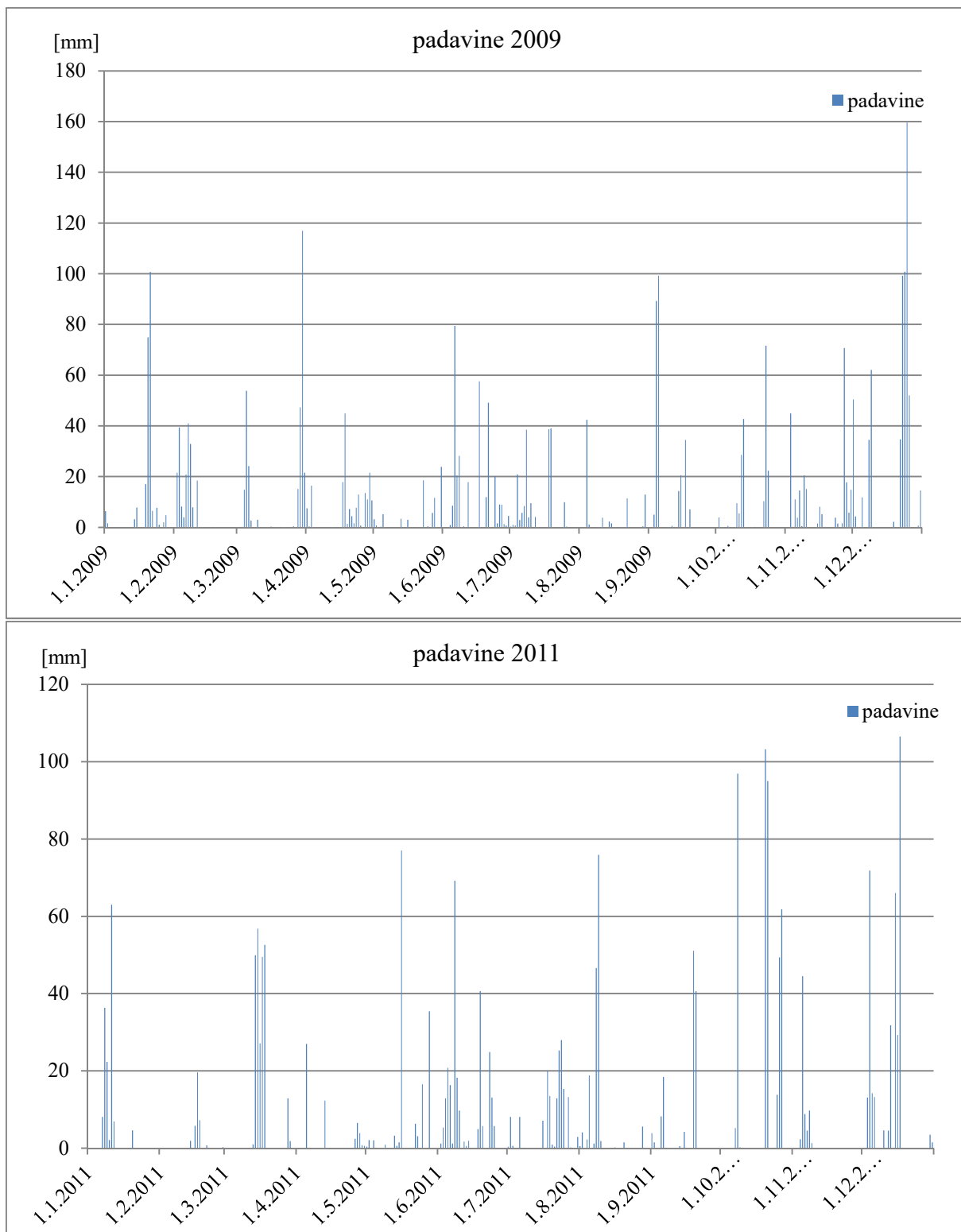
Šraj, M. 2004. Določanje indeksa površine listnatega gozda na povodju Dragonje – 2. del: rezultati in diskusija. Acta hydrotechnica 22, 36: 1–15.  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/4046/1/AH2004Sraj36.pdf> (Pridobljeno 14. 6. 2016.)

