

UDK/UDC: 532.533:556.13(078.9)

Prejeto/Received: 16.03.2021

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 20.04.2021

DOI: [10.15292/acta.hydro.2021.06](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2021.06)

Objavljeno na spletu/Published online: 08.06.2021

## UPORABA HARGREAVESOVE METODE ZA IZRAČUN POTENCIALNE EVAPOTRANSPIRACIJE PRI HIDROLOŠKEM MODELIRANJU

### APPLICATION OF THE HARGREAVES METHOD FOR CALCULATING THE POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION IN THE HYDROLOGICAL MODELLING

Maja Koprivšek<sup>1</sup>, Anja Vihar<sup>1</sup>, Sašo Petan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

#### Izvleček

Z namenom izboljšanja rezultatov hidrološkega prognostičnega sistema Agencije Republike Slovenije za okolje, zlasti na porečjih z manjšim specifičnim odtokom (Pomurje) in ob visokovodnih dogodkih, ki sledijo daljšemu sušnemu obdobju, smo se odločili poiskati primerno metodo za izračun dnevnih vrednosti potencialne evapotranspiracije (*PET*). Izbirali smo med različnimi temperaturnimi metodami za izračun dnevnih vrednosti referenčne evapotranspiracije (*ET<sub>0</sub>*), rezultate katerih smo primerjali z izračunom po veliko kompleksnejši metodi Penman-Monteith na izbranih meteoroloških postajah. Vrednostim, izračunanim po Penman-Monteithovi enačbi, smo se najbolj približali z uporabo Hargreavesove metode, ki poleg povprečne dnevne temperature zraka upošteva tudi dnevni temperaturni razpon. Nato smo iz vrednosti *ET<sub>0</sub>* z upoštevanjem faktorja pokrovnosti tal izračunali vrednosti *PET* za uporabo v hidrološkem modeliranju. Naredili smo reanalizo modelskih postavitev za porečja Save, Soče in Mure ter na izbranih hidroloških postajah primerjali simulirani pretok z merjenim. Pri tem smo kot vhodni podatek za *PET* na modelskih podporečjih prvič upoštevali klimatološke mesečne vrednosti, ki se že vrsto let uporabljajo pri operativnem delovanju hidrološkega prognostičnega sistema Agencije Republike Slovenije za okolje, drugič pa dnevne vrednosti, izračunane po metodi Hargreaves, z uporabo urnih vrednosti temperature zraka 2 m nad tlemi, ki so bile izračunane z modelom za kratkoročno napoved vremena ALADIN oz. meteorološkega sistema INCA/AT. Na vseh izbranih računskih točkah so modelske postavitve z dnevnimi vrednostmi *PET* izkazale večjo uspešnost pri simulaciji pretokov v primerjavi z modelskimi postavitvami s klimatološkimi mesečnimi vrednostmi.

**Ključne besede:** Hargreavesova metoda, potencialna evapotranspiracija, hidrološko modeliranje, faktor rastlin, hidrološki prognostični sistem, analiza modelske uspešnosti.

#### Abstract

To improve the results of the Slovenian Environment Agency's hydrological forecasting system, especially in the river basins with lower specific runoff (Pomurje) and during high water events following a long dry period, we decided to find a good method for calculating daily values of the potential evapotranspiration (*PET*). We were deciding between several temperature-based methods for the daily reference evapotranspiration (*ET<sub>0</sub>*)

---

<sup>1</sup> Stik / Correspondence: [maja.koprivsek@gov.si](mailto:maja.koprivsek@gov.si)

© Koprivšek M. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Koprivšek M. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence](#).

values calculation. For selected meteorological stations we calculated  $ET_0$  using three different methods and then compared them to the  $ET_0$  values calculated using the much more complex Penman-Monteith method. Among the tested temperature methods the results given by the Hargreaves method fitted best to the results of the Penman-Monteith method. The reason for this may lie in the fact that the Hargreaves method, besides the mean daily air temperature as other temperature-based methods, considers the daily temperature range as well. Afterwards, considering the ground cover factor, we calculated the  $PET$  values from the  $ET_0$  values and then applied them in the hydrological modelling. The model setups for the Sava, Soča, and Mura Rivers were reanalysed twice, considering firstly the climatologic monthly  $PET$  values that were already used in the hydrological forecasting system of the Slovenian Environment Agency for many years, and, secondly the daily  $PET$  values calculated according to the Hargreaves method and using hourly air temperature 2 m above the ground, originating from the short-term weather forecasting model ALADIN or the INCA/AT meteorological system. At all selected calculation points, the model setups using daily  $PET$  values showed better performance over the model setups using climatological monthly values.

**Keywords:** Hargreaves method, potential evapotranspiration, hydrological modelling, crop factor, hydrological forecasting system, model performance analysis.

## 1. Uvod

Potencialna evapotranspiracija ( $PET$ ) je eden izmed ključnih vhodnih podatkov v hidroloških modelih, njena pravilna ocena pa je še posebej pomembna na območjih z relativno majhno količino padavin oz. v sušnem obdobju, ko evapotranspiracija predstavlja velik delež vodne bilance. Zaradi zahtevnih meritev in velike prostorske spremenljivosti se  $PET$  običajno ne meri, ampak se določi po eni izmed številnih uveljavljenih metod za izračun referenčne evapotranspiracije ( $ET_0$ ) in z upoštevanjem faktorja rastlin ( $K_c$ ). Bormann (2011) deli enačbe za izračun  $ET_0$  glede na koncept:

- aerodinamični koncept (upoštevanje zračne vlage in hitrosti vetra),
- metode na osnovi temperature zraka,
- metode na osnovi sončnega sevanja (upoštevanje sončnega sevanja in temperature zraka) ter
- kombinirane metode.

Organizacija Združenih narodov za prehrano in kmetijstvo (FAO) priporoča za izračun  $ET_0$  za potrebe namakanja izključno uporabo Penman-Monteithove enačbe (Allen et al., 1998), ki spada med kombinirane metode. Pri tej metodi potrebujemo podatke o temperaturi zraka, sončnem obsevanju, relativni zračni vlagi in hitrosti vetra za izbrano lokacijo oziroma računsko območje. Tudi če katerega izmed potrebnih merjenih fizikalnih

parametrov ni na razpolago, FAO najprej predlaga njihovo oceno, šele kot drugo alternativo pa predlaga izračun  $ET_0$  po Hargreavesovi enačbi (Hargreaves in Samani, 1985). V hidrologiji se poleg Hargreavesove enačbe zaradi pomanjkanja meritev posameznih fizikalnih parametrov in zaradi enostavnega izračuna uporabljajo še številne druge metode.

Številni avtorji (Allen et al., 1998; Sperna Weiland et al., 2012; Bormann, 2011; Lang et al., 2017) so primerjali različne metode izračuna  $ET_0$  in ugotovili, da so za različna klimatska območja optimalne različne metode, pri čemer večina metod omogoča tudi umerjanje parametrov enačbe glede na klimatsko območje. Ob izboru optimalne metode za posamezno območje in umeritvi njenih parametrov pa rezultati bistveno ne zaostajajo za veliko kompleksnejšo Penman-Monteithovo metodo (Sperna Weiland et al., 2012; Oudin et al., 2005; Kovačec in Šraj, 2012). Sperna Weiland s sod. (2012) na primer predlaga uporabo rekalkibrirane Hargreavesove enačbe, ki se najbolj približa izračunom po Penman-Monteithovi enačbi in je v primerjavi z originalno Hargreavesovo metodo (Hargreaves in Samani, 1985; Hargreaves et al., 2003) in metodo Blaney-Criddle (Blaney in Criddle, 1950) veliko manj občutljiva na klimatska območja ter zato primerna tudi v študijah klimatskih sprememb. Oudin s sod. (2005) pa je primerjal uspešnost 27 različnih enačb za izračun  $ET_0$  in ugotovil, da se najboljše izkažejo metode:

McGuinness, Kimberly Penman, Jensen-Haise, Hamon in Penman-Monteith. Enačbi McGuinness in Jensen-Haise imata enako zasnovo, le različna koeficienta, ki ju je prilagodil na podlagi umerjanja 308 porečij v različnih klimatskih območjih s štirimi različnimi hidrološkimi modeli in izpeljal svojo različico enačbe. Med priljubljenimi enačbami za izračun  $ET_0$  v hidrologiji je tudi enačba Blaney-Criddle in njena modificirana verzija (Schrödter, 1985), ki se uporablja predvsem v srednji Evropi.

Namen naše raziskave, ki smo jo opravili v okviru čezmejnega slovensko-avstrijskega projekta CROSSRISK, je bil izbrati optimalno metodo za izračun  $PET$ , upoštevajoč zanesljivost in enostavnost, za operativno rabo v hidrološkem prognostičnem sistemu (HPS) Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) (Petan et al., 2016) tako na slovenskih porečjih kot tudi porečjih sosednjih držav, ki prispevajo k pretoku slovenskih rek.

