

USPOREDBA METODA IZRAČUNA POTENCIJALNE EVAPOTRANSPIRACIJE U RAZLIČITIM KLIMATSKIM TIPOVIMA I VEGETACIJSKIM POJASEVIMA

COMPARISON OF METHODS FOR CALCULATING POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION IN DIFFERENT CLIMATE TYPES AND VEGETATION ZONES

Damir UGARKOVIĆ¹, Mateja DŽEKO², Ivica TIKVIĆ¹, Ivan BLAŽEVIĆ³

SAŽETAK

Evapotranspiracija je važan dio hidrološkog ciklusa vode, kao i važna komponenta u planiranju navodnjavanja i određivanja sušnog razdoblja. Cilj je ovog istraživanja usporediti iznose potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama izračuna u različitim klimatskim tipovima, kao i korelacije među njima. Potencijalna evapotranspiracija (mm) izračunata je prema metodama Thornthwaitea, Ivanova, Blaney-Criddlea i Penman-Monteitha za meteorološke postaje Osijek, Zagreb-Maksimir, Parg, Zavižan i Hvar. Meteorološka postaja Osijek ima Cfa tip klime, umjereno topla kišna klima s vrućim ljetom. Meteorološke postaje Zagreb-Maksimir i Parg imaju Cfb tip klime, umjereno toplu vlažnu klimu s toplim ljetom, meteorološka postaja Zavižan ima Df tip klime, vlažna borealna klima, dok se meteorološka postaja Hvar nalazi u području sredozemne klime s vrućim ljetom (Csa tip klime). Na području nizinske Hrvatske u Cfa i Cfb tipovima klime prosječno najmanji iznos potencijalne evapotranspiracije bio je prema metodi Blaney-Criddlea (709,30 mm), a najveći prema metodi Ivanova (859,95 mm). Za meteorološku postaju Parg u gorskoj Hrvatskoj, prosječno najmanji iznos potencijalne evapotranspiracije bio je prema metodi Ivanova (553,01 mm), dok je najveći iznos bio prema metodi Penman-Monteitha (705,87 mm). Na Hvaru najmanji iznos potencijalne evapotranspiracije bio je prema metodi Thornthwaitea (891,57 mm), a najveći prema metodi Ivanova u iznosu od 1368,55 mm. Prema prosječnim godišnjim vrijednostima potencijalne evapotranspiracije metodi Penman-Monteitha bila je najbliža metoda Ivanova na području nizinske Hrvatske te metoda Blaney-Criddlea na području gorske, pretplaninske i sredozemne Hrvatske. Najveća korelacija ($r = 0,98^*$) bila je između metode Thornthwaitea i Blaney-Criddlea, a najmanja ($r = 0,49^*$) utvrđena je između metoda Ivanova i Blaney-Criddlea. S metodom Penman-Monteitha najviše su korelirale metode Thornthwaitea i Ivanova u nizinskoj Hrvatskoj te Thornthwaitea i Blaney-Criddlea u gorskoj, pretplaninskoj i sredozemnoj Hrvatskoj.

KLJUČNE RIJEČI: potencijalna evapotranspiracija, klima, klimatski tip, neizravne metode

UVOD INTRODUCTION

Evaporacija je fizikalni proces koji se odnosi na isparavanje vode s površine tla ili vodenih površina, a transpiracija je

fiziološki proces isparavanja vode iz biljaka. Količina vode koja se transpirira ovisi o vrsti biljke, njezinoj veličini, klimatskim obilježjima određenog područja, sadržaju vode u tlu i drugim čimbenicima. Gubitak vode procesom evapo-

¹ Prof. dr. sc. Damir Ugarković, prof. dr. sc. Ivica Tikvić, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zavod za ekologiju i uzgajanje šuma, Zagreb, Hrvatska

² Mateja Džeko, mag. ing. silv., Livno, Bosna i Hercegovina

³ Ivan Blažević, mag. ing. silv., Hrvatske šume d.o.o., Uprava šuma Podružnica Zagreb, Zagreb, Hrvatska

*Corresponding author: Damir Ugarković, dugarkovic@sumfak.unizg.hr, ugarkovicdamir@gmail.com

racije i transpiracije naziva se evapotranspiracija (Jug i dr. 2011). Evapotranspiracija je složen hidrološki ciklus kojim se voda vraća u atmosferu, te označava vrlo važnu komponentu hidrološkog ciklusa vode. Dakle, evapotranspiracija jest ukupno isparavanje vode s određenog područja. Vrijednosti evapotranspiracije predstavljaju onu količinu vode koja je potrebna biljkama (Jensen i Allen, 2016). Razlikuje se potencijalna evapotranspiracija (PET), stvarna ili aktualna (AE) i referentna evapotranspiracija (ET_0) (Šimunić, 2013). Potencijalna evapotranspiracija može se općenito definirati kao količina vode koja bi mogla ispariti i transpirirati iz vegetiranog krajolika bez ograničenja osim atmosfere potražnje (Jensen i dr. 1990) ili kao najveća stopa evapotranspiracije koja bi se dogodila uz dovoljnu opskrbu vodom (Xiang i dr. 2020).

Potencijalna evapotranspiracija važan je indeks za hidrološke proračune nekog prostora i kritična varijabla za razumijevanje regionalnih bioloških procesa (Lu i dr. 2005) te se također upotrebljava kao indeks za predstavljanje dostupne energije okoliša i produktivnosti ekosustava (Currie, 1991). Zbog složenosti evapotranspiracije kao biofizičkog fenomena razvijeno je nekoliko pristupa i varijanti njezina mjerenja, odnosno izračuna (Rácz i dr. 2013).

Općenito se određuje na dva načina, izravnim i neizravnim metodama. Izravan način mjerenja uključuje mjerenje s pomoću lizimetra (Grismer i dr. 2002, Xu i Chen, 2005). Procjena lizimetrom najtočnija je tehnika (Tao i dr. 2018), a glavni je njezin nedostatak cijena i složenost (Zhang i dr. 2016). Prema nekim autorima (Jensen i Allen, 2016) evapotranspiracija se teško može izravno mjeriti, stoga se uglavnom procjenjuje primjenom empirijskih formula iz lakše dostupnih meteoroloških varijabli kao što su temperatura zraka, brzina vjetera i zračenje. Neizravnim načinom potencijalna evapotranspiracija procjenjuje se teorijskim, odnosno empirijskim jednadžbama (Kolka i Wolf, 1998) ili se izračunava množenjem standardnih podataka o isparavanju s koeficijentom (Grismer i dr. 2002). Potencijalnu evapotranspiraciju određuju meteorološki uvjeti (Jensen i Allen, 2016) i brojne okolišne varijable, uključujući temperaturu, oborine, zračenje, brzinu vjetera i vlažnost (Liu i dr. 2013), zbog čega neizravan način mjerenja obuhvaća podatke o manjem ili većem broju izmjerenih klimatskih elemenata. Međutim, kvantitativna procjena PET-a s postojećim matematičkim formulama katkad daje nedosljedne rezultate (Lu i dr. 2005). Točna procjena evapotranspiracije ključna je za razvoj, planiranje i upravljanje vodnim resursima, posebice u sadašnjem kontekstu globalnog zatopljenja i klimatskih promjena (Ahmed i dr. 2018, Shiru i dr. 2018, Hamed i dr. 2022), za praćenje sušnog razdoblja i aridnosti područja (Ugarković i Kelava Ugarković, 2013; Perčec Tadić i dr. 2014; Hamed i dr. 2022), za planiranje navodnjavanja (Shahid, 2011), procjenu bilance vode u eko-

sustavu (Jaber i dr. 2017, Ugarković i dr. 2022) te procjenu vodnog stresa (Mohsenipour i dr. 2018).