Žugelj, M. 2012. Izračun evapotranspiracije z uporabo Penman-Monteith-ove enačbe. Seminar – UNI. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Žugelj): 120 str.

## KAZALO PRILOG

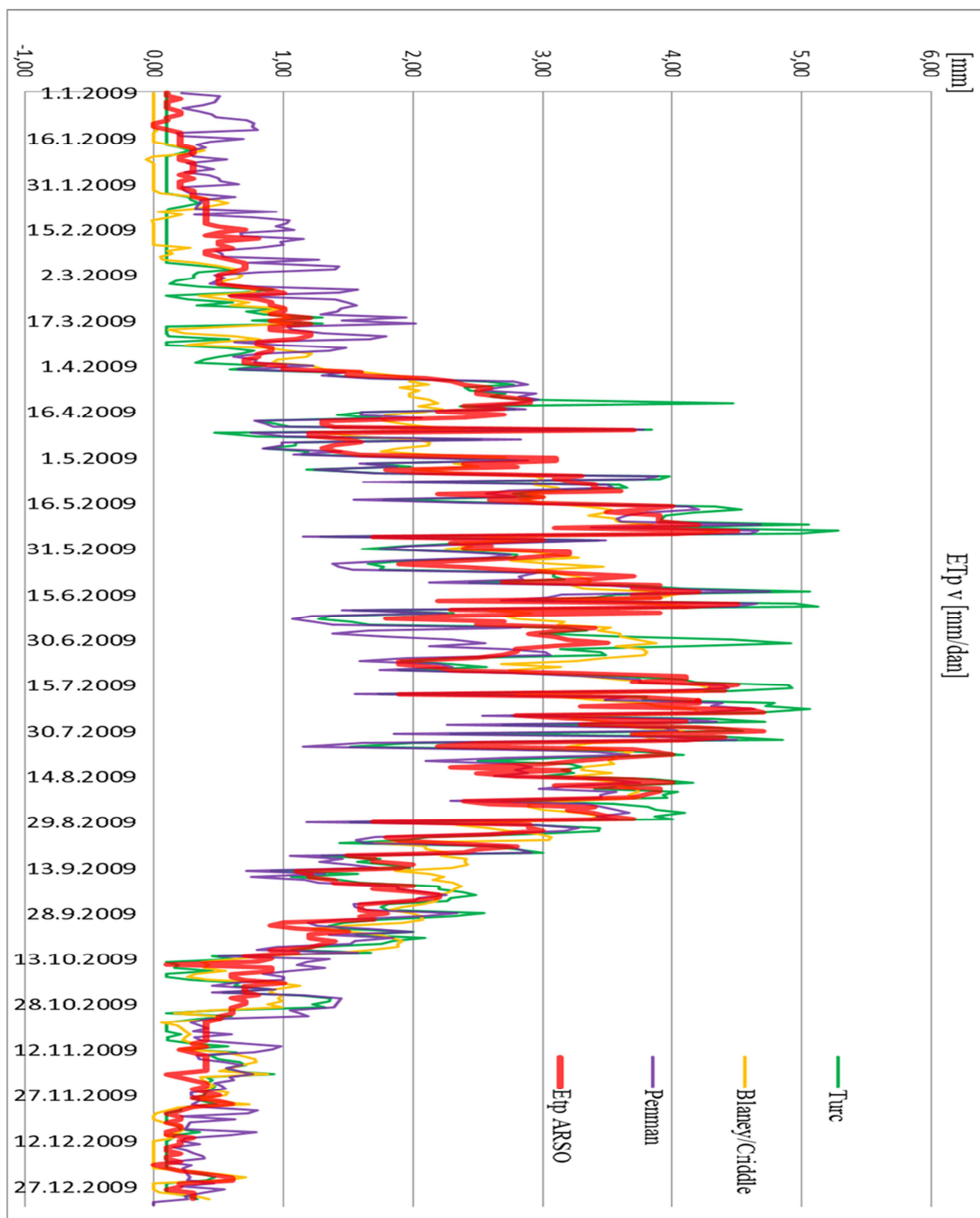
PRILOGA A	GRAFA DNEVNIH VREDNOSTI PADAVIN ZA LETO 2009 IN 2011 .....	A1
PRILOGA B	GRAFI DNEVNIH VREDNOSTI ETP ZA LETO 2009.....	B1
	Metode Turc, Blaney/Criddle, Penman.....	B1
	Metode Haude, Penman/Monteith za iglavce, Penman/Monteith-EPIC.....	B2
	Metode Wendling za obalna območja, Thornthwaite.....	B3
PRILOGA C	GRAFI DNEVNIH VREDNOSTI ETP ZA LETO 2011.....	C1
	Metode Turc, Blaney/Criddle, Penman.....	C1
	Metode Wendling za obalna območja, Thornthwaite.....	C2
	Metode Haude, Penman/Monteith za iglavce, Penman/Monteith-EPIC.....	C3
PRILOGA D	GRAFI ODTOKOV ZA LETO 2009.....	D1
PRILOGA E	GRAFI ODTOKOV ZA LETO 2011.....	E1