Do sedaj so bile v HPS ARSO uporabljene klimatološke mesečne vrednosti  $PET$ . Njihova pomanjkljivost je, da ne upoštevajo dejanskih vremenskih pogojev. Tako lahko precej odstopajo od dejanskih vrednosti  $PET$  predvsem takrat, ko se vremenske razmere dalj časa bistveno razlikujejo od klimatološkega povprečja. Zato smo se odločili poiskati metodo za izračun dnevnih vrednosti  $PET$  na osnovi meteoroloških podatkov ali napovedi ob upoštevanju pokrovnosti tal, ki bi bila primerna za vsa slovenska in tudi čezmejna porečja, ki so del HPS ARSO. Pri tem smo se osredotočili le na temperaturne metode, ki po zanesljivosti rezultatov večinoma ne zaostajajo za kompleksnejšimi metodami (Sperna Weiland et al., 2012; Oudin et al., 2005) in so najpogostejše zastopane v literaturi v povezavi s hidrološkim modeliranjem. Poleg tega pa v HPS ARSO že imamo na voljo zgodovinske nize kot tudi napovedi temperature zraka za vsa modelska porečja.

Pred leti smo preučili tudi možnost uporabe napovedi  $PET$  vremenskega modela ALADIN, ki smo jo aplicirali na testnih modelskih postavitvah Soče in Save. Z uvedbo tega vira nismo dosegli želenih izboljšav modelskih rezultatov. Napovedi  $PET$  so bile podcenjene z izrazito nehomogenimi odstopanji po prostoru, hidrološke napovedi pa posledično precenjene. Zato smo ti dve testni

postavitev sčasoma opustili. V okviru projekta CROSSRISK smo na porečjih v Pomurju ponovno primerjali vrednosti  $PET$  vremenskega modela ALADIN med letoma 2014 in 2018 s klimatološkimi vrednostmi  $PET$ . Ugotovili smo velika odstopanja: letne vsote  $PET$  modela Aladin so bile povprečno za 25 % nižje od klimatoloških vrednosti, pri čemer so bile razlike izrazitejšje v hladnejšem delu leta. Zato smo ta vir  $PET$  trenutno ocenili kot neprimeren za nadaljnjo uporabo v HPS ARSO.

Eden od možnih virov  $PET$  bi bila tudi Agrometeorološka napoved (ARSO, 2021; Žust, 2017), ki jo na spletnih straneh ARSO od leta 2018 objavlja Oddelek za meteorološko podporo kmetijstvu. Napoved dnevnih vsot  $ET_0$  za 10 dni naprej je izračunana na podlagi Penman-Monteithove enačbe za 15 slovenskih regij. Žal pa je računska mreža agrometeoroloških napovedi preredka glede na zasnovo hidroloških modelov HPS ARSO; povprečna velikost agrometeorološke regije je namreč 1350 km<sup>2</sup>, medtem ko je povprečna velikost podporečij v HPS ARSO med 98 km<sup>2</sup> na modelu Slovenije in 270 km<sup>2</sup> na modelu Save. Poleg tega pokriva le območje Slovenije, zaradi česar je ne moremo uporabiti na čezmejnih porečjih. Zato smo tudi ta vir trenutno ocenili kot neprimeren za nadaljnjo uporabo v HPS ARSO. Njegova uporaba bi bila kvečjemu primerna v hidroloških modelih slovenskih porečij z večjimi podporečji in majhno prostorsko spremenljivostjo v izhlapevanju, na primer na ravninskih območjih.

## 2. Metode

### 2.1. Izračun dnevnih vrednosti $ET_0$

Pri izračunu dnevnih vrednosti  $ET_0$  smo se omejili na tri temperaturne metode, ki so v nadaljevanju tega poglavja podrobneje predstavljene. Dnevne vrednosti  $ET_0$  smo po vseh treh metodah izračunali na osnovi podatkov iz meteoroloških postaj Murska Sobota, Ljubljana Bežigrad in Portorož v obdobju 2010–2018. Zaradi pomanjkanja merjenih podatkov  $ET_0$  smo te vrednosti nato primerjali z izračunanimi vrednostmi po splošno uveljavljeni metodi Penman-Monteith. Za nadaljnjo rabo smo izbrali tisto temperaturno metodo, ki se je glede na merila

uspešnosti (poglavje 2.4) najbolj približala izračunom po Penman-Monteithovi metodi.

### 2.1.1 Blaney-Criddle (prilagojena po Shrödterju)

Izvirna enačba Blaney-Criddle je bila vzpostavljena leta 1950 za aridna in semiaridna območja ZDA, mi pa smo uporabili različico, ki jo je leta 1985 Shrödter prilagodil za območje Nemčije (Bormann, 2011) in je naslednje oblike:

$$ET_0 = -1,55 + 0,96 \cdot sd \cdot (0,457 \cdot T + 8,128) \quad (1)$$

kjer  $ET_0$  predstavlja dnevno vsoto evapotranspiracije v mm,  $sd$  predstavlja razmerje med svetlimi urami posameznega dne in letno vsoto svetlih ur v odstotkih,  $T$  pa povprečno dnevno temperaturo zraka 2 m od tal v °C.

### 2.1.2 Oudin

Oudinova enačba (Oudin et al., 2003) je naslednje oblike:

$$ET_0 = \frac{R_e}{\lambda \rho} \cdot \frac{(T_a + 5)}{100} \quad (2)$$

kjer je  $T_a$  povprečna dnevna temperatura zraka 2 m od tal [°C],  $R_e$  sončno obsevanje zunaj Zemljine atmosfere [MJ/m<sup>2</sup> dan],  $\lambda$  latentna toplota izhlapevanja (privzeta je konstantna vrednost 2,45 MJ/kg pri 20 °C) in  $\rho$  gostota vode (privzeta je konstantna vrednost 1000 kg/m<sup>3</sup>). Enačba velja, če je  $T_a + 5 > 0$ , drugače pa je  $ET_0$  enak 0.

### 2.1.3 Hargreaves in Samani

Enačba Hargreavesa in Samanija iz leta 1985 ima naslednjo obliko:

$$ET_0 = 0,0023 \cdot R_a \cdot (TC + 17,8) \cdot TR^{0,5} \quad (3)$$

kjer  $R_a$  predstavlja sončno obsevanje zunaj Zemljine atmosfere [mm/dan],  $TC$  povprečno dnevno temperaturo zraka 2 m od tal [°C] in  $TR$  dnevni razpon temperature zraka 2 m od tal [°C]. Vrednosti sončnega obsevanja zunaj Zemljine atmosfere  $R_e$  so običajno v enotah [MJ/m<sup>2</sup> dan], zato smo jih preračunali z enačbo (4).

$$R_a = \frac{R_e}{\lambda \rho} \quad (4)$$

kjer imata  $\lambda$  in  $\rho$  enak pomen (in privzete vrednosti) kot pri metodi Oudina (poglavje 2.1.2).

### 2.1.4 Podatkovni viri

Podatke za izračun  $ET_0$  po temperaturnih metodah smo pridobili iz naslednjih virov:

- dolžino svetlega dela dneva smo pridobili s sončnim kalkulatorjem (Time and Date AS, 2019),
- sončno sevanje zunaj Zemljine atmosfere smo pridobili s spletne strani SoDa (Wald et al., 2004),
- povprečno dnevno temperaturo zraka in dnevni razpon temperature zraka smo izračunali iz urnih vrednosti temperature vremenskega modela ALADIN oz. meteorološkega sistema INCA/AT.

## 2.2 Določitev faktorja pokrovnosti tal

Referenčna evapotranspiracija ( $ET_0$ ) velja za standardno travno rušo, višine 12 cm, z albedom 0,23 in fiksnim površinskim koeficientom trenja 70 s/m (Allen et al., 1998). Za uporabo v hidrološkem modeliranju pa potrebujemo  $PET$ , ki jo Mikoš et al. (2002) definira kot največjo količino vode, ki lahko v določenih podnebnih razmerah izhlapi z neprekinjenega območja, v celoti prekrita z rastlinstvom in dobro oskrbljenega z vodo. FAO odsvetuje uporabo izraza  $PET$  in predlaga uporabo izraza evapotranspiracija rastlin pri standardnih pogojih ( $ET_C$ ) (Cesar in Šraj, 2012).  $ET_C$  dobimo tako, da  $ET_0$  pomnožimo s faktorjem rastlin (angl. *crop factor*). Ker pa v hidrološkem modeliranju potrebujemo podatek o največji količini vode, ki lahko v določenih podnebnih razmerah izhlapi s celotnega porečja, ne le dela porečja, prekrita z rastlinstvom, v svoji analizi vseeno uporabljamo izraz  $PET$ , faktor rastlin ( $K_C$ ) pa iz istega razloga imenujemo faktor pokrovnosti tal, saj ga ocenjujemo tudi za gola tla in vodne površine. Pri določitvi vrednosti  $K_C$  smo upoštevali šest različnih vrst pokrovnosti tal, ki smo jih določili glede na kategorije pokrovnosti tal Corine land cover (CLC) iz leta 2018 (EEA, 2019) z združevanjem 3. nivoja CLC, kot je prikazano v preglednici 1.