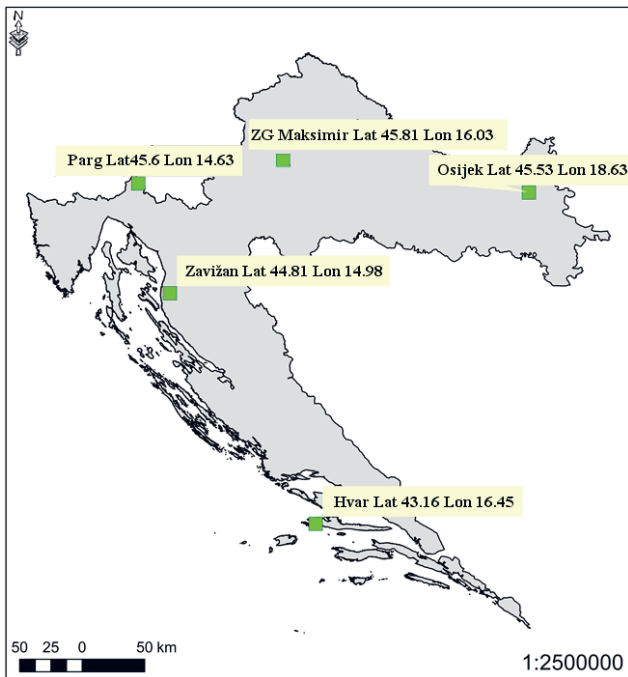
Metode određivanja potencijalne evapotranspiracije koje pri procjeni upotrebljavaju više klimatskih elemenata, kao što su temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, brzina vjetera, metode su s većom točnošću (Šimunić, 2013). Pri neizravnom načinu određivanja potencijalne evapotranspiracije praktično se najviše primjenjuju metode koje zahtijevaju najmanje ulaznih varijabli (Fennessey i Vogel, 1996). Do danas je razvijeno približno pedeset metoda ili modela za procjenu potencijalne evapotranspiracije koji daju nedosljedne vrijednosti zbog različitih pretpostavki i ulaznih podataka, ali i zato što su neki od njih izrađeni za specifične klimatske regije (Grismer i dr. 2002). Penman-Monteithova (PNM) jednadžba smatra se najboljom metodom za procjenu potencijalne evapotranspiracije (Allen i dr. 1998, Hamed i dr. 2022) u širokom rasponu klima, te ju preporučuje Organizacija za hranu i poljoprivredu (FAO) kao referentan model za procjenu potencijalne evapotranspiracije (Valipour 2015) te kao standard za procjenu drugih modela PET-a u svijetu (Muhammad i dr. 2019, Kumari i Srivastava, 2020). Uz globalne klimatske promjene evapotranspiracija je preduvjet za razumijevanje interakcije tla, biljaka i atmosfere (Nemani i dr. 2002), stoga je nužno bolje razumijevanje odnosa pojedinih metoda, odnosno modela izračuna potencijalne evapotranspiracije. Brojne studije provedene su kako bi se odabrao najprikladniji model izračuna potencijalne evapotranspiracije u različitim dijelovima svijeta (Tabari i dr. 2011, Gocić i Trajković, 2014), dok se u Republici Hrvatskoj istraživanja potencijalne evapotranspiracije više temelje na njezinoj prostornoj raspodjeli (Vučetić i Anić, 2021), prostornoj raspodjeli i trendovima (Ferina i dr. 2021) te promjenama u vodnoj bilanci ekosustava (Zaninović i Gajić-Čapka, 2000)

Ciljevi su ovog istraživanja izračunati potencijalnu evapotranspiraciju za meteorološke postaje u različitim klimatskim tipovima na području nizinske, gorske i mediteranske Hrvatske prema metodama Thornthwaitea, Ivanova i Blaney-Criddelea, prikupiti podatke o iznosima PET-a prema metodi Penman-Monteitha, kao i statistički usporediti iznose godišnje potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama te povezanost i jakost korelacije među njima u različitim klimatskim tipovima.

MATERIJAL I METODA RADA MATERIAL AND METHODS

Područje istraživanja – *Research area*

Podaci o srednjoj mjesečnoj temperaturi zraka i srednjoj mjesečnoj relativnoj vlažnosti zraka prikupljeni su za pet glavnih meteoroloških postaja (tablica 1 i slika 1) koje su u sustavu Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske za razdoblje od 1981. do 2021. godine.



Slika 1. Položaj glavnih meteoroloških postaja obuhvaćenih istraživanjem
Figure 1. Location of the main weather stations included in the research

Meteorološke postaje nalaze se na području četiriju klimatskih tipova (Šegota i Filipčić, 2003) i četiriju vegetacijskih pojaseva u Hrvatskoj (tablica 1). Meteorološka postaja Osijek ima Cfa tip klime, umjereno topla kišna klima s vrućim ljetom. Za tu meteorološku postaju značajan je kontinentalni oborinski režim s najvećom količinom oborina u vegetacijskom razdoblju, a razdoblje suhoće traje 42 dana. Meteorološka postaja Zagreb-Maksimir ima Cfb tip klime, umjereno topla kišna klima s toplim ljetom. Na području te meteorološke postaje nema razdoblja suhoće ni razdoblja

suše. Tijekom cijele godine vlažno je ili humidno razdoblje, a oborinski režim jest kontinentalni. Meteorološka postaja Parg ima isti tip klime (Cfb) kao i postaja Zagreb-Maksimir, s razlikom u tome što je oborinski režim maritimni, s najmanjom količinom oborina u vegetacijskom razdoblju. Meteorološka postaja Zavižan ima vlažnu borealnu klimu. Tijekom višegodišnjeg razdoblja nema razdoblja suše ni razdoblja suhoće. Oborinski režim također je maritimni. Meteorološka postaja Hvar ima Csa tip klime, sredozemna klima s vrućim ljetom i maritimnim oborinskim režimom s minimalnim količinama oborina u ljetnim mjesecima.

Neizravan način određivanja potencijalne evapotranspiracije – Indirect way of determining potential evapotranspiration

Potrebna voda, odnosno potencijalna evapotranspiracija izračunata je neizravnim načinom prema originalnim metodama Thornthwaitea, Ivanova i Blaney-Criddelea (Tomić, 1988). Thornthwaiteova i Blaney-Criddeleova metoda temelje se na temperaturi zraka (Lu i dr. 2005), dok neki autori metodu Ivanova smatraju metodom koja se zasniva na temperaturi zraka (Muhammad i dr. 2019), a drugi je svrstavaju u skupinu metoda temeljenoj na vlažnosti zraka (Hamed i dr. 2022).

Potencijalna evapotranspiracija (*PET*) prema metodi Thornthwaitea izračunata je formulom:

$$PET = 16 * \left(\frac{10t}{I} \right)^a * k$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

Tablica 1. Popis meteoroloških postaja s osnovnim klimatskim i vegetacijskim podacima

Table 1. List of weather stations with basic climate and vegetation data

meteorološka postaja <i>weather station</i>	nadmorska visina (m) <i>altitude (m)</i>	klimatski tip <i>climate type</i>	T (°C)	P (mm)	vegetacijski pojas <i>vegetation belt</i>
Osijek	89	Cfa	11,6	677,2	nizinski <i>lowland</i>
Zg-Maksimir	123	Cfb	11,5	859,0	nizinski <i>lowland</i>
Parg	863	Cfb	7,9	1820,7	gorski <i>mountain</i>
Zavižan	1594	Df	4,2	1975,8	pretplaninski <i>submountainous</i>
Hvar	20	Csa	16,9	727,6	mediteranski <i>Mediterranean</i>

Cfa – umjereno topla kišna klima s vrućim ljetom – *moderately warm rainy climate with hot summers*

Cfb – umjereno topla kišna klima s toplim ljetom – *moderately warm rainy climate with warm summers*

Df – vlažna borealna klima – *humid boreal climate*

Csa – sredozemna klima s vrućim ljetom – *Mediterranean climate with hot summers*

T – srednja godišnja temperatura zraka – *mean annual air temperature*

P – godišnja količina oborina – *annual amount of precipitation*

$$a = \frac{1,6}{100} \times I + 0,5$$

t – srednja mjesečna temperatura zraka (°C)

I – godišnji toplinski indeks koji se dobije zbrajanjem dvanaest mjesečnih vrijednosti toplinskog indeksa (i)

a – vrijednost koja se izračuna iz godišnjeg toplinskog indeksa

k – korekcijski faktor koji se određuje za geografsku širinu i mjesec u godini

Izračun potencijalne evapotranspiracije (PET) prema metodi Ivanova dobiven je formulom:

$$PET = 0,0018 * (25 + t)^2 * (100 - r)$$

t – prosječna mjesečna temperatura zraka (°C)

r – prosječna mjesečna relativna vlažnost zraka (%)

Izračun potencijalne evapotranspiracije (PET) prema Blaney-Criddeleovoj metodi dobiven je formulom:

$$PET = 0,254 * (1,8t + 32) p * k$$

t – prosječna mjesečna temperatura zraka (°C)

p – prosječno mjesečno trajanje dana u % prema trajanju dana u godini

k – koeficijent koji ovisi o uzgajanoj kulturi

Prosječno mjesečno trajanje dana u % (p) preuzeto je iz Tomić (1988) za geografske širine meteoroloških postaja. Koeficijent (k) preuzet je za voćarske kulture (drvenasta vegetacija), za umjerene klimatske uvjete iznosi 0,50, a za aridne klimatske uvjete 0,65.

Model Penman–Monteitha (PNM) primjenjuje se u raznim regijama svijeta (Valipour 2014), ali njegova primjena zahtijeva mnogo parametara, od kojih je neke katkad teško

dobiti. Stoga su iznosi godišnje potencijalne evapotranspiracije prema metodi Penman-Monteitha preuzeti s mrežne platforme KNMI Climate Explorer (Climate Explorer: Starting point (knmi.nl)). Ta metoda temelji se na kombinaciji klimatskih elemenata (Rácz i dr. 2013) kao što su temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, brzina vjeta i insolacija.