PRILOGA A GRAFA DNEVNIH VREDNOSTI PADAVIN ZA LETO 2009 IN 2011

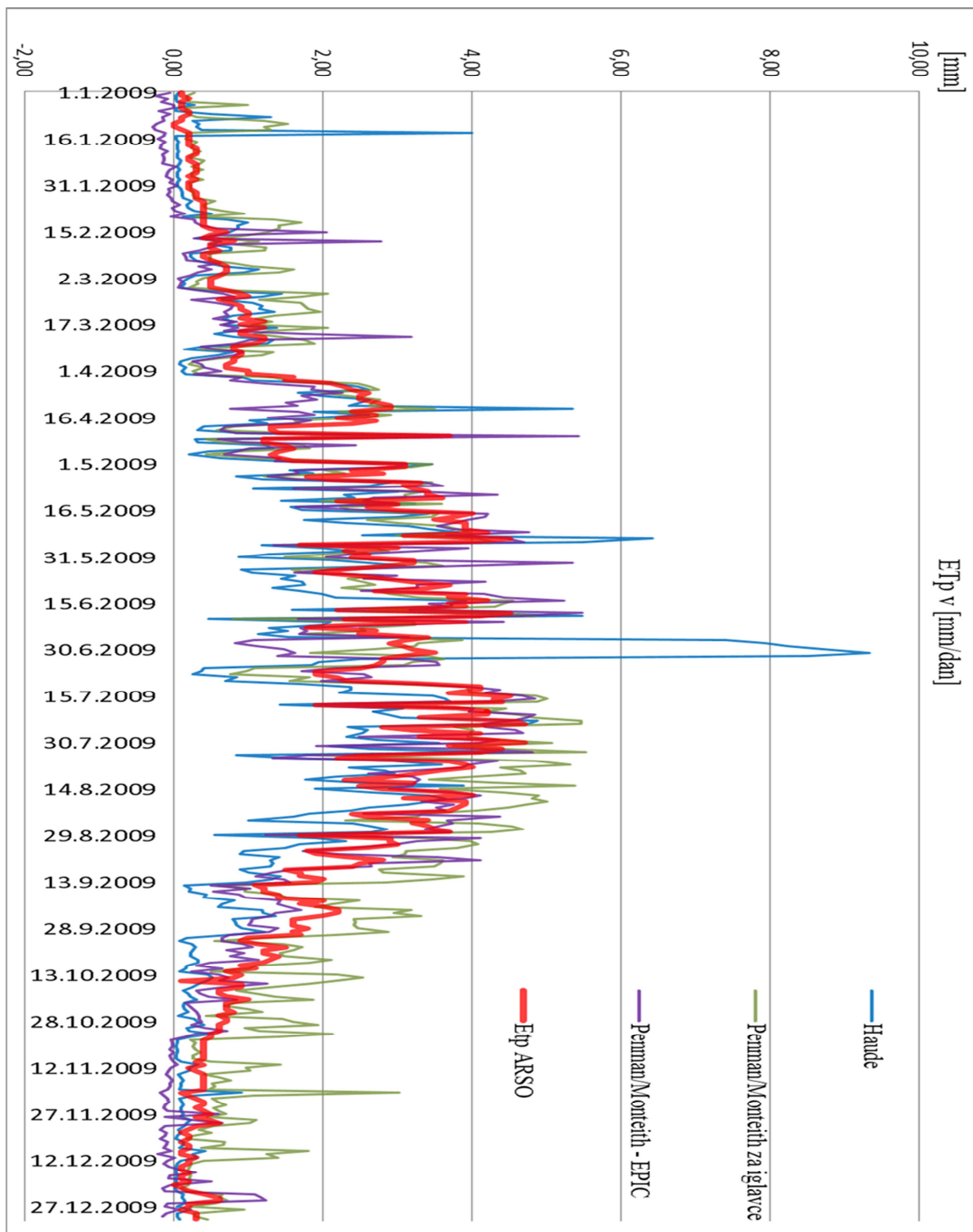


## PRILOGA B GRAFI DNEVNIH VREDNOSTI ETP ZA LETO 2009

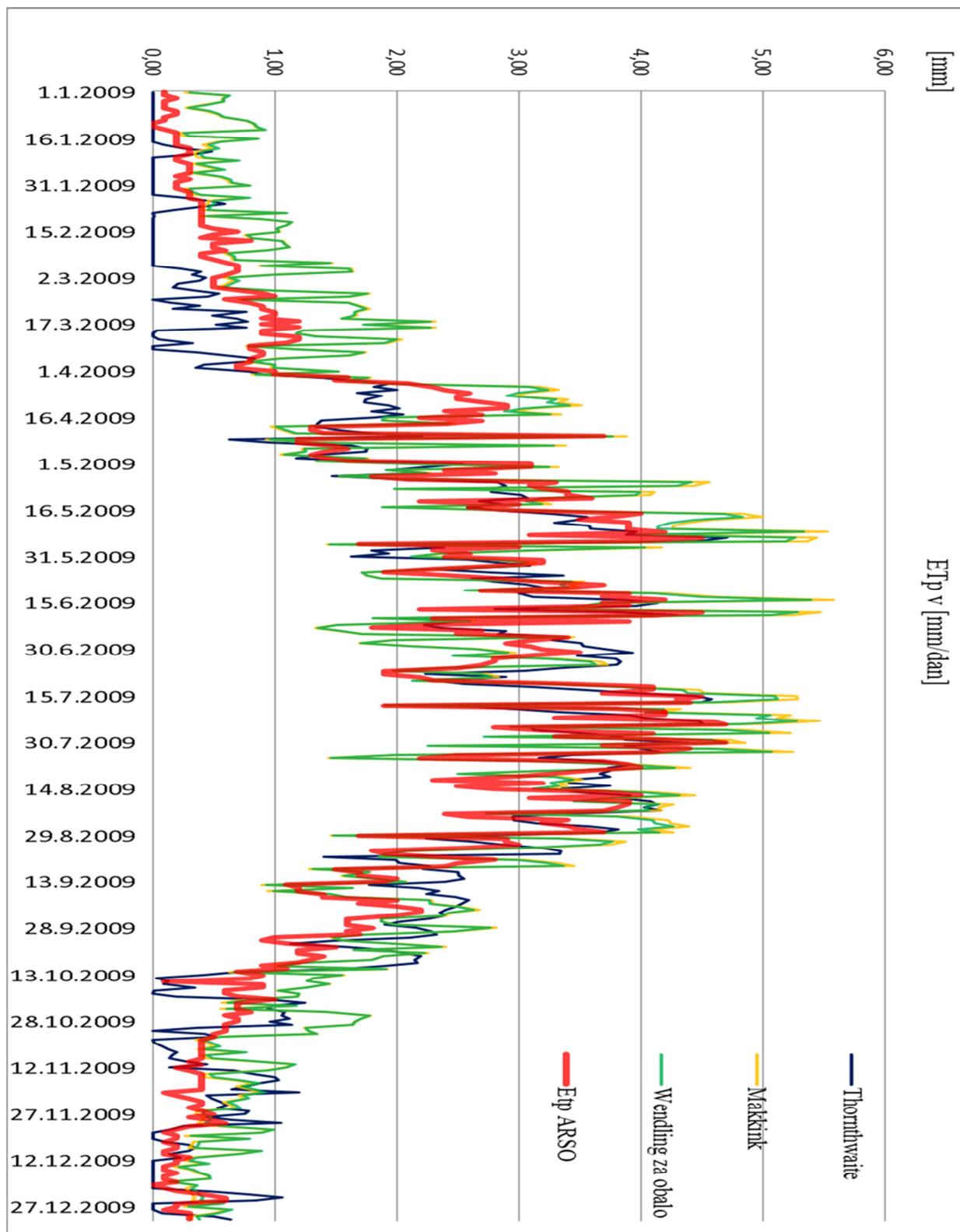
Metode Turc, Blaney/Criddle, Penman, E<sub>p</sub> ARSO.



Metode Haude, Penman/Monteith za iglavce, Penman/Monteith-EPIC.



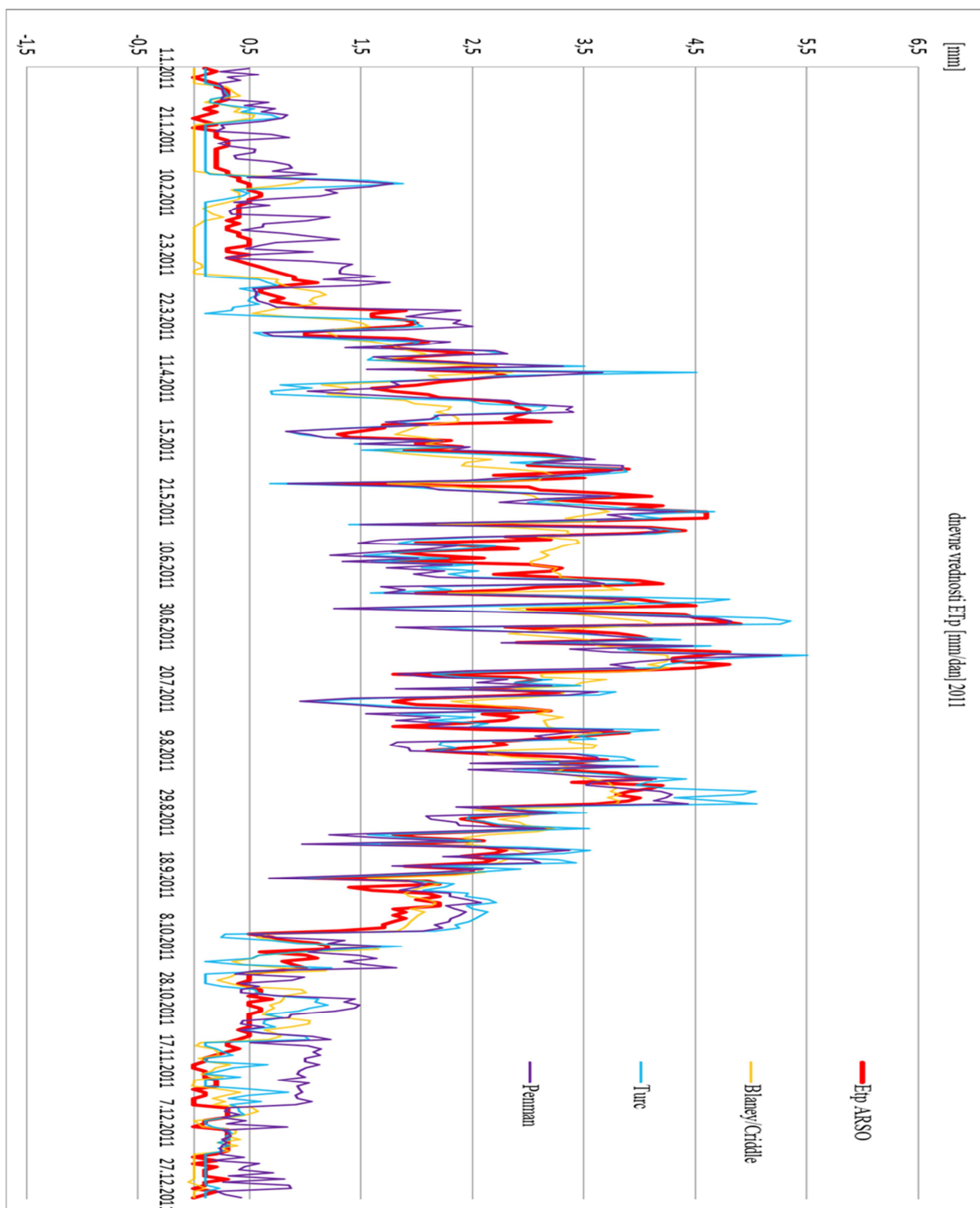
Metode Wendling za obalna območja, Thornthwaite.



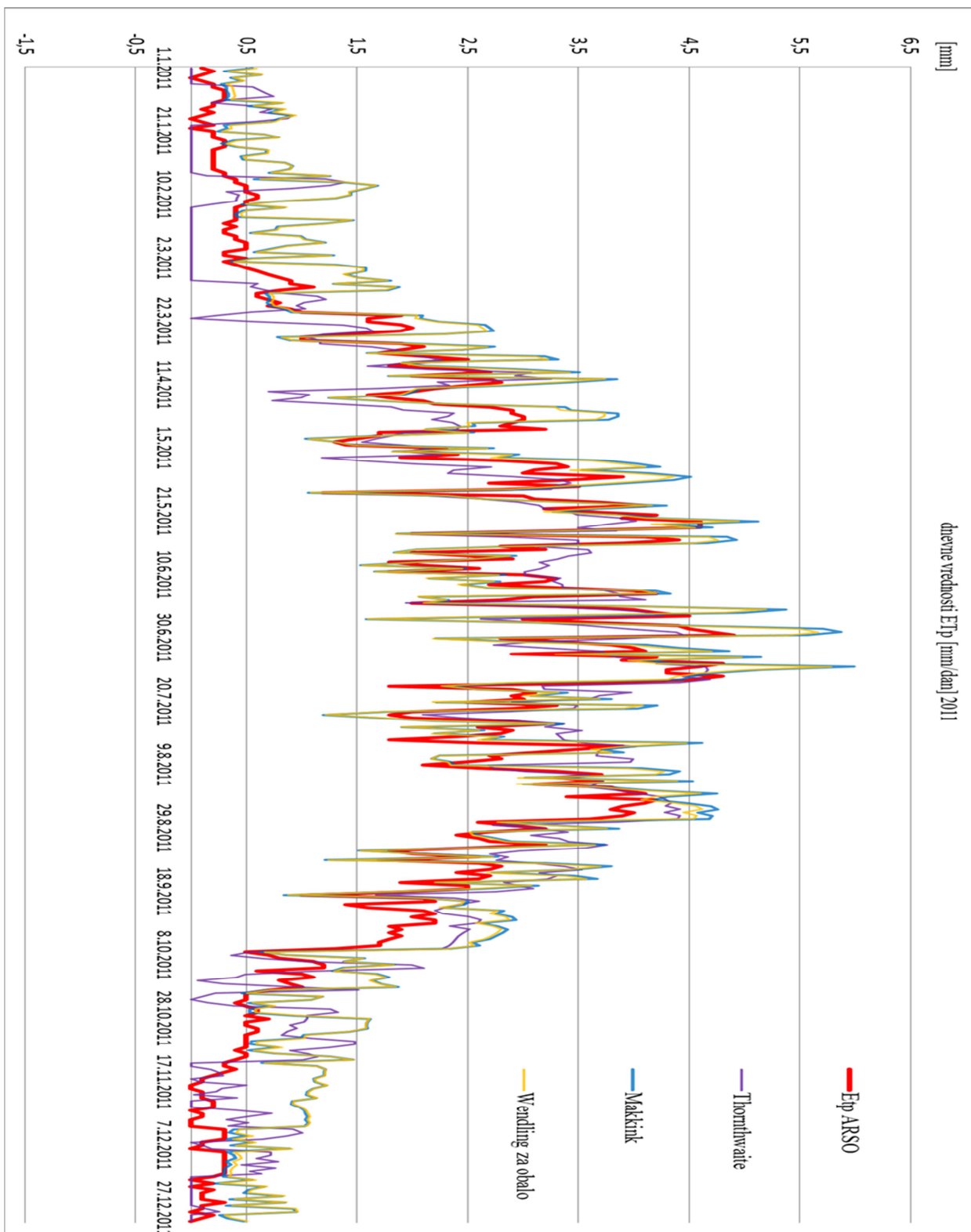


## PRILOGA C GRAFI DNEVNIH VREDNOSTI ETP ZA LETO 2011

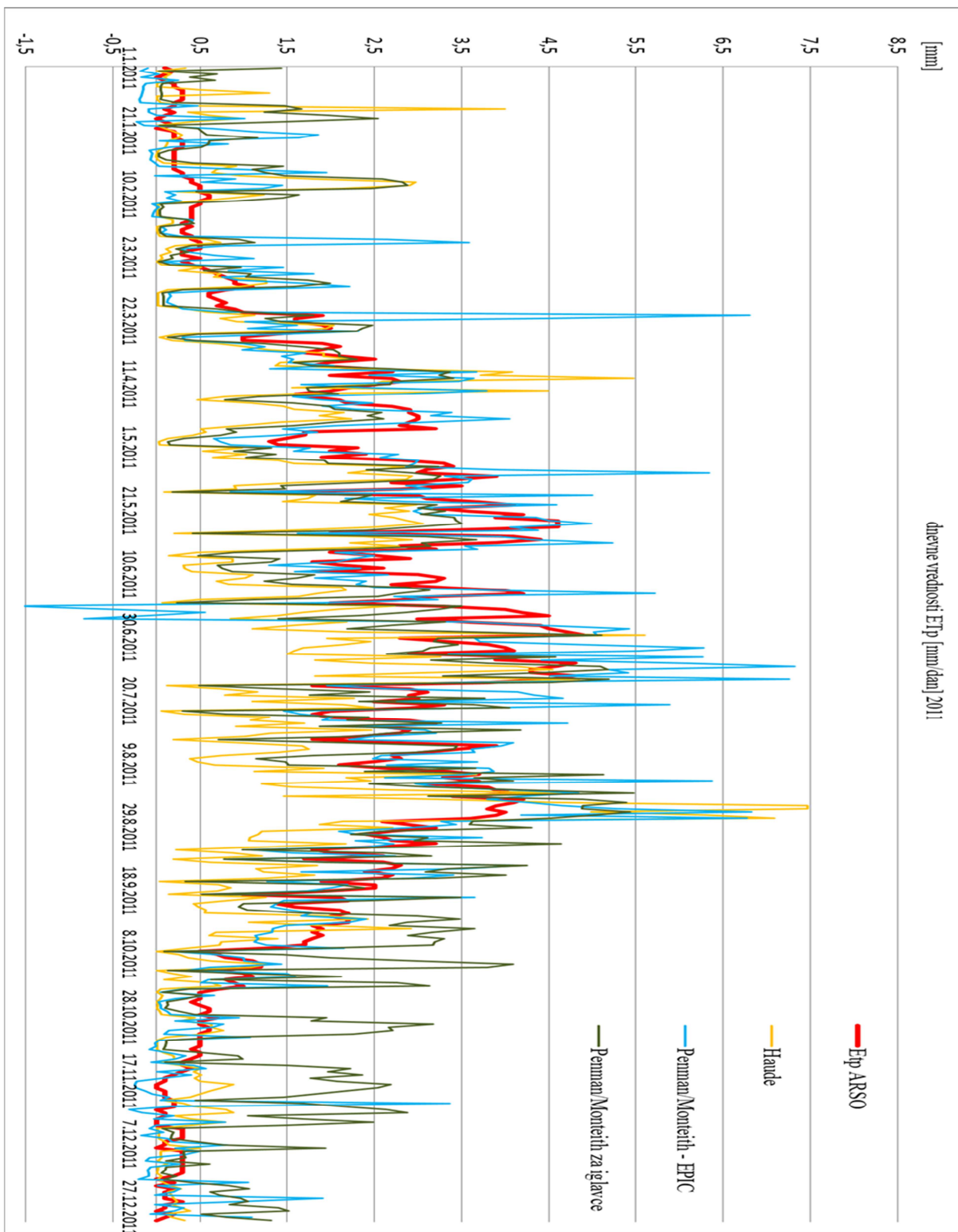
Metode Turc, Blaney/Criddle, Penman.



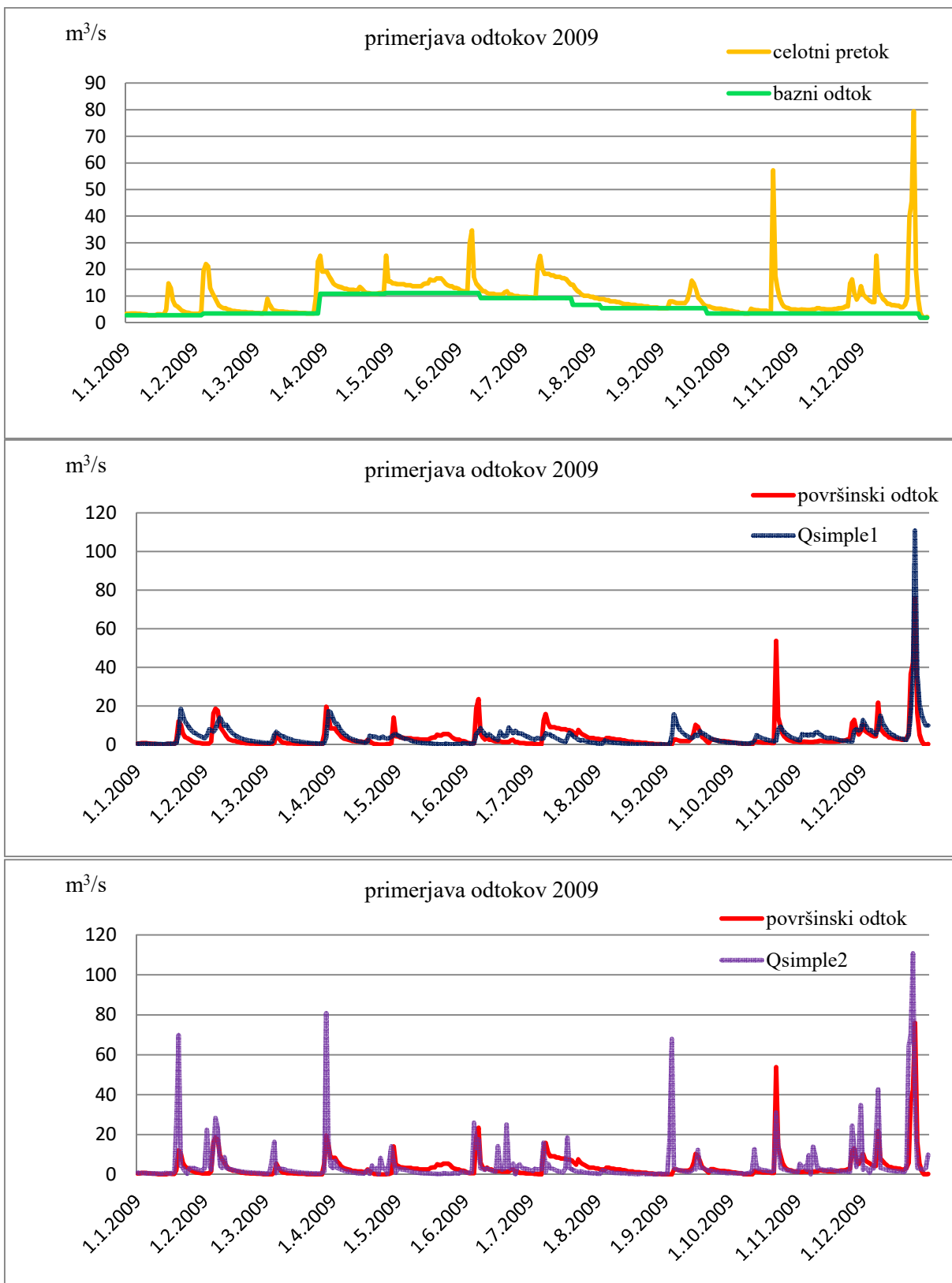
Metode Wendling za obalna območja, Thornthwaite.



Metode Haude, Penman/Monteith za iglavce, Penman/Monteith-EPIC.



PRILOGA D GRAFI ODTOKOV ZA LETO 2009



PRILOGA E GRAFI ODTOKOV ZA LETO 2011