**Preglednica 1:** Razvrstitev kategorij Corine land cover, ki so zastopane v modelskih porečjih Mure, Save in Soče, v 6 tipov pokrovnosti tal za določitev faktorja pokrovnosti tal.

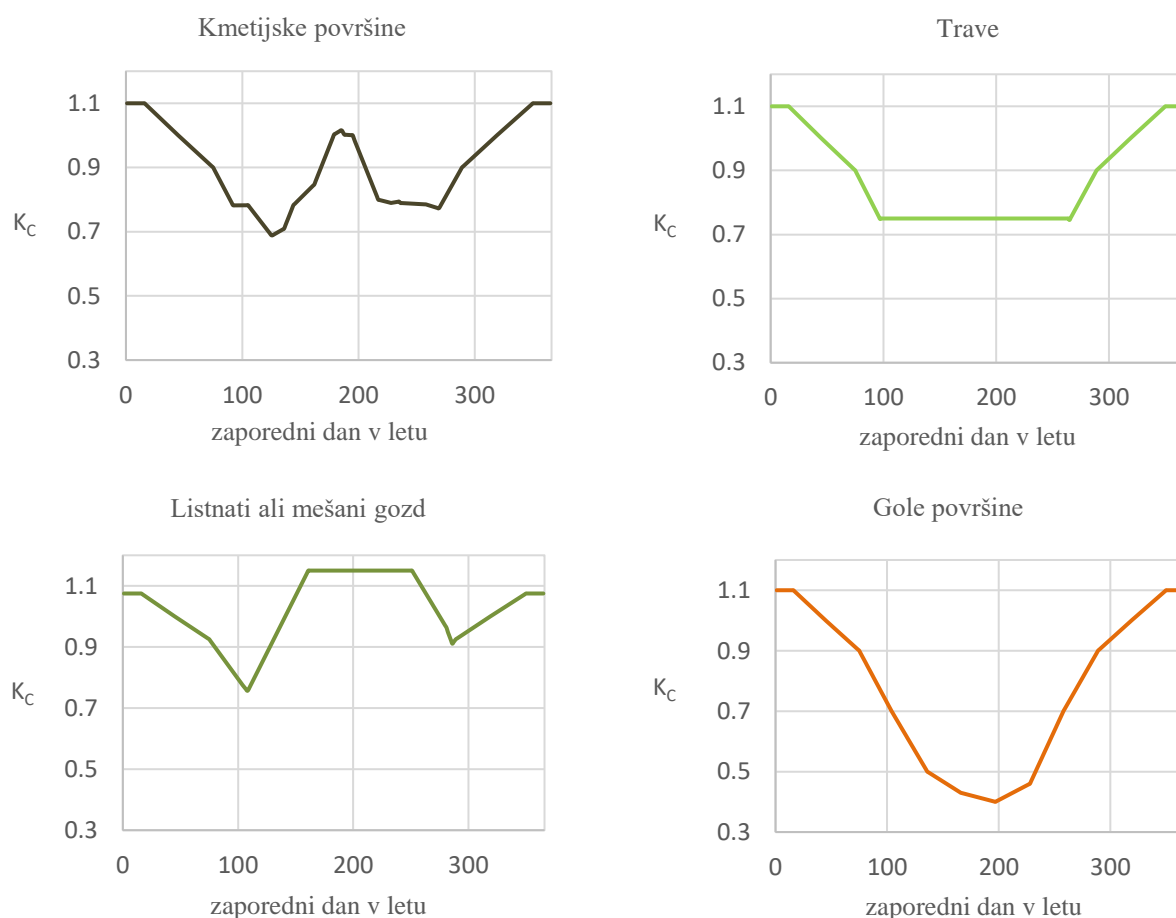
**Table 1:** Classification of the Corine land cover categories present within the Mura, Sava and Soča River catchments into 6 land use types for land use factor determination.

TIP POKROVNOSTI TAL	KODA CLC	IME KATEGORIJE CLC
gole površine	111	neprekinjene mestne površine ( <i>continuous urban fabric</i> )
	112	prekinjene mestne površine ( <i>discontinuous urban fabric</i> )
	121	industrijske ali poslovne površine ( <i>industrial or commercial units</i> )
	122	cestna in železniška omrežja ter pripadajoča zemljišča ( <i>road and rail networks and associated land</i> )
	124	letališča ( <i>airports</i> )
	131	kamnolomi ( <i>mineral extraction sites</i> )
	132	odlagališča ( <i>dump sites</i> )
	133	gradbišča ( <i>construction sites</i> )
	331	plaže, sipine, pesek ( <i>beaches, dunes, sands</i> )
	332	gole skale ( <i>bare rocks</i> )
	333	redko obrasle površine ( <i>sparsely vegetated areas</i> )
	335	ledeniki in večni sneg ( <i>glaciers and perpetual snow</i> )
trava	141	mestne zelene površine ( <i>green urban areas</i> )
	142	površine za šport in prosti čas ( <i>sport and leisure facilities</i> )
	231	pašniki ( <i>pastures</i> )
	243	pretežno kmetijske površine z znatnim deležem naravne vegetacije ( <i>land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation</i> )
	321	naravna travnišča ( <i>natural grasslands</i> )
	322	barja in puščave ( <i>moors and heathlands</i> )
kmetijske površine	211	nenamakane obdelovalne površine ( <i>non-irrigated arable land</i> )
	221	vinogradi ( <i>vineyards</i> )
	222	nasadi sadnega drevja in jagodičja ( <i>fruit trees and berry plantations</i> )
	242	mešane obdelovalne površine ( <i>complex cultivation patterns</i> )
listnati ali mešani gozd	311	listnati gozd ( <i>broad-leaved forest</i> )
	313	mešani gozd ( <i>mixed forest</i> )
	324	prehodni gozd – grmičevje ( <i>transitional woodland-shrub</i> )
iglasti gozd	312	iglasti gozd ( <i>coniferous forest</i> )
voda ali močvirja	411	močvirja ( <i>inland marshes</i> )
	412	šotišča ( <i>peat bogs</i> )
	421	somorna močvirja ( <i>salt marshes</i> )
	511	vodotoki ( <i>water courses</i> )
	512	stoječe vode ( <i>water bodies</i> )

Na sliki 1 so prikazane vrednosti  $K_C$  v odvisnosti od zaporednega dne v letu za posamezne kategorije pokrovnosti tal. Vrednost  $K_C$  za gole površine je odvisna od povprečne dnevne vrednosti  $ET_0$  in števila zaporednih dni brez pomembnih padavin (Snyder et al., 2007; Allen et al., 1998). Pri tem se padavine štejejo kot pomembne, kadar je njihova dnevna vsota večja od povprečne dnevne evapotranspiracije. Za vsa modelska porečja HPS ARSO smo privzeli enotno vrednost  $K_C$  za gole površine v odvisnosti od zaporednega dne v letu. Vrednosti tega faktorja smo ocenili na podlagi grafikonov, ki so jih objavili Snyder et al. (2007) ter Allen et al. (1998), pri čemer smo privzeli pojavnost pomembnih padavin na 4–7 dni in upoštevali povprečje klimatoloških vrednosti  $ET_0$  za Slovenijo. Vrednosti  $K_C$  za gole površine smo upoštevali tudi pri travnikih, gozdovih in kmetijskih površinah v času zunaj vegetacijskega obdobja.

Kot osnovo faktorja  $K_C$  za trave smo upoštevali dolgoletno povprečje  $K_C$  trav za košnjo na območju Pomurja (ARSO, 2019). Ta faktor niha med 0,6 takoj po košnji in 0,8 ob vsakem klasenju (ob prvem klasenju 0,9). Ker pa se košnje prostorsko ne izvajajo istočasno in ker so v kategorijo »trave« zajeti tudi pašniki, smo v času vegetacijskega obdobja upoštevali povprečno vrednost  $K_C$  za trave.

Povprečno vrednost  $K_C$  za kmetijske površine smo privzeli iz izračuna za avstrijski in slovenski del porečja Mure v sklopu projekta CROSSRISK, saj je sestava poljščin drugod po Sloveniji podobna. Za izhodišče smo vzeli dolgoletno povprečje  $K_C$  za posamezne faze rasti za pšenico in koruzo na območju Pomurja (ARSO, 2019) ter sladkorno peso (Allen et al., 1998). Pri izračunu skupnega faktorja za kmetijske površine smo upoštevali tudi zamik v vegetacijskih fazah posameznih poljščin.