Statistička obrada podataka – Statistical data processing

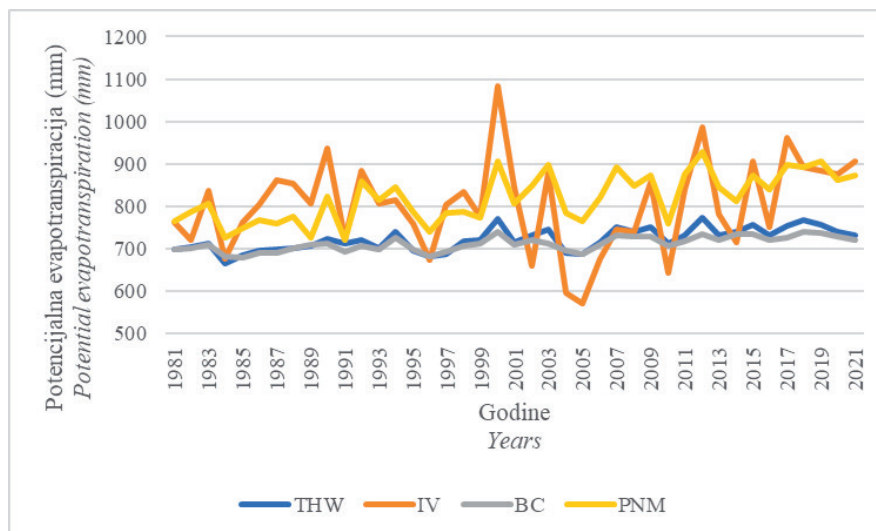
S obzirom na to da je Leveneov test homogenosti varijance bio statistički značajan ($p > 0,05$), godišnji iznosi potencijalne evapotranspiracije testirani su neparametarskim Kruskal-Wallisovim testom.

Budući da je korelacija dobar pokazatelj kako dvije vremenske serije i više njih slijede jedna drugu u varijaciji, koeficijent korelacije upotrijebljen je za usporedbu povezanosti metoda. Korelacije iznosa godišnje potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama utvrđene su Spearmanovom korelacijom ranga. Koeficijent korelacije (r) može biti izvrstan čak i ako je udaljenost dviju serija velika (Muhammad i dr. 2019)

Granica značajnosti iznosila je $p < 0,05$. Klimatski podaci obrađeni su u programu Klimasoft SE 1.1.1. (<https://github.com/mfrntic/klimasoft>). Statistička obrada podataka provedena je u programu Statistika 13 (TIBCO Software Inc. 2018).

REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM RESEARCH RESULTS WITH DISCUSSION

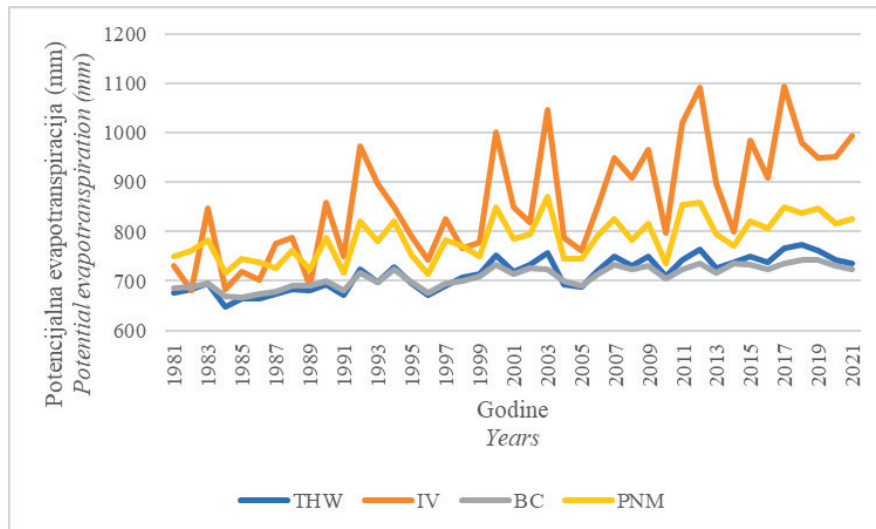
Iznosi potencijalne evapotranspiracije izračunati prema različitim metodama za meteorološku postaju Osijek prikazani su na slici 2. Godišnji iznosi potencijalne evapotran-



Slika 2. Iznos potencijalne evapotranspiracije za meteorološku postaju Osijek

Figure 2. The amount of potential evapotranspiration for Osijek weather station

THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Criddele, PNM – Penman-Monteith



Slika 3. Iznos potencijalne evapotranspiracije (mm) za meteorološku postaju Zagreb-Maksimir
Figure 3. The amount of potential evapotranspiration (mm) for Zagreb-Maksimir weather station

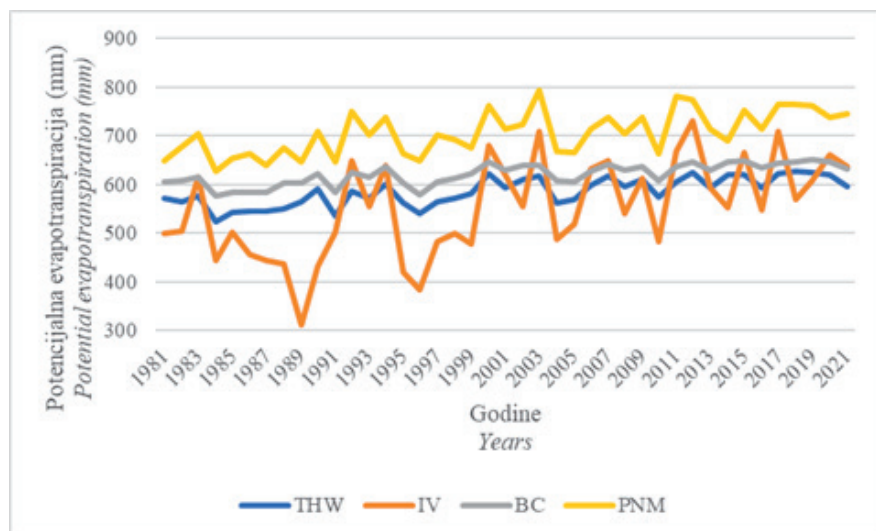
THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Criddle, PNM – Penman-Monteith

spiracije prema metodama Ivanova (IV) i Penman-Monteitha (PNM) bili su veći u odnosu na metode Thornthwaitea (THW) i Blaney-Criddlea (BC). Ipak, iznosi potencijalne evapotranspiracije izračunati prema različitim metodama preklapali su se tijekom promatranog razdoblja.

Apsolutno minimalni iznosi potencijalne evapotranspiracije bili su 666,1 mm prema metodi Thornthwaitea, 570,8 mm prema metodi Ivanova, 678,1 mm prema metodi Blaney-Criddlea i 720,0 mm prema Penman-Monteitha. Apsolutno maksimalni iznosi potencijalne evapotranspiracije bili su 773,4 (Thornthwaite), 1082,2 (Ivanov), 740,9 (Blaney-Criddle) i 927,0 mm (Penman-Monteith). Apsolutno mi-

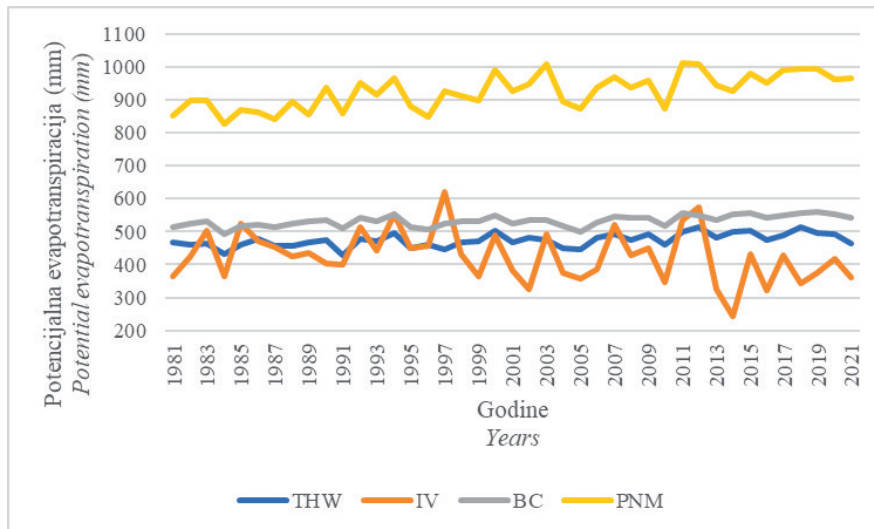
nimalni i apsolutno maksimalni iznosi potencijalne evapotranspiracije nisu bili istih godina. Apsolutno maksimalni iznosi potencijalne evapotranspiracije bili su 2000. i 2012. godine. Prema vrijednostima temperaturnih percentila 2000. godina (Katušin i dr. 2001), kao i 2012. godina (Pandžić i dr. 2014) bile su ekstremno tople godine.