**Slika 1:** Faktor pokrovnosti tal  $K_C$  v odvisnosti od zaporednega dne v letu za različne tipe pokrovnosti tal.

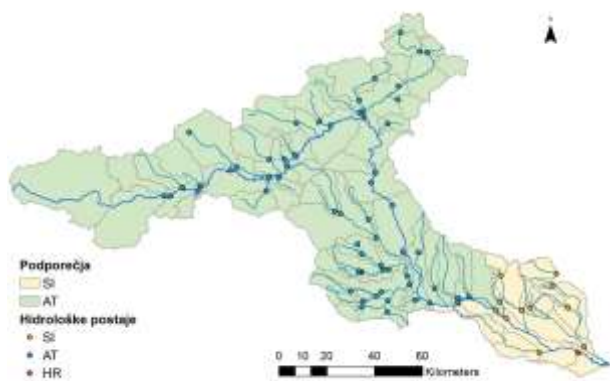
**Figure 1:** Land use factor  $K_C$  for different land use types depending on the consecutive day of the year.

Za iglasti gozd, vodne in močvirnate površine smo privzeli konstantno vrednost  $K_C = 1$  za vse leto (Allen et al., 1998). Izhlapevanje z vodnih površin je sicer močno odvisno od temperature vode, vetra in zračne vlage (WMO, 2008), vendar je delež teh površin na porečjih HPS ARSO relativno majhen.

### 2.3 Izračun $PET$ za uporabo v HPS ARSO

Izbrano temperaturno metodo za izračun  $ET_0$  smo uporabili pri eni od modelskih postavitv Mure (slovenski in avstrijski del porečja), Save in Soče. Modelske postavitve Sava in Soča je podrobno opisal Petan et al. (2016), modelsko postavitev Mure pa predstavljamo v nadaljevanju.

V sklopu projekta CROSSRISK smo nadgradili modelsko postavitev slovenskega in avstrijskega dela porečja Mure. Modelsko območje je razdeljeno na 78 modelskih podporečij, od tega 61 v Avstriji in 17 v Sloveniji (slika 2). Srednja velikost podporečij je okoli 150 km<sup>2</sup>, topografija posameznega podporečja pa je opisana s 100-metrskimi višinskimi conami.



**Slika 2:** Prikaz modelskih podporečij na slovenskem in avstrijskem delu porečja Mure.

**Figure 2:** Model subcatchment distribution in the Slovenian and the Austrian part of the Mura River basin.

Umerjanje parametrov hidrološkega modela je bilo opravljeno ročno za vsako podporečje glede na izmerjene vrednosti pretokov na hidroloških postajah. Pri tem smo skušali doseči čim višjo vrednost koeficienta determinacije ob čim boljšem ujemanju vodne bilance. Dodatno smo upoštevali tudi ujemanje hidrogramov, tako v času

visokovodnih konic kot tudi v obdobju nizkovodnih vrednosti. Kot vhodne podatke smo uporabili časovne nize padavin iz slovenske in avstrijske mreže meteoroloških postaj ter časovna niza temperatur in kratkovalovnega sončnega sevanja meteorološkega sistema INCA/AT med letoma 2012 in 2018. Podporečjem brez hidrološke postaje smo sprva priredili parametre glede na podobna oz. bližnja podporečja, nato pa smo te parametre prilagodili ob umerjanju enote združenih podporečij, ki ima hidrološko postajo na iztoku.

Vzpostavili smo dve modelski postavitvi Mure, od katerih prva upošteva klimatološke vrednosti  $PET$ , druga pa dnevne vrednosti  $PET$ , izračunane iz temperature zraka po izbrani metodi. Pri tem smo za vsako podporečje v vseh modelskih postavitvah določili faktor pokrovnosti tal ( $K_C$ ) v odvisnosti od zaporednega dne v letu in deležev pokrovnosti tal glede na kategorije CLC iz leta 2018. Enako smo pristopili tudi pri modelskih postavitvah Save in Soče.

Za celotno modelsko porečje Mure smo privzeli vrednosti zunaj atmosferskega sevanja za Gradec, za modelski porečji Save in Soče pa vrednosti za Ljubljano, saj so spremembe vrednosti znotraj porečij tako majhne, da praktično ne vplivajo na izračun  $ET_0$ .

### 2.4 Merila uspešnosti

Ujemanje dnevni vrednosti  $ET_0$ , izračunanih po izbranih temperaturnih metodah, z vrednostmi, izračunanimi po splošno uveljavljeni metodi Penman-Monteith, kot tudi ujemanje urnih vrednosti simuliranega pretoka z izmerjenimi vrednostmi pretoka smo ovrednotili s kvadratom Pearsonovega korelacijskega koeficienta oz. koeficientom determinacije ( $R^2$ ) in Nash-Sutcliffovim koeficientom ( $NS$ ) modelske uspešnosti (Nash in Sutcliffe, 1970), ki sta pogosto uporabljena pri tovrstnih hidroloških analizah. Pri vrednotenju uspešnosti smo upoštevali tudi:

- ponderirani koeficient determinacije  $\omega R^2$ , ki poleg raztrosa vrednosti upošteva tudi naklon trendne linije  $b$  in tako omogoča celovitejše vrednotenje modelskih rezultatov (Krause et al., 2005) in ga izračunamo po naslednji enačbi:



$$\omega R^2 = \begin{cases} |b| \cdot R^2 & \text{za } b \leq 1 \\ |b|^{-1} \cdot R^2 & \text{za } b > 1 \end{cases} \quad (5)$$

- prilagojeni Nash-Sutcliffeffov koeficient  $NS_I$  (zgolj pri vrednotenju ujemanja pretokov), ki v primerjavi s splošnim  $NS$  zmanjša preobčutljivost na velike pretoke, posledično so manjši pretoki bolj enakovredno zastopani in splošna ocena uspešnosti hidrološkega modela ustrežnejša. Enačba je naslednje oblike (Krause et al., 2005):

$$NS_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} \quad (6)$$

kjer so  $O$  opazovane vrednosti,  $P$  pa simulirane vrednosti.

Upoštevati je treba, da so vrednosti prilagojenega koeficienta  $NS_I$  vedno manjše kakor vrednosti originalnega koeficienta  $NS$  (Krause et al., 2005). Prav tako so vrednosti  $\omega R^2$  običajno manjše kakor vrednosti  $R^2$ , če je naklon trendne premice točno 1, pa so vrednosti enake.

Ohranjanje vodne bilance v izbranem obdobju smo ovrednotili s količnikom  $dET_0$  kot razmerje med povprečno dnevno evapotranspiracijo po vsaki izmed temperaturnih metod in povprečno dnevno evapotranspiracijo po metodi Penman-Monteith, kot tudi s količnikom  $dQs$ , ki predstavlja delež srednjega simuliranega pretoka v srednjem merjenem pretoku v posameznih točkah modelskih postavitev. Ohranjanje vodne bilance je tem boljše, čim bolj se vrednosti  $dQs$  in  $dET_0$  približata vrednosti 1.

### 3. Rezultati in razprava

#### 3.1. Izbira metode za izračun dnevni vrednosti $ET_0$

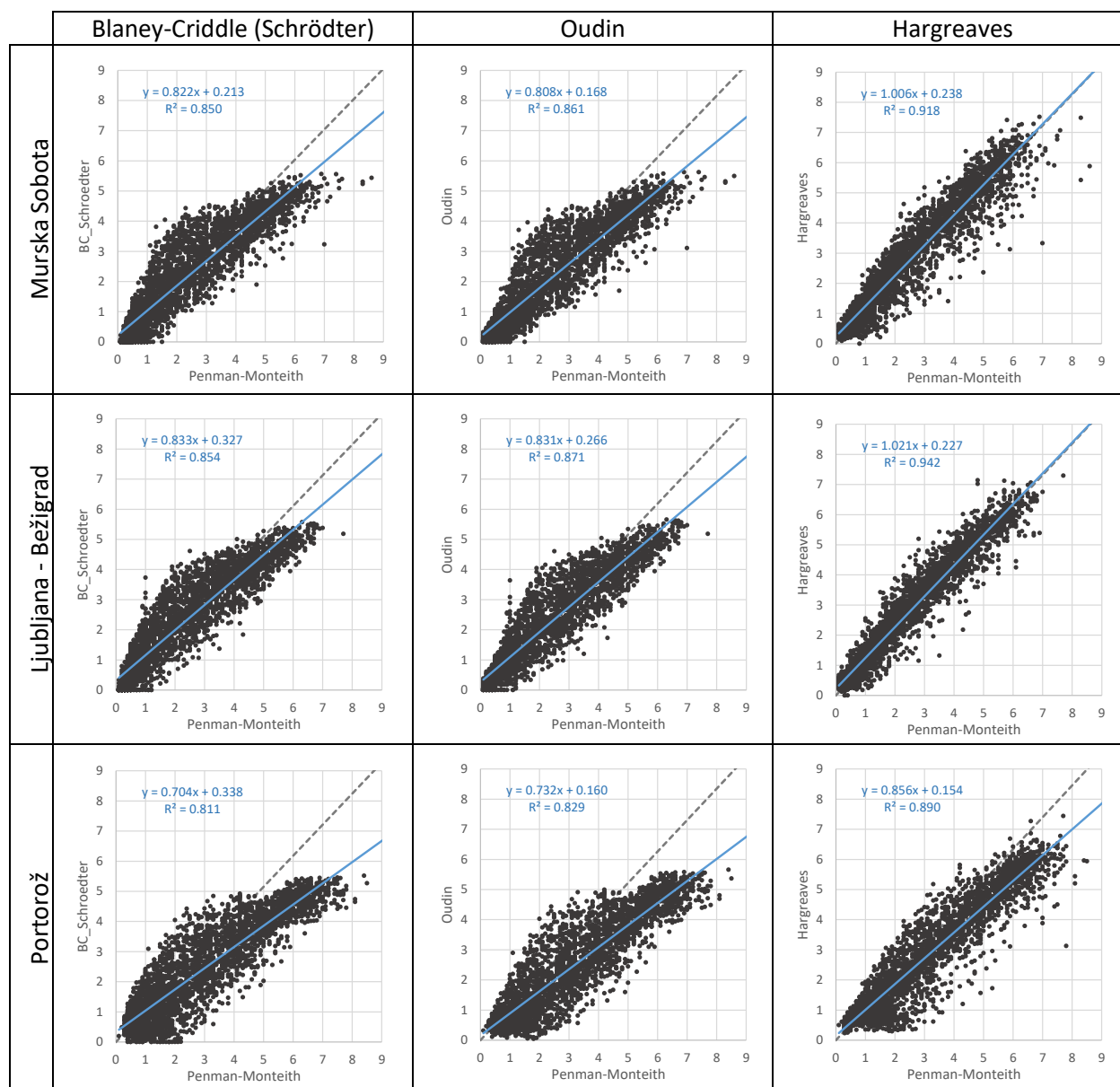
Izračun  $ET_0$  po različnih metodah (Blaney-Criddle, Oudin in Hargreaves) smo primerjali z izračunom  $ET_0$  po standardni metodi Penman-Monteith na lokacijah izbranih treh meteoroloških postaj v Sloveniji. Slika 3 prikazuje razmerja med vrednostmi  $ET_0$ , izračunanih po metodi Penman-Monteith, in vrednostmi, izračunanimi po eni izmed temperaturnih metod na izbranih meteoroloških postajah v obdobju 2010–2018, v preglednici 2 pa je ujemanje med različnimi temperaturnimi

metodami in uveljavljeno Penman-Monteithovo metodo prikazano z različnimi merili uspešnosti.

Kot je razvidno iz grafičnega prikaza in primerjav različnih meril uspešnosti v preglednici 2, se izmed analiziranih temperaturnih metod s Penman-Monteithovo metodo najbolj ujema metoda Hargreaves. Metoda Hargreaves dosega najvišje vrednosti koeficienta determinacije, medtem ko imata metodi Blaney-Criddle in Oudin nižje ter med seboj zelo podobne vrednosti koeficienta determinacije. Še večje razlike so pri ponderiranem koeficientu determinacije, kjer prav tako metoda Hargreaves dosega za 26 in 33 % višje vrednosti od preostalih dveh metod, kar pomeni ne le, da je odvisnost med vrednostmi po metodah Hargreaves in Penman-Monteith zelo velika, pač pa so tudi vrednosti zelo primerljive. Metoda Hargreaves dosega na vseh izbranih lokacijah tudi največje vrednosti koeficienta Nash-Sutcliffe. Vrednosti  $ET_0$  po metodah Blaney-Criddle in Oudin so nekoliko podcenjene v primerjavi z izračunom po Penman-Monteithovi enačbi ter ne ujamejo dobro dnevnega nihanja, še posebej v poletnem času. Metoda Hargreaves to nihanje precej bolje ujame, kar je razvidno tudi iz izseka dnevnih vrednosti  $ET_0$  za Mursko Soboto v letu 2018 (slika 4). Po drugi strani pa metoda Hargreaves nekoliko precenjuje vrednosti  $ET_0$  v primerjavi s Penman-Monteithovo metodo, še posebej v poletno-jesenskem času.

Metoda Hargreaves se je na vseh izbranih lokacijah izkazala najboljše med obravnavanimi metodami, kljub temu pa so v Portorožu njeni rezultati nekoliko slabši kot v drugih mestih. To je v skladu z raziskavo Vanderlindna et al. (2004), v kateri ugotavljajo, da so vrednosti Hargreavesove enačbe predvsem ob obalah podcenjene in zato predlagajo umerjanje njene konstante 0,0023 glede na geografsko lego. Glede na to, da trenutna vpeljava novega vira  $PET$  ne zajema slovenskih obalnih porečij, smo za nadaljnjo rabo v HPS ARSO kljub temu izbrali Hargreavesovo enačbo z upoštevanjem originalne vrednosti njene konstante.





**Slika 3:** Grafična primerjava vrednosti  $ET_0$  v mm/dan, izračunanih po metodi Penman-Monteith (abscisna os) in po eni izmed temperaturnih metod (ordinatna os), na izbranih meteoroloških postajah med letoma 2010 in 2018 – črtkana črna črta predstavlja naklon premice 1 : 1.

**Figure 3:** Graphical comparison of  $ET_0$  values in mm/day calculated by the Penman-Monteith method (x-axis) and by one of the temperature methods (y-axis) at the selected meteorological stations for the 2010–2018 period – the dashed black line represents the slope 1:1.

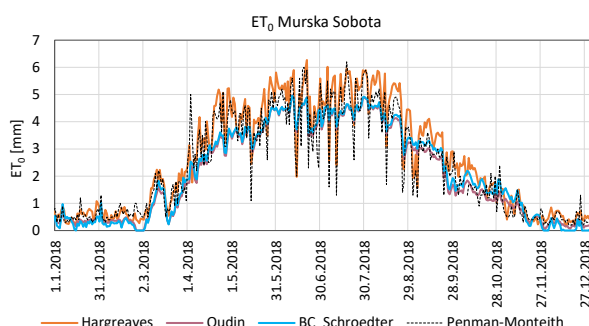
Čeprav se izračunane vrednosti  $PET$  po metodi Hargreaves najboljše izmed vseh obravnavanih metod ujemajo z izračuni  $PET$  po metodi Penman-Monteith, to še ne pomeni nujno, da bodo tudi rezultati hidroloških modelskih simulacij najboljši ob uporabi metode Hargreaves. Ob menjavi vira

vhodnih podatkov se namreč modelske parametre prilagodi, tako da je ujemanje z merjenim pretokom čim boljše. Poleg tega dnevno nihanje  $PET$  ne vpliva zelo na rezultate hidrološkega modela, pač pa so bolj pomembne vsote vrednosti na mesečni ravni.

**Preglednica 2:** Primerjava ujemanja vrednosti  $ET_0$  po različnih temperaturnih metodah z vrednostmi po Penman-Monteithovi metodi (BC – metoda Blaney-Criddle, spremenjena po Schrödter; HS – Hargreavesova metoda).

**Table 2:** The comparison of  $ET_0$  values fitting calculated by one of the temperature methods and the values calculated by the Penman-Monteith method (BC – Blaney-Criddle method, modified by Schrödter; HS – Hargreaves method).

	NS			$R^2$			$\omega R^2$			d $ET_0$		
Meteorološka postaja	$ET_0$ - BC	$ET_0$ - Oudin	$ET_0$ - HS	$ET_0$ - BC	$ET_0$ - Oudin	$ET_0$ - HS	$ET_0$ - BC	$ET_0$ - Oudin	$ET_0$ - HS	$ET_0$ - BC	$ET_0$ - Oudin	$ET_0$ - HS
Murska Sobota	0,837	0,835	0,891	0,850	0,861	0,918	0,699	0,696	0,913	0,914	0,881	1,108
Ljubljana Bežigrad	0,853	0,866	0,912	0,854	0,871	0,942	0,712	0,724	0,923	0,980	0,950	1,123
Portorož	0,719	0,712	0,869	0,811	0,829	0,890	0,571	0,607	0,762	0,816	0,785	0,907



**Slika 4:** Izsek po različnih metodah izračunanih dnevnih vrednosti  $ET_0$  na meteorološki postaji Murska Sobota.

**Figure 4:** A segment of the daily  $ET_0$  values calculated using various methods at the Murska Sobota meteorological station.

Za enostavnejši izračun potencialne evapotranspiracije pri delovanju HPS ARSO smo uvedli nov faktor, poimenovan  $K_H$ , v katerem smo združili:

- konstanto Hargreavesove enačbe (0,0023),
- pretvornik iz  $[MJ/m^2]$  v  $[mm]$  (0,408),
- zunajatmosfersko sevanje ( $R_a$ ) in
- faktor pokrovnosti tal ( $K_C$ ).

Faktor  $K_H$  smo izračunali za vsako podporečje posebej, odvisen pa je tudi od zaporednega dne v letu. Vrednost potencialne evapotranspiracije tako izračunamo po naslednji enačbi:

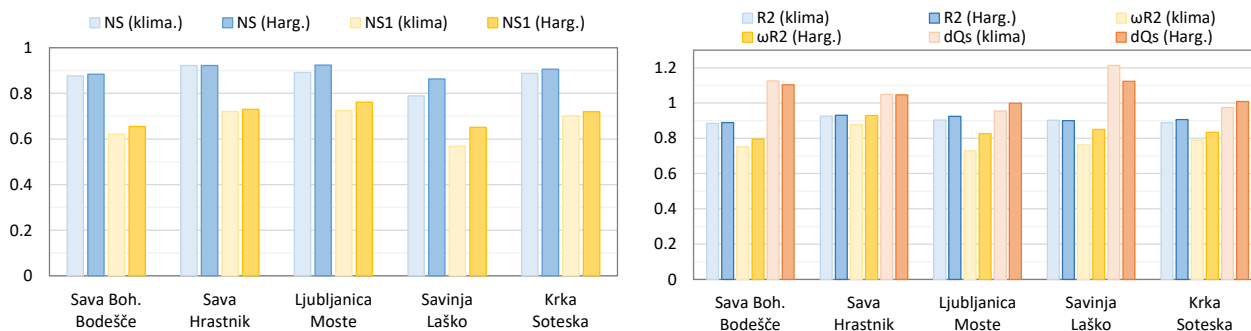
$$PET = K_H \cdot (T_d + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \quad (7)$$

če je  $T_d > -17,8$  °C,

drugače  $PET = 0$ .

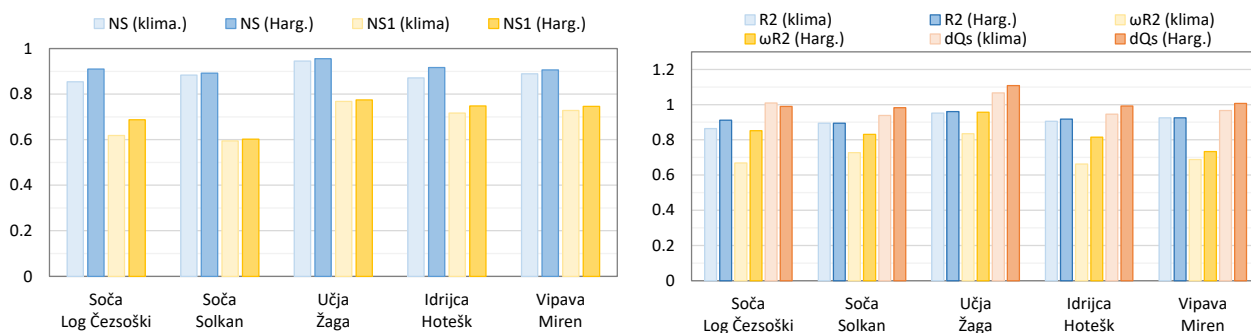
### 3.2. Uspešnost modelskih simulacij na porečjih Save, Soče in Mure z upoštevanjem dnevnih vrednosti $PET$

Reanalizo na porečju Mure smo izvedli za obdobje od 1. 8. 2018 do 15. 12. 2020 z modelsko postavitvijo, ki je prvič upoštevala klimatološke vrednosti, drugič pa dnevne vrednosti  $PET$ , izračunane po metodi Hargreaves (enačba 7). Enako smo pristopili tudi na porečjih Save in Soče, le da smo reanalizo opravili za daljše obdobje, in sicer od 1. 9. 2016 do 1. 6. 2020. Na slikah 5, 6 in 7 je predstavljena primerjava uspešnosti simulacij modelov Save, Soče in Mure na izbranih vodomernih postajah ob uporabi dveh različnih virov  $PET$ .



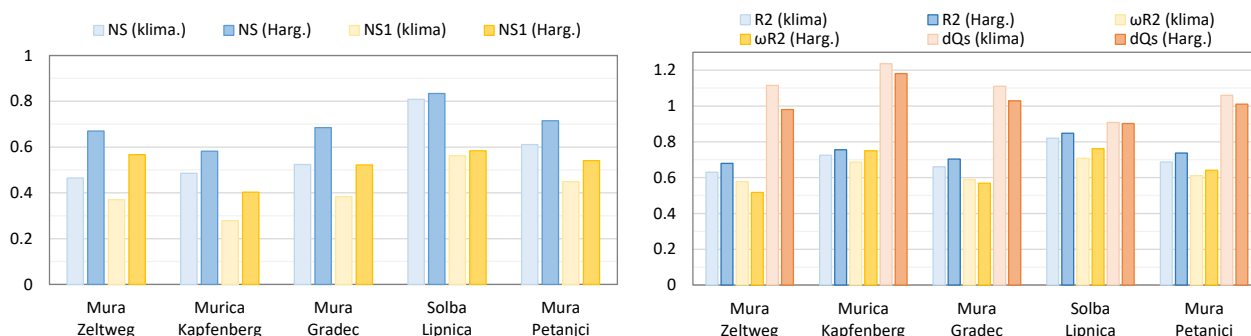
**Slika 5:** Primerjava uspešnosti simulacij modela Save ob uporabi dveh različnih virov PET na izbranih vodomernih postajah.

**Figure 5:** Performance comparison of the Sava model simulations using two different PET sources at selected hydrological stations.



**Slika 6:** Primerjava uspešnosti simulacij modela Soče ob uporabi dveh različnih virov PET na izbranih vodomernih postajah.

**Figure 6:** Performance comparison of the Soča model simulations using two different PET sources at selected hydrological stations.



**Slika 7:** Primerjava uspešnosti simulacij modela Mure ob uporabi dveh različnih virov PET na izbranih vodomernih postajah.

**Figure 7:** Performance comparison of the Mura model simulations using two different PET sources at selected hydrological stations.

Na primeru modelskih porečij Save in Soče ni bistvenih razlik v vrednostih Nash-Sutcliffevega koeficienta ( $NS$ ) in koeficienta determinacije ( $R^2$ ) med simulacijami hidroloških modelov z upoštevanjem klimatološke vrednosti  $PET$  in simulacijami z upoštevanjem dnevnih vrednosti  $PET$  (sliki 5 in 6). Na izbranih vodomernih postajah v porečjih Save in Soče je vrednost  $NS$  v povprečju višja za 3,2 %, vrednost  $R^2$  pa v povprečju za 1,3 % v prid dnevnih vrednosti  $PET$ . Nekoliko večje razlike so pri vrednostih prilagojenega Nash-Sutcliffevega koeficienta, v povprečju za 4,9 %, zlasti pa pri ponderiranem  $R^2$ , v povprečju za 12,8 %, tudi tokrat v prid dnevnih vrednosti  $PET$ . Tudi vrednosti  $dQs$  se bolj približajo vrednosti 1 ob upoštevanju dnevnih vrednosti  $PET$ . Na porečju Save je absolutni odklon vrednosti  $dQs$  od 1 ob uporabi Hargreavesove metode povprečno 0,06, ob upoštevanju klimatoloških vrednosti pa 0,09. Na porečju Soče pa znaša absolutni odklon vrednosti  $dQs$  od 1 ob upoštevanju Hargreavesove metode povprečno 0,03, ob upoštevanju klimatoloških vrednosti pa 0,05. To pomeni, da smo z zamenjavo vira evapotranspiracije in ponovnim umerjanjem modela izboljšali predvsem vodno bilanco modela in rezultate modela pri manjših pretokih.

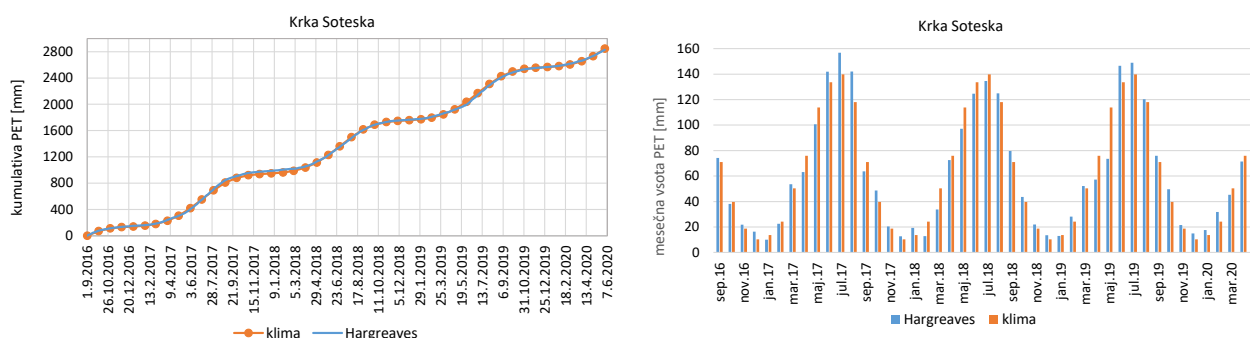
Večje razlike so na primeru modela Mure (slika 7). Zaradi manjšega odtočnega količnika je uspešnost modelskih simulacij na porečju Mure v splošnem manjša v primerjavi z modelskimi simulacijami na porečjih Soče in Save, vendar je prav zaradi tega na tem porečju tudi več možnosti za izboljšavo modela.

Vrednosti koeficientov  $NS$  oz.  $NS_i$  so pri modelski postavitvi, ki upošteva Hargreavesovo metodo  $PET$ , v povprečju za 23 oz. 32 % večje kot pri postavitvi, ki upošteva klimatološke vrednosti  $PET$ . Vrednosti  $R^2$  so na izbranih vodomernih postajah v povprečju za 5,9 % večje, vrednosti  $\omega R^2$  pa za 1,5 % večje, oboje na račun modelskih postavitev, ki upoštevajo dnevne vrednosti  $PET$ . Absolutni odklon vrednosti  $dQs$  od 1 znaša na modelski postavitvi z upoštevanjem klimatoloških vrednosti  $PET$  povprečno 0,12, na modelski postavitvi z upoštevanjem dnevnih vrednosti  $PET$  pa 0,07. Te vrednosti kažejo na to, da smo na modelskem porečju Mure z uvedbo dnevnih vrednosti  $PET$  po Hargreavesovi metodi izboljšali uspešnost modela, še posebej pri manjših pretokih, v nekoliko manjši meri pa tudi ujemanje vodne bilance.

### 3.3. Primerjava kumulativnih in mesečnih vsot $PET$ na izbranih podporečjih modelskih postavitev Save, Soče in Mure

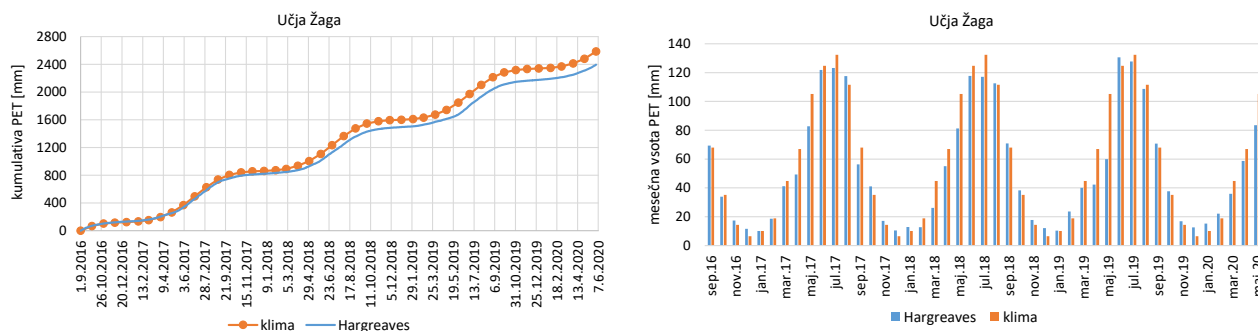
Na slikah 8, 9 in 10 je prikazana primerjava kumulativnih vrednosti  $PET$  in mesečnih vrednosti  $PET$  za obdobje reanalize na izbranih podporečjih vseh treh obravnavanih modelskih porečjih. Modelsko porečje reke Mure ima krajše obdobje reanalize, ker je bilo kasneje vpeljeno v HPS ARSO.

Iz grafikona na sliki 8 lahko sklepamo, da je na primeru Krke skupna vsota vrednosti  $PET$  v obdobju reanalize po obeh metodah približno enaka.



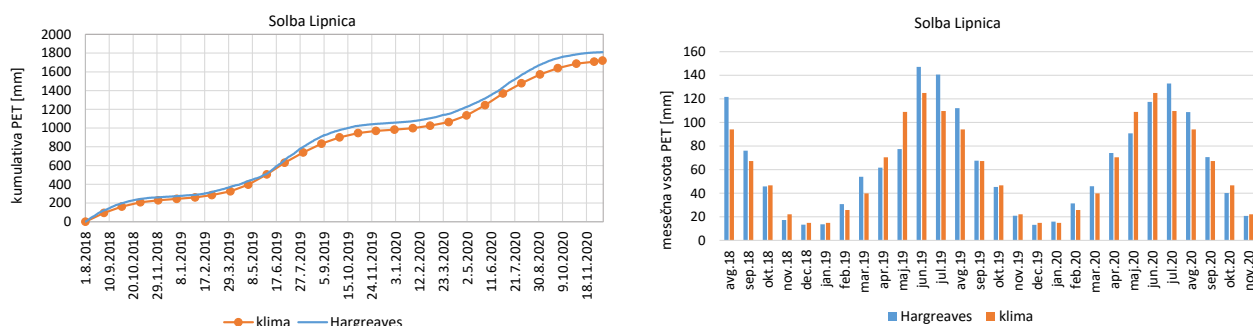
**Slika 8:** Kumulativna (levo) in mesečna (desno) vsota  $PET$  na podporečju Krka Soteska modelskega porečja Save.

**Figure 8:** Cumulative (left) and monthly (right)  $PET$  values in the Krka Soteska subcatchment of the Sava model catchment.



**Slika 9:** Kumulativna (levo) in mesečna (desno) vsota PET na podporečju Učja Žaga modelskega porečja Soče.

**Figure 9:** Cumulative (left) and monthly (right) PET values in the Učja Žaga subcatchment of the Soča model catchment.



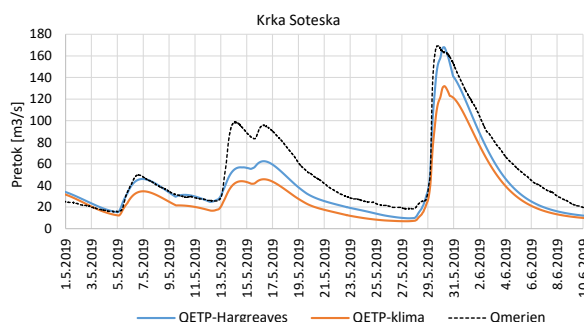
**Slika 10:** Kumulativna (levo) in mesečna (desno) vsota PET na podporečju Solba Lipnica modelskega porečja Mure.

**Figure 10:** Cumulative (left) and monthly (right) PET values in the Solba Lipnica subcatchment of the Mura model catchment.

Na Učji (slika 9), kot primeru porečja z velikim odtočnim količnikom, je po Hargreavesovi metodi skupna vsota vrednosti *PET* v obdobju analize nekoliko manjša kot ob upoštevanju klimatoloških vrednosti, medtem ko je na Solbi (slika 10), kot primeru porečja z majhnim odtočnim količnikom, skupna vsota *PET* po Hargreavesovi metodi nekoliko večja kot ob upoštevanju dolgoletnega povprečja. Do razlik lahko prihaja tudi zaradi razlike v obdobjih klimatoloških in dnevnih vrednosti *PET*. Klimatološke vrednosti so bile namreč izračunane za obdobje 1998–2007. Maček et al. (2018) ugotavlja statistično značilen pozitiven trend letne vsote *ET<sub>0</sub>* predvsem v Pomurju, kar morda lahko razloži tudi večjo vsoto *PET* v primerjavi s klimatološkimi vrednostmi na bližnjem podporečju Solbe pri Lipnici. Na vseh primerih podporečij so vidni odkloni posameznih mesecev od klimatoloških vrednosti, še posebej v spomladanskem in poletnem času, ko so vrednosti

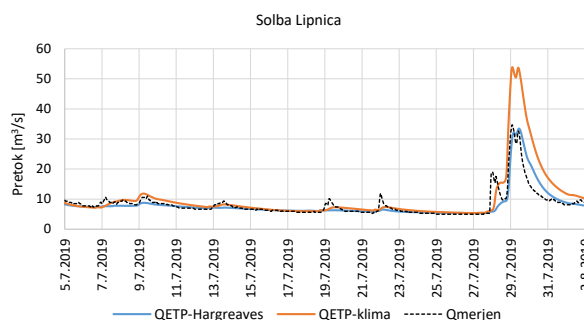
*PET* najvišje. Ti odkloni od povprečja lahko pomembno vplivajo na modelske simulacije visokovodnih valov. Izrazit odklon od povprečja se je na vseh prikazanih podporečjih pojavil v maju 2019, ki je bil izrazito hladen in moker mesec (Cegnar, 2019), zato so bile klimatološke vrednosti *PET* občutno prevelike. Posledično so bili simulirani visokovodni valovi podcenjeni, kar lahko vidimo na primeru vodomerne postaje Soteska na reki Krki (slika 11). Na Solbi pri Lipnici opazimo obraten primer, ko je bil po daljšem obdobju suhega in toplega vremena simuliran pretok z upoštevanjem klimatoloških vrednosti *PET* precejšen (slika 12). S slike 10 vidimo, da je bila tam mesečna vsota *PET* po Hargreavesovi metodi v juliju 2019 občutno večja od klimatološke vrednosti, kar se odraža v zmanjšanju poplavnega vala glede na simulacijo z upoštevanjem klimatoloških vrednosti (slika 12).





**Slika 11:** Primerjava simuliranega pretoka z upoštevanjem klimatoloških vrednosti PET in dnevnih vrednosti PET z izmerjenimi pretoki na vodomerni postaji Soteska na reki Krki.

**Figure 11:** Comparison of the simulated discharge considering the climatological PET values and daily PET values with the observed discharge at the Soteska hydrological station on the Krka River.



**Slika 12:** Primerjava simuliranega pretoka z upoštevanjem klimatoloških vrednosti PET in dnevnih vrednosti PET z izmerjenimi pretoki na vodomerni postaji Lipnica na reki Solbi.

**Figure 12:** Comparison of the simulated discharge considering the climatological PET values and daily PET values with the observed discharge at the Lipnica hydrological station on the Solba River.

#### 4. Zaključki

S to raziskavo smo poiskali metodo za izračun dnevnih vrednosti potencialne evapotranspiracije z namenom dopolnitve oz. izboljšanja rezultatov hidrološkega prognostičnega sistema ARSO, še posebej ob določenih hidroloških pogojih. Na osnovi literature smo izbor metod zožili na t. i. temperaturne metode, saj se te zelo dobro izkažejo v primerjavi s kompleksnejšimi metodami, poleg tega pa za njihov operativni izračun zadostujejo

podatki, ki jih tako ali tako potrebujemo za operativno delovanje hidrološkega prognostičnega sistema. Ob primerjavi rezultatov treh izbranih temperaturnih metod s splošno uveljavljeno metodo Penman-Monteith na treh meteoroloških postajah v Sloveniji smo ugotovili, da se ji najbolj približajo vrednosti po Hargreavesovi metodi, ki se od ostalih temperaturnih metod razlikuje v tem, da upošteva tudi dnevni razpon temperature.

Pri modelski reanalizi na porečjih Mure, Save in Soče smo ugotovili, da se z upoštevanjem nove metode PET simulirani pretok bolje ujema z izmerjenim kot ob upoštevanju klimatoloških vrednosti PET. Po pričakovanjih so izboljšave najbolj očitne na porečju Mure, ki ima v primerjavi z ostalima dvema obravnavanima porečjema najmanjši odtočni količnik.

Z vpeljavo nove metode izračuna PET pričakujemo največje izboljšave pri rezultatih hidrološkega prognostičnega sistema ARSO v obdobjih, ko se vremenske razmere izrazito razlikujejo od klimatološko pričakovanih, torej pri:

- izrazito mokrih in hladnih obdobjih,
- izrazito sušnih obdobjih ter pri

poplavnih valovih, ki sledijo daljšim suhim ali mokrim obdobjem. Izboljšave HPS ARSO bodo koristile strokovnim službam s področja hidrološkega napovedovanja in upravljanja voda v regiji, zlasti pri pripravi točnejših kratkoročnih in srednjeročnih hidroloških napovedi, ki so namenjene končnim uporabnikom oz. splošni javnosti.

Nova metoda je na porečju Mure že v operativni uporabi od junija 2020, pri čemer so rezultati vzpodbudni: simulirani pretok ob upoštevanju nove metode PET se praviloma bolje ujema z izmerjenim pretokom kot ob upoštevanju klimatoloških vrednosti PET. Novo metodo bomo v letu 2021 aplicirali tudi na porečjih Soče in Save.

Zaključimo lahko, da je izbrana metoda za izračun PET primerna za uporabo v hidrološkem modeliranju na območju slovenskih in čezmejnih porečij. Raziskavo bi lahko še nadgradili s tem, da bi izbor najprimernejše metode za izračun PET opravili na podlagi primerjave simulacij hidroloških

modelov z vsako izmed obravnavanih metod. Izbrano enačbo za izračun *PET* bi lahko tudi umerili glede na geografsko lego in letni čas, še posebej če bomo novo metodo vpeljali tudi na obalna porečja.

## Viri

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and drainage paper* **56**, FAO, Rome. ISBN 92-5-104219-5. Dostopno na: <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents> (pridobljeno: 27. 2. 2019).

ARSO (2021). Agrometeorološka napoved ARSO. Dostopno na: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/forecast/> (pridobljeno: 16. 2. 2021).

ARSO (2019). Faktor rastlin za nekatere rastline. Oddelek za agrometeorološke analize. Sporočilo: Koprivšek, M. 18. 12. 2019. Osebna komunikacija.

Cegnar, T. (2019). Podnebne razmere v maju 2019, *Naše okolje, Mesečni bilten Agencije RS za okolje* **5/XXVI**, 3–26.

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

Blaney, H. F., Criddle, W. P. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data, United States Department of Agriculture, Washington, 48 str.

Bormann, H. (2011). Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations, *Climatic Change* **104**, 729–753. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9869-7>.

EEA (2019). Corine Land Cover 2018. Dostopno na: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-corine> (pridobljeno 1. 6. 2020).

Hargreaves, G. H., Asce, F., Allen, R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **129**, 53–63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53)).

Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature, *Applied Engineering in Agriculture*. Paper presented in ASAERegional Meeting, Grand Junction, Colorado. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>.

Kovačec, M., Šraj, M. (2017). Uporaba modela SWAT za hidrološko modeliranje, *Acta hydrotechnica* **30**(52), 1–13.

Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, *Advances in Geosciences* **5**, 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>.

Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X., Zhang, M. (2017). A Comparative Study of Potential Evapotranspiration Estimation by Eight Methods with FAO Penman–Monteith Method in Southwestern China, *Water* **9**, 734, 1–18. <https://doi.org/10.3390/w9100734>.

Maček, U., Bezak, N., Šraj, M. (2018). Reference evapotranspiration changes in Slovenia, Europe, *Agricultural and Forest Meteorology* **260-261**, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.014>.

Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. (2002). Hidrološko izrazje, *Acta hydrotechnica* **20-32**, 3–324.

Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**, 282–290.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. (2003). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling, *Journal of Hydrology* **303**, 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.

Petan, S., Golob, A., Moderc, M. (2016). Hidrološki prognostični sistem Agencije Republike Slovenije za okolje. *Acta hydrotechnica* **28**(49), 119–131.

Schrödter, H. (1985). Verdunstung. Anwendungsorientierte Messverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer Verlag, Berlin, 186 str.

Snyder, R. L., Orang, M., Bali, K., Eching, S. (2000). Basic irrigation scheduling (BIS). University of California, 10 str.

Sperna Weiland, F. C., Tisseuil, C., Dürr, H. H., Vrac, M., van Beek, L. P. H. (2012). Selecting the optimal method to calculate daily global reference potential evaporation from CFSR reanalysis data for application in a hydrological model study, *Hydrology and Earth System Sciences* **16**, 983–1000. <https://doi.org/10.5194/hess-16-983-2012>.

Time and Date AS (2019). Sun calculator. Dostopno na: <https://www.timeanddate.com/> (pridobljeno: 18. 10. 2019).



Vanderlinden, K., Giráldez, J. V., Van Meirvenne, M. (2004). Assessing Reference Evapotranspiration by the Hargreaves Method in Southern Spain, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **130(3)**, 184–191. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:3\(184\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:3(184)).

Wald, L., Albuissou, M., Best, C., Delamare, C., Dumortier, D., Gaboardi, E., Hammer, A., Heinemann, D., Kift, R., Kunz, S., Lefèvre, M., Leroy, S., Martinoli, M., Ménard, L., Page, J., Prager, T., Ratto, C., Reise, C., Remund, J., Rimoczi-Paal, A., Van der Goot, E., Vanroy, F., Webb, A., (2004). SoDa: a Web service on solar radiation. Proceedings of the 14. Intern. Sonnenforum »Eurosun 2004«, Freiburg, Germany, Volume 3, 921–927.

WMO (2008). Guide to Hydrological Practices. Volume I, Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No. 168.

Žust, A. (2017). Trajnostna kmetijska pridelava zahteva spremljanje meteoroloških in agrometeoroloških dejavnikov. *Kmečki glas* **30**.