Na slici 3 prikazani su iznosi potencijalne evapotranspiracije izračunati za meteorološku postaju Zagreb-Maksimir. Iznosi potencijalne evapotranspiracije prema metodama Ivanova i Penman-Monteitha bili su viši od iznosa izračunatih prema metodama Thornthwaitea i Blaney-Criddlea. Apsolutni minimum potencijalne evapotranspiracije prema



Slika 4. Iznos potencijalne evapotranspiracije (mm) za meteorološku postaju Parg
Figure 4. The amount of potential evapotranspiration (mm) for Parg weather station

THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Criddle, PNM – Penman-Monteith

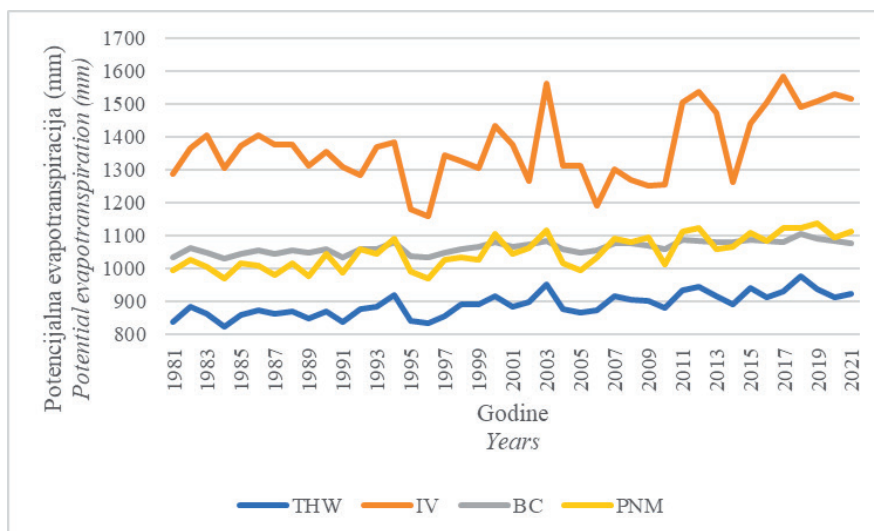


Slika 5. Iznos potencijalne evapotranspiracije (mm) za meteorološku postaju Zavižan
Figure 5. The amount of potential evapotranspiration (mm) for Zavižan weather station
 THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Criddle, PNM – Penman-Monteith

metodi Thornthwaitea iznosio je 647,9 mm, prema Ivanovu 680,7 mm, prema metodi Blaney-Criddlea 667,6 mm, a za Penman-Monteith iznosio je 714,0 mm. Apsolutno maksimalni iznosi potencijalne evapotranspiracije bili su 774,7 mm (Thornthwaite), 1094,4 mm (Ivanov), 743,4 mm (Blaney-Criddle) i 870,0 mm (Penman-Monteith). Apsolutno maksimalni iznosi potencijalne evapotranspiracije bili su 2003., 2017. i 2018. godine, koje su bile također ekstremno tople (Katušin i dr. 2004, Pandžić i dr. 2018, Pandžić i dr. 2019). Veće temperature zraka utječu na veću evaporaciju i transpiraciju (Weerasinghe, 1986; Penzar i Penzar, 2000; Ugarković i dr. 2018), zbog čega su i iznosi potencijalne evapotranspiracije u tim godinama bili maksimalni.

Na slici 4 prikazani su iznosi potencijalne evapotranspiracije u gorskoj Hrvatskoj za meteorološku postaju Parg. Apsolutno minimalni iznosi potencijalne evapotranspiracije bili su 523,9 mm prema metodi Thornthwaitea, zatim 312,0 mm prema metodi Ivanova, 576,9 mm prema metodi Blaney-Criddlea i 627,0 mm prema Penman-Monteithu. Apsolutno maksimalni iznosi potencijalne evapotranspiracije iznosili su 627,0 mm (Thornthwaite), 731,2 mm (Ivanov), 650,4 mm (Blaney-Criddle) i 792,0 mm (Penman-Monteith).

Apsolutno maksimalni iznosi potencijalne evapotranspiracije bili su 2003., 2012., 2018. i 2019. godine. Godine 2003.,



Slika 6. Iznos potencijalne evapotranspiracije (mm) za meteorološku postaju Hvar
Figure 6. The amount of potential evapotranspiration (mm) for Hvar weather station
 THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Criddle, PNM – Penman-Monteith

2012. i 2018. bile su ekstremno tople (Katušin i dr. 2004, Pandžić i dr. 2014, Pandžić i dr. 2019), dok je 2019. godina bila vrlo topla (Pandžić i dr. 2020).

Slika 5 prikazuje iznose potencijalne evapotranspiracije za meteorološku postaju Zavižan. Iznosi potencijalne evapotranspiracije prema metodi Penman-Monteitha bili su mnogo viši od ostalih metoda. Apsolutni minimumi prema metodama iznosili su 428,2 mm (Thornthwaite), 244,1 mm (Ivanov), 493,2 mm (Blaney-Criddle) te 828,0 mm (Penman-Monteith). Apsolutni maksimumi iznosili su 515,1 mm (Thornthwaite), 619,9 mm (Ivanov), 558,3 mm (Blaney-Criddle) te 1011,0 mm prema metodi Penman-Monteitha. Taj apsolutni maksimum bio je 2011. godine koja je na području Zavižana bila ekstremno topla (Pandžić i dr. 2013). Na području meteorološke postaje Zavižan dobili smo znatno veće godišnje iznose potencijalne evapotranspiracije prema metodi Penman-Monteitha u odnosu na ostale metode. Istraživanje Bormanna i dr. (2011) pokazalo je da modeli temeljeni na prijenosu mase (primjerice Penman-Monteithov model i Ivanov model) nisu prikladni za primjenu u vlažnim, sušnim i polusušnim vremenskim uvjetima. Stoga i mi pretpostavljamo da model Penman-Monteitha neopravdano daje znatno veće iznose u uvjetima vlažne borealne klime. Rezultati Rácz i dr. (2013) također su pokazali da najviše iznose PET-a daje metoda Penman-Monteitha.

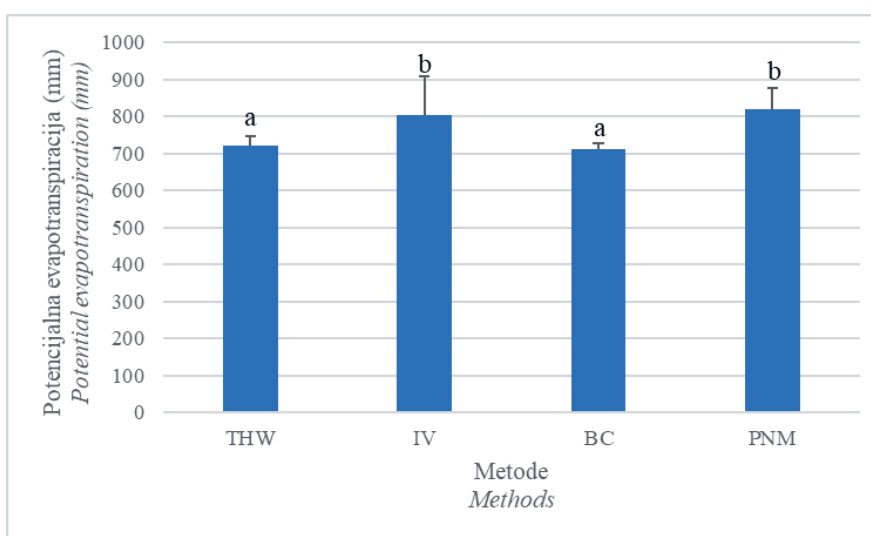
S druge strane rezultati Bakr i dr. (2021) pokazali su da je Penman-Monteithov model najbolji za izračun evapotranspiracije u sušnim uvjetima, a Ivanov model bio je najmanje točan s nižim vrijednostima korelacije i višim vrijednostima apsolutne stope pogreške od ostalih metoda. Prema

tim rezultatima istraživanja metoda Ivanova nije korelirala ni s jednom istraživanom metodom na području Zavižana u vlažnoj borealnoj klimi (tablica 2).

Iznosi potencijalne evapotranspiracije na meteorološkoj postaji Hvar jasno se razdvajaju prema metodama Ivanova i Thornthwaitea, dok se iznosi prema metodama Blaney-Criddlea i Penman-Monteitha preklapaju (slika 6). Najmanji iznosi bili su prema metodi Thornthwaitea, a najveći prema metodi Ivanova. Apsolutni minimumi potencijalne evapotranspiracije bili su 823,9 mm (Thornthwaite), zatim 1159,0 mm (Ivanov) i 1032,2 mm (Blaney-Criddle) te 969,0 mm prema metodi Penman-Monteitha. Apsolutni maksimumi potencijalne evapotranspiracije iznosili su 978,9 mm prema metodi Thornthwaitea, 1584,6 mm prema metodi Ivanova, 1105,1 mm prema metodi Blaney-Criddlea i 1137,0 mm prema metodi Penman-Monteitha (slika 6).

Sve te istraživane metode općenito rezultiraju malo drukčijim procjenama evapotranspiracije (slika 2 do slika 6), što ovisi i o korištenim klimatskim podacima. Do istih su rezultata došli Lemaitre-Basset i dr. 2022. godine.

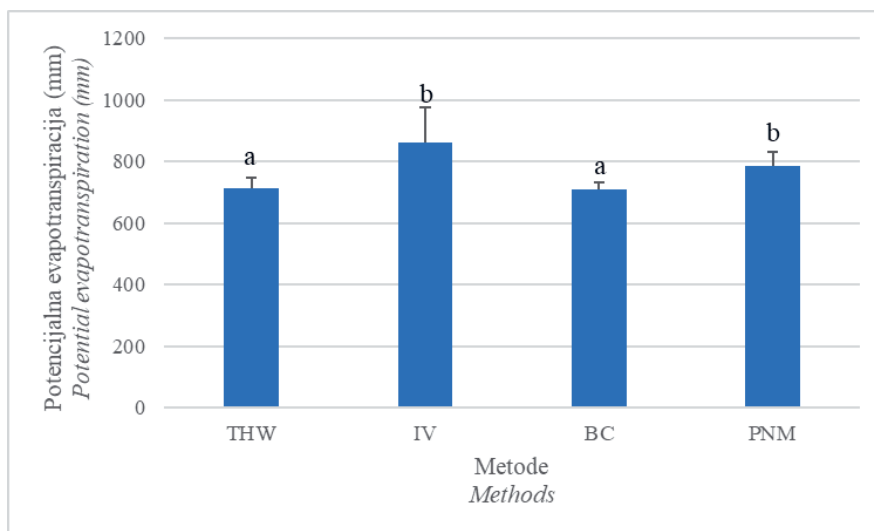
Na području meteorološke postaje Hvar dobili smo znatno više vrijednosti potencijalne evapotranspiracije prema metodi Ivanova. Neki autori svrstavaju je u skupinu metoda temeljenih na temperaturi (Muhammad i dr. 2019), neki u skupinu metoda temeljenih na vlažnosti (Hamed i dr. 2022), a neki u skupinu metoda temeljenih na prijenosu mase (Bormann 2011). Potrebno je detaljnije analizirati brzine vjetra na području meteorološke postaje Hvar, jer prema rezultatima koje donosi Weerasinghe (1986) model Ivanova funkcionirao bi zadovoljavajuće da je brzina vjetra mala.



Slika 7. Usporedba godišnjih iznosa potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama za meteorološku postaju Osijek. Stupci predstavljaju srednju vrijednost \pm standardna devijacija. Vrijednosti označene različitim slovom znatno se razlikuju, $p < 0,05$.

Figure 7. Comparison of annual amounts of potential evapotranspiration by different methods for Osijek weather station. Bars represent mean \pm standard deviation. Values marked with a different letter are significantly different, $p < 0.05$.

THW – Thornthwaite, IV-Ivanov, BC – Blaney-Criddle, PNM – Penman-Monteith



Slika 8. Usporedba godišnjih iznosa potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama za meteorološku postaju Zagreb-Maksimir. Stupci predstavljaju srednju vrijednost \pm standardna devijacija. Vrijednosti označene različitim slovom znatno se razlikuju, $p < 0,05$.

Figure 8. Comparison of annual amounts of potential evapotranspiration by different methods for Zagreb-Maksimir weather station. Bars represent mean \pm standard deviation. Values marked with a different letter are significantly different, $p < 0,05$.

THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Criddle, PNM – Penman-Monteith

Za područje Pakistana metoda Ivanova pokazala se kao najbolja među modelima na bazi vlage (Hamed i dr. 2022).

Za određeno mjesto ili godinu utvrđeni su slični iznosi potencijalne evapotranspiracije za neke metode temeljene na temperaturi (slika 2 do slika 6). Metodama Ivanova i Penman-Monteitha utvrđeni su viši iznosi PET-a u odnosu na metode Thornthwaitea i Ivanova. Slične rezultate za iznose potencijalne evapotranspiracije prema metodi Thornthwaitea dobili su Lu i dr. (2005).

Drugi pak autori smatraju da je Thornthwaiteov model dobra metoda za procjenu potencijalne evapotranspiracije u Iraku (Al-Sudani, 2018, Bakr i dr. 2021) gdje prevladavaju sušni klimatski uvjeti.

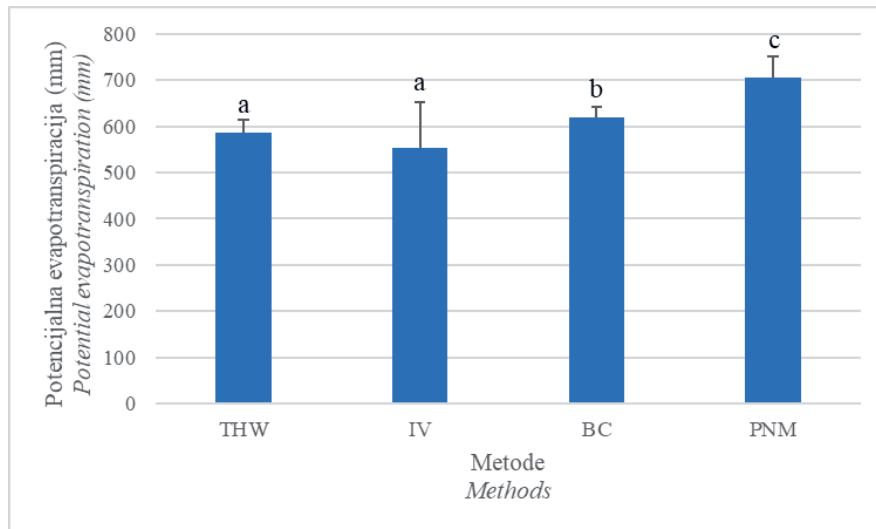
Za meteorološku postaju Osijek prosječan godišnji iznos potencijalne evapotranspiracije prema metodi Thornthwaitea iznosio je 721,4 mm, Ivanova 802,2 mm, Blaney-Criddlea 711,3 mm i Penman-Monteitha 819,4 mm (slika 7). Prema rezultatima Kruskal-Wallisova testa ($H = 73,60$; Chi-Square = 84,78) nije postojala značajna razlika u iznosima godišnje potencijalne evapotranspiracije između metoda Thornthwaitea i Blaney-Criddlea te metoda Ivanova i Penman-Monteitha ($p = 0,393$). Metode Thornthwaitea i Blaney-Criddlea temeljene su na temperaturnoj osnovi, gdje je temperatura zraka glavni ulazni podatak za izračun vrijednosti PET-a. Stoga su te dvije metode bliske te između njih nije bilo statistički značajne razlike. Metode Ivanova i Penman-Monteitha kombinirane su metode koje primjenjuju minimalno dva klimatska elementa za izračun potencijalne evapotranspiracije te nisu dobivene statistički značajne razlike u vrijednostima PET-a između njih. Bormann

i dr. (2011) svrstavaju metodu Ivanova u skupinu metoda temeljenih na prijenosu mase, kao i metodu Penman-Monteitha.

Za meteorološku postaju Zagreb-Maksimir prosječan godišnji iznos potencijalne evapotranspiracije iznosio je 714,7 mm prema metodi Thornthwaitea, 860,0 mm prema Ivanovu, 709,3 mm prema metodi Blaney-Criddlea i 786,0 mm prema Penman-Monteithu (slika 8). Postojala je statistički značajna razlika u godišnjem iznosu potencijalne evapotranspiracije prema metodi Ivanova i Penman-Monteitha u odnosu na ostale dvije metode ($H = 84,79$; Chi-Square = 80,48; $p > 0,001$).

Za meteorološke postaje Osijek i Zagreb-Maksimir dobiveni su isti odnosi godišnjeg iznosa potencijalne evapotranspiracije za istraživane metode, odnosno jednu skupinu čine metode Thornthwaite i Blaney-Criddle, a drugu skupinu čine metode Ivanova i Penman-Monteitha. Metode koje primjenjuju iste klimatske elemente za izračun potencijalne evapotranspiracije daju i sličnije rezultate izračuna, odnosno među njima nema statistički značajne razlike.

U gorskoj Hrvatskoj (slika 9) prosječan godišnji iznos potencijalne evapotranspiracije bio je najveći prema metodi Penman-Monteitha u iznosu od 705,9 mm i značajno se razlikovao od iznosa prema metodi Thornthwaitea (585,2 mm), Ivanova u iznosu od 553,0 mm i Blaney-Criddlea (620,29 mm) ($H = 91,28$; Chi-Square = 69,17; $p > 0,001$). Postojala je statistički značajna razlika između metoda temeljenih na temperaturi zraka, Thornthwaitea i Blaney-Criddlea ($p = 0,013$), dok nije utvrđena statistički značajna razlika u iznosima za metode Thornthwaitea i Ivanova.



Slika 9. Usporedba godišnjih iznosa potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama za meteorološku postaju Parg. Stupci predstavljaju srednju vrijednost \pm standardna devijacija. Vrijednosti označene različitim slovom znatno se razlikuju, $p < 0,05$.

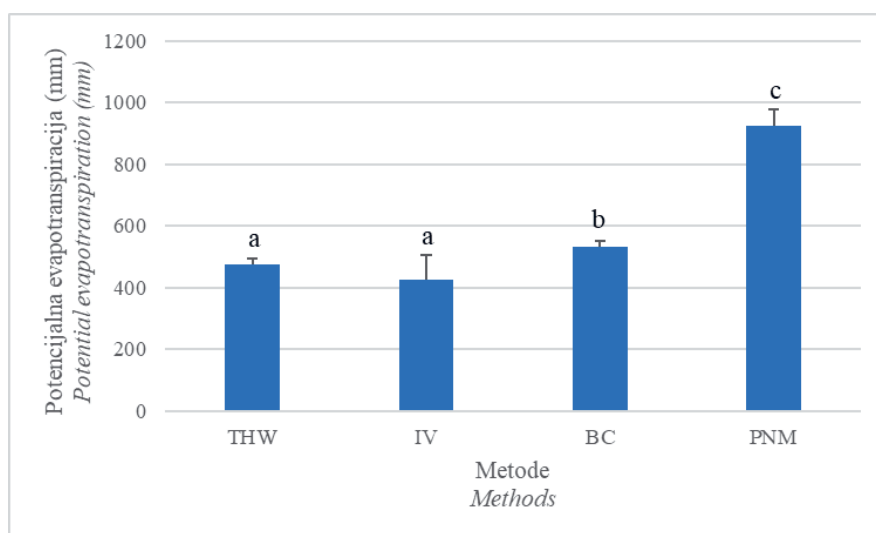
Figure 9. Comparison of annual amounts of potential evapotranspiration by different methods for Parg weather station. Bars represent mean \pm standard deviation. Values marked with a different letter are significantly different, $p < 0.05$.

THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Cridde, PNM – Penman-Monteith

Isti odnos iznosa potencijalne evapotranspiracije među različitim metodama zabilježen je i na meteorološkoj postaji Zavižan (slika 10). Također je na toj meteorološkoj postaji najveći prosječan godišnji iznos potencijalne evapotranspiracije bio prema metodi Penman-Monteitha (925,5 mm) u odnosu na metodu Thornthwaitea (474,1 mm), Ivanova (427,1 mm) i Blaney-Criddelea (532,8 mm). Te razlike bile su i statistički značajne ($H = 130,18$; Chi-Square = 123,02; $p > 0,001$). Za meteorološku postaju Zavižan potrebno je

neizravno izračunati iznose potencijalne evapotranspiracije prema metodi Penman-Monteitha i usporediti ih s podacima dobivenim s mrežne platforme KNMI Climate Explorer.

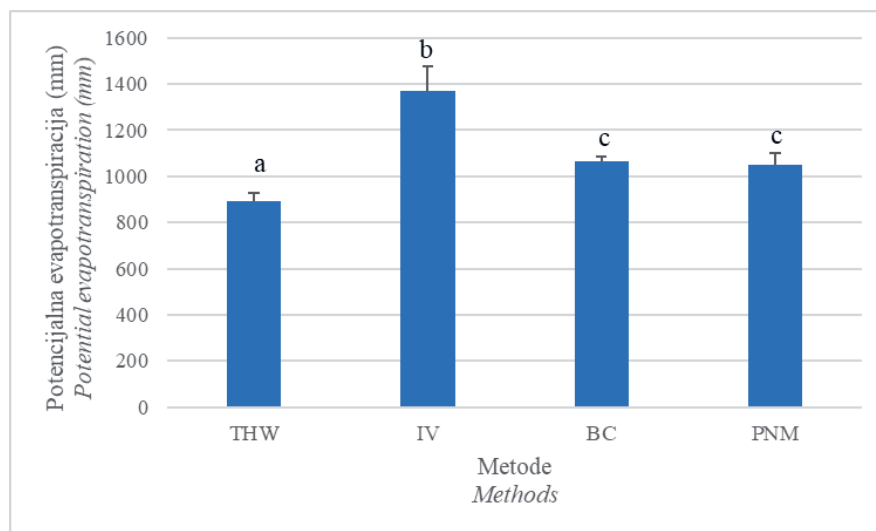
Na području sredozemne klime (slika 11) postojala je statistički značajna razlika u godišnjem iznosu potencijalne evapotranspiracije za metode Blaney-Criddelea i Penman-Monteitha u odnosu na metode Thornthwaitea i Ivanova ($H = 137,82$; Chi-Square = 84,39; $p > 0,001$). Godišnji iznos potencijalne evapotranspiracije prema metodi Thornthwa-



Slika 10. Usporedba godišnjih iznosa potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama za meteorološku postaju Zavižan. Stupci predstavljaju srednju vrijednost \pm standardna devijacija. Vrijednosti označene različitim slovom znatno se razlikuju, $p < 0,05$.

Figure 10 Comparison of annual amounts of potential evapotranspiration by different methods for Zavižan weather station. Bars represent mean \pm standard deviation. Values marked with a different letter are significantly different, $p < 0.05$.

THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Cridde, PNM – Penman-Monteith



Slika 11. Usporedba godišnjih iznosa potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama za meteorološku postaju Hvar. Stupci predstavljaju srednju vrijednost \pm standardna devijacija. Vrijednosti označene različitim slovom znatno se razlikuju, $p < 0,05$.

Figure 11. Comparison of annual amounts of potential evapotranspiration by different methods for Hvar weather station. Bars represent mean \pm standard deviation. Values marked with a different letter are significantly different, $p < 0,05$.

THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Criddle, PNM – Penman-Monteith

itea i Ivanova također se značajno razlikovao ($p > 0,001$). Najveći prosječan godišnji iznos potencijalne evapotranspiracije bio je prema metodi Ivanova (1368,6 mm), zatim prema metodi Blaney-Criddlea (1065,0 mm), slijedi metoda Penman-Monteitha (1051,0 mm), a najmanji prema metodi Thornthwaitea (891,6 mm).

Međutim, kao i u istraživanju Lu i dr. (2005), multivarijatni statistički testovi pokazali su da su iznosi potencijalne evapotranspiracije iz različitih metoda bili značajno različiti (slika 6 do 10). Razlike u prosječnim godišnjim iznosima potencijalne evapotranspiracije među metodama na području vlažne borealne klime i sredozemne klime s vrućim ljetom iznosile su od 477,0 do 498,3 mm, dok su na području umjereno tople kišne klime s vrućim i toplim ljetom iznosile od 108,1 do 152,9 mm.

Na području nizinske Hrvatske nismo pronašli statistički značajne razlike između metoda temeljenih na temperaturi (Thornthwaite i Blaney-Criddle) kao ni između metoda temeljenih na vlažnosti i prijenosu mase (Ivanov i Penman-Monteith). U gorskoj i pretplaninskoj Hrvatskoj nisu pronađene razlike između metoda Thornthwaitea i Ivanova, dok u sredozemnoj Hrvatskoj nije bilo značajnih razlika u iznosima prema metodama Blaney-Criddlea i Penman-Monteitha.

U perhumidnim klimama (meteorološke postaje Parg i Zavižan) prosječno najmanji iznos potencijalne evapotranspiracije jest prema metodi Ivanova, dok u semihumidnim i semiaridnim klimama ta metoda daje prosječno najveći iznos potencijalne evapotranspiracije. Osim toga, relativna vlažnost zraka kao klimatski element vrlo je varijabilna i

promjenjiva kako tijekom dana, tako i u sezoni (Penzar i Penzar 2000), što utječe na izračun potencijalne evapotranspiracije.

Istraživanja Federer i dr. (1996) te Vörösmarty i dr. (1998) sugeriraju da različite metode mogu dati značajno različite rezultate. U njihovu istraživanju te se razlike kreću od stotinu milimetara vode, čak i više od 700 mm. U našem istraživanju razlike u godišnjim iznosima potencijalne evapotranspiracije iznosile su 108,1 mm za Osijek, 150,7 mm za Zagreb-Maksimir, 152,9 mm na području Parga, 477,0 mm na području Zavižana i 498,3 mm na području Hvara.

Amatya i dr. (1995) otkrili su da je Thornthwaiteova metoda imala najlošije rezultate u usporedbi s iznosima potencijalne evapotranspiracije prema Penman-Monteithu, koja je upotrijebljena kao standardna metoda za usporedbe. Nasuprot tomu, Jakimavicius i dr. (2013) utvrdili su da je model Thornthwaitea dao najprecizniju procjenu isparavanja na području Baltika. U usporedbi s metodom Penman-Monteitha na području meteoroloških postaja Osijek i Zagreb-Maksimir metoda Blaney-Criddlea imala je najlošije rezultate, dok je na području Parga, Zavižana i Hvara to bila metoda Ivanova.

Istraživanja Rácz i dr. (2013) pokazala su da je model Blaney-Criddlea najbliži Penman-Monteithu, metodi s referentnom vrijednosti potencijalne evapotranspiracije. U ovom istraživanju to smo dobili samo za područje s maritimnim oborinskim režimom (Parg, Zavižan i Hvar), dok je na području nizinske Hrvatske s kontinentalnim oborinskim režimom (Osijek i Zagreb-Maksimir) metoda Ivanova

najbliža metodi Penman-Monteitha prema godišnjim iznosima.

Na području gorske, pretplaninske i sredozemne Hrvatske pronađene su razlike u iznosu potencijalne evapotranspiracije između metoda Thornthwaitea i Blaney-Criddlea, a do takva zaključka došli su Lu i dr. (2005) uspoređujući metode temeljene na temperaturi. Pri izračunu potencijalne evapotranspiracije Alexandris i dr. (2008) primarno preporučuju metode koje se zasnivaju na radijaciji, a tek potom metode na bazi temperature zraka.

Učinkovitost modela izračuna potencijalne evapotranspiracije ovisi o lokalnoj klimi (Muhammad i dr. 2019), stoga je važno pronaći odgovarajući model na temelju dostupnosti vremenskih podataka.

Muhammad i dr. (2019) sugeriraju da se model Ivanova, koji zahtijeva samo srednju temperaturu i relativnu vlažnost zraka, može primjenjivati za krajnji slučaj u kontekstu dostupnosti podataka.

Rezultati Saparuddin i Wicana (2020) pokazali su da su relativno najosjetljivije na temperaturne promjene metode Thornthwaitea i Blaney-Criddlea, a zatim Penman-Monteitha i Ivanova. Promjene koje se događaju s temperaturom zraka (klimatske promjene) bit će praćene promjenama drugih klimatskih elementa, uključujući oborine, sunčevo zračenje, vlažnost zraka i brzinu vjetra.

Stoga klimatske promjene mogu izazvati dodatnu neizvjesnost, jer svaka formula može drukčije reagirati na promjene klimatskih elemenata kao ulaznih podataka.

U tablici 2 prikazani su korelacijski koeficijenti između godišnjih iznosa potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama. Na području nizinske Hrvatske (meteorološke postaje Osijek i Zagreb-Maksimir) najveća korelacija bila je za iznose potencijalne evapotranspiracije prema metodama Thornthwaitea i Blaney-Criddlea ($r = 0,95^*$ i $r = 0,96^*$), a najmanje prema metodama Blaney-Criddlea i Ivanova ($r = 0,49^*$ i $r = 0,83^*$).

Na području gorske Hrvatske, meteorološka postaja Parg najveća korelacija bila je između metoda Thornthwaitea i Blaney-Criddlea ($r = 0,98^*$), a najmanja između metoda Thornthwaitea i Ivanova ($r = 0,79^*$) te Blaney-Criddlea i Ivanova ($r = 0,79^*$).

Za meteorološku postaju Zavižan, vlažna borealna klima najveća korelacija bila je između vrijednosti potencijalne evapotranspiracije prema metodi Thornthwaitea i Blaney-Criddlea ($r = 0,88^*$) te Blaney-Criddlea i Penman-Monteitha ($r = 0,88^*$). U tom klimatskom tipu iznosi potencijalne evapotranspiracije prema metodi Ivanova nisu imale statistički značajne korelacije s drugim metodama. U sredozemnoj klimi najveća korelacija bila je između metoda Thornthwaitea i Blaney-Criddlea ($r = 0,97^*$), a najmanja između metoda Thornthwaitea i Ivanova ($r = 0,57^*$). Iako

Tablica 2. Neparametarska Spearmanova korelacija iznosa potencijalne evapotranspiracije prema različitim metodama

Table 2. Non-parametric Spearman's correlation of the amount of potential evapotranspiration by different methods

meteorološka postaja <i>weather station</i>	metode PET <i>PET methods</i>	THW	IV	BC	PNM
Osijek	THW	1,00	–	–	–
	IV	0,57*	1,00	–	–
	BC	0,95*	0,49*	1,00	–
	PNM	0,87*	0,61*	0,85*	1,00
Zg-Maksimir	THW	1,00	–	–	–
	IV	0,90*	1,00	–	–
	BC	0,96*	0,83*	1,00	–
	PNM	0,90*	0,92*	0,83*	1,00
Parg	THW	1,00	–	–	–
	IV	0,79*	1,00	–	–
	BC	0,98*	0,79*	1,00	–
	PNM	0,88*	0,86*	0,88*	1,00
Zavižan	THW	1,00	–	–	–
	IV	0,08	1,00	–	–
	BC	0,88*	0,07	1,00	–
	PNM	0,79*	0,14	0,88*	1,00
Hvar	THW	1,00	–	–	–
	IV	0,59*	1,00	–	–
	BC	0,97*	0,61*	1,00	–
	PNM	0,93*	0,57*	0,93*	1,00

*signifikantno, $p < 0,05$

*significant, $p < 0.05$

PET – potencijalna evapotranspiracija, THW – Thornthwaite, IV – Ivanov, BC – Blaney-Criddle, PNM – Penman-Monteith

se različite metode temelje na različitim klimatskim elementima, metode koje primjenjuju isti klimatski element imaju veće korelacije i manje razlike u godišnjim iznosima potencijalne evapotranspiracije.

Prema istraživanju Lu i dr. (2005) iznosi potencijalne evapotranspiracije izračunati iz različitih metoda bili su u visokoj korelaciji, a koeficijenti korelacije iznosili su od 0,85 do 1,00.

U ovom istraživanju koeficijenti korelacije prema jakosti bili su srednje do visoke jakosti korelacije, a za različite metode i različite klimatske tipove iznosili su od 0,49 do 0,98.

Prema rezultatima Weerasinghe (1996) korelacija iznosa potencijalne evapotranspiracije između metoda Thornthwaitea i Ivanova iznosila je $r = 0,40$. Na području različitih klimatskih tipova u Hrvatskoj korelacija između tih dviju metoda kretala se od $r = 0,57$ do $r = 0,90$, dok na području vlažne borealne klime statistički značajna korelacija nije ni postojala.

Istraživanja Bakr i dr. (2021) u Iraku pokazala su da je Ivanov model bio najmanje točan s nižim vrijednostima korelacije i višim vrijednostima apsolutne stope pogreške od ostalih metoda. Prema ovim rezultatima istraživanja metoda Ivanova nije korelirala ni s jednom istraživanom metodom na području Zavižana u vlažnoj borealnoj klimi (tablica 2).

ZAKLJUČCI CONCLUSIONS

Primijenjene metode dale su širok raspon vrijednosti potencijalne evapotranspiracije, pokazujući razlike u prosječnom godišnjem iznosu u različitim klimatskim tipovima i vegetacijskim pojasevima u Hrvatskoj. Najveće prosječne vrijednosti godišnje potencijalne evapotranspiracije uglavnom su dobivene prema metodi Penman-Monteitha, a slijedi je metoda Ivanova na području Zagreb-Maksimira i Hvara. Apsolutno minimalne i apsolutno maksimalne vrijednosti potencijalne evapotranspiracije uglavnom su dobivene prema metodi Ivanova.

Najveće razlike u prosječnim godišnjim iznosima potencijalne evapotranspiracije među metodama bile su na području vlažne borealne klime i sredozemne klime s vrućim ljetom, a najmanje na području umjereno tople kišne klime s vrućim i toplim ljetom. Prema prosječnim godišnjim iznosima potencijalne evapotranspiracije metodi Penman-Monteitha kao referentnoj metodi na području nizinske Hrvatske najbliža je bila metoda Ivanova, dok na području gorske, pretplaninske i sredozemne Hrvatske najbliža je metoda Blaney-Criddelea. Uzmemo li u obzir da je metoda Penman-Monteitha referentna i općepriznata metoda za izračun potencijalne evapotranspiracije, preliminarnim rezultatima istraživanja za nizinski vegetacijski pojas prepo-

ručujemo uporabu metode Ivanova, a za gorski, pretplaninski i mediteranski vegetacijski pojas metodu Blaney-Criddelea. Međutim, za potpuniju analizu i zaključak potrebno je izračunati iznose potencijalne evapotranspiracije prema metodi Penman-Monteitha i napraviti statističku analizu podataka. Metoda Penman-Monteitha najviše je korelirala s metodama Thornthwaitea i Ivanova u umjerenom toploj kišnoj klimi s vrućim i toplim ljetom te Thornthwaitea i Blaney-Criddelea u umjereno toploj kišnoj klimi s toplim ljetom, vlažnoj borealnoj klimi i sredozemnoj klimi. Najveća korelacija zabilježena je između metoda Thornthwaitea i Blaney-Criddelea, a najmanja između metoda Ivanova i Blaney-Criddelea. Na području vlažne borealne klime iznos godišnje potencijalne evapotranspiracije prema metodi Ivanova nije statistički značajno korelirao s vrijednostima ostalih metoda.

LITERATURA REFERENCES

- Ahmed, K., S. Shahid, N. Nawaz, 2018: Impacts of climate variability and change on seasonal drought characteristics of Pakistan. *Atmos Res*, 214: 364–374.
- Alexandris, S., R. Stricevic, S. Petkovic, 2008: Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, 21/22: 17–28.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith, 1998: Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage. Paper no. 56. FAO, Rome.
- Al-Sudani H., Z. Ilaibi, 2018: Study of morphometric properties and water balance using Thornthwaite method in Khanaqin Basin, East of Iraq. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences* 26(3): 165–175.
- Amatya, D. M., R. W. Skaggs, J. D. Gregory, 1995: Comparison of Methods for Estimating REF-ET. *J Irrig Drain E*, 121: 427–435.
- Bakr, D., J. Al-Khalidi, A. S. Hadi, 2021: Comparison of Some Mathematical Models to calculate Evapotranspiration in Contrasting Regions of Iraq. *Environment Asia*, 14 (2): 40–50.
- Bormann, H., 2011: Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations. *Clim Chang*, 104 (3–4): 729–753.
- Climate Explorer: Starting point (knmi.nl)
- Currie, D. J., 1991: Energy and Large-Scale Patterns of Animal and Plant Species Richness. *The American Naturalist*, 137 (1): 27–49.
- Federer, C. A., C. Vörösmarty, B. Fekete, 1996: Intercomparison of Methods for Calculating Potential Evaporation in Regional and Global Water Balance Models. *Water Resour Res*, 32: 2315–2321.
- Fennessey, N. M., R. M. Vogel, 1996: Regional Models of Potential Evaporation and Reference ET for the Northeast USA. *J Hydrol*, 184: 337–354.

- Ferina, J., V. Vučetić, T. Bašić, M. Anić, 2021: Spatial distribution and long-term changes in water balance components in Croatia. *Theor Appl Climatol* 144: 1311–1333.
- Grismer, M. E., M. Orang, R. Snyder, R. Matyac, 2002: Pan Evaporation to Reference Evapotranspiration Conversion Methods. *J Irrig Drain Eng*, 128 (3): 180–184.
- Gocić, M., S. Trajković, 2014: Analysis of trends in reference evapotranspiration data in a humid climate. *Hydrol Sci J*, 59: 165–180.
- Hamed, M. M., N. Khan, M. K. I. Muhammas, S. Shadid, 2022: Ranking of Empirical Evapotranspiration Models in Different Climate Zones of Pakistan. *Land*, (11), 2168: 1–18.
- Jaber, H. S., S. Mansor, B. Pradhan, N. Ahmad, 2017: Rainfall–runoff modelling and water balance analysis for Al-Hindiyah barrage, Iraq using remote sensing and GIS. *Geocarto Int*, (32): 1407–1420.
- Jakimavicius, D., J. Kriauciuniene, B. Gailiusis, D. Sarauskiene, 2013: Assessment of uncertainty in estimating the evaporation from the Curonian Lagoon. *Baltica*, (26) 2: 177–186.
- Jensen, M. E., R. D. Burman, R. G. Allen, 1990: Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. American Society of Civil Engineers, New York, New York, 332 pp.
- Jensen, M. E., R. G. Allen, 2016: Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements, American Society of Civil Engineers, second edition edn., <https://doi.org/10.1061/9780784414057>, eprint:<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784414057>
- Jug, D., B. Stipešević, I. Jug, M. Mesić, 2011: Agroklimatološki pojmovnik. Poljoprivredni fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, str. 118.
- Katušin, Z., L. Srnc, M. Mileta, 2001: Praćenje i ocjena klime u 2000. godini. *Prikazi br. 10*, str. 39.
- Katušin, Z., M. Mileta, D. Hercigonja, 2004: Praćenje i ocjena klime u 2003. godini. *Prikazi br. 13*, str. 52.
- Klimasoft SE 1.1.1. (<https://github.com/mfrntic/klimasoft>)
- Kolka, R. K., A. T. Wolf, 1998: Estimating Actual Evapotranspiration for Forested Sites: Modifications to the Thornthwaite Model. Res. Note SRS-6, USDA Forest Service, Southern Research Station, Asheville, North Carolina, 7 pp.
- Kumari, N., A. Srivastava, 2020: An Approach for Estimation of Evapotranspiration by Standardizing Parsimonious Method. *Agric Res*, 9: 301–309.
- Lemaitre-Basset, T., L. Oudin, G. Thirel, L. Collet, 2022: Unraveling the contribution of potential evaporation formulation to uncertainty under climate change. *Hydrol Earth Syst Sc* 26: 2147–2159.
- Liu Z, H. Kennethg, L. Xiaomao, Y. Xiaoguang, 2013: Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Global Change Biol*, 19 (11): 3481–3492.
- Lu, J., G. Sun, S. G. McNulty, D. M. Amatya, 2005: A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States. *J Am Water Resour As*, 03175: 621–633.
- Nemani R, W. Michael, T. Peter, N. Kenlo, R. Swarna, J. Jennifer, R. Steven, 2002: Recent trends in hydrologic balance have enhanced the terrestrial carbon sink in the United States. *Geophys Res Lett*, 29 (10): 1061–1064.
- Mohsenipour, M., S. Shahid, E.S. Chung, X.J. Wang, 2018: Changing Pattern of Droughts during Cropping Seasons of Bangladesh. *Water Resour Manag*, 32: 1555–1568.
- Muhammad, M. K. I., M. S. Nashwan, S. Shahid, T. B. Ismail, Y. H. Song, E-S. Chung, 2019: Evaluation of Empirical Reference Evapotranspiration Models Using Compromise Programming: A case Study of Peninsular Malaysia. *Sustainability*, 11, 4267.
- Pandžić, K., T. Likso, D. Hercigonja, 2013: Praćenje i ocjena klime u 2011. godini. *Prikazi br. 23*, str. 40.
- Pandžić, K., T. Likso, D. Hercigonja, 2014: Praćenje i ocjena klime u 2012. godini. *Prikazi br. 24*, str. 46.
- Pandžić, K., T. Likso, T. Trošić Lesar, 2018: Praćenje i ocjena klime u 2017. godini. *Prikazi br. 29*, str. 63.
- Pandžić, K., T. Likso, T. Trošić Lesar, 2019: Praćenje i ocjena klime u 2018. godini. *Prikazi br. 30*, str. 63.
- Pandžić, K., T. Likso, T. Trošić Lesar, 2020: Praćenje i ocjena klime u 2019. godini. *Prikazi br. 31*, str. 59.
- Penzar, I., B. Penzar, 2000: Agroklimatologija. Školska knjiga, Zagreb, str. 222.
- Perčec Tadić, M., M. Gajić-Čapka, K. Zaninović, K. Cindrić, 2014: Drought Vulnerability in Croatia. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 79 (1): 31–38.
- Rácz, C., J. Nagy, A. C. Dobos, 2013: Comparison of Several Methods for Calculation of Reference Evapotranspiration. *Acta Silv Lign Hung*, 9: 9–24.
- Sapparuddin, W. S., Wicana, S., 2020: Sensitivity of methods for estimating potential evapotranspiration to climate change. *IOP. Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 437 (012039): 1–9.
- Shahid, S., 2011: Impact of climate change on irrigation water demand of dry season Boro rice in northwest Bangladesh. *Clim Chang*, 105: 433–453.
- Shiru, M. S., S. Shahid, N. Alias, 2018: Chung, E.S. Trend analysis of droughts during crop growing seasons of Nigeria. *Sustainability*, 10, 871.
- Šegota, T., A. Filipčić, 2003: Köppenova podjela klime i hrvatsko nazivlje. *Geoadria*, 8 (1): 17–37.
- Šimunić, I., 2013: Uređenje voda, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb, str. 260.
- Tabari, H., M. Grismer, S. Trajkovic, 2011: Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrig Sci*, 31: 107–117.
- Tao, H., L. Diop, A. Bodian, K. Djaman, P. M. Ndiaye, Z. M. Yaseen, 2018: Reference evapotranspiration prediction using hybridized fuzzy model with firefly algorithm: Regional case study in Burkina Faso. *Agric Water Manag*, 208: 140–151.
- TIBCO Software Inc, 2018: Statistica (data analysis software system), version 13, <http://tibco.com>
- Tomić, F., 1988: Navodnjavanje, Savez poljoprivrednih inženjera i tehničara Hrvatske, Fakultet poljoprivrednih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, str. 154.
- Ugarković, D., N. Kelava Ugarković, 2013: Changes and trends of climate elements and indices in the region of Mediterranean Croatia. *Journal of Central European Agriculture*, 14 (1): 236–249.
- Ugarković, D., I. Tikvić, K. Popić, J. Malnar, I. Stankić, 2018: Microclimate and natural regeneration of forests gaps as a con-

- sequence of Silver fir (*Abies alba* Mill.) dieback. Sumar List, 5-6: 235–245.
- Ugarković, D., V. Paulić, I. Šapić, I. Poljak, M. Ančić, I. Tikvić, I. Stankić, 2022: Climatic relationship of Vegetation in Forest Stands in the Mediterranean Vegetation Belt of the Eastern Adriatic. *Atmosphere*, 13, 1709.
 - Valipour, M., 2014: Application of new mass transfer formulae for computation of evapotranspiration. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2 (1): 33–46.
 - Valipour, M., 2015: Future of agriculture water management in Africa. *Arch Agron Soil Sci*, 61 (7): 907–927.
 - Vörösmarty, C. J., C. A. Federer, A. L. Schloss, 1998: Potential Evaporation Functions Compared on US Watersheds: Possible Implications for Global-Scale Water Balance and Terrestrial Ecosystem Modeling. *J Hydrol*, 207: 147–169.
 - Vučetić, V., M. Anić, 2021: *Agroklimatski atlas Hrvatske u razdoblju 1991.–2020.* Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, str. 447.
 - Zaninović, K., M. Gajić-Čapka, 2000: Changes in Components of the Water Balance in the Croatian Lowlands. *Theor Appl Climatol* 65: 111–117.
 - Zhang, K., J. S. Kimball, S. W. Running, 2016: A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Water*, 3: 834–853.
 - Xiang, K., Y. Li, R. Horton, H. Feng, 2020: Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. *Agr Water Manage*, 232: 106043.
 - Xu, C. Y., D. Chen, 2005: Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrol Process*, 19: 3717–3734.
 - Weerasinghe, K. D. N., 1986: Comparative study of temperature based equations in estimation of potential evaporation for Anguna-Kolapelessa in the arid zone of southern Sri Lanka. *J Natn Sci Coun Sri Lanka*, 14 (1): 75–82.

SUMMARY

Evapotranspiration is an important part of the hydrological water cycle as well as an important component in irrigation planning and drought determination. The aim of this research is to compare the amounts of potential evapotranspiration according to different methods in different climate types as well as the correlation between them. Potential evapotranspiration (in mm) was calculated according to Thornthwaite, Ivanov, Blaney-Criddle and Penman-Monteith methods for Osijek, Zagreb-Maksimir, Parg, Zavižan and Hvar weather stations. Osijek weather station has a Cfa climate type, a moderately warm rainy climate with hot summers. Zagreb-Maksimir and Parg weather stations have Cfb climate type, moderately warm humid climate with hot summers. Zavižan weather station has Df climate type, humid boreal climate, while Hvar weather station is located in the area of Mediterranean climate with hot summers (Csa climate type). In the area of lowland Croatia in Cfa and Cfb climate types, the average amount of potential evapotranspiration was the lowest according to the Blaney-Criddle method (709.30 mm), and the highest according to the Ivanov method (859.95 mm). For Parg weather station in mountainous Croatia, Cfb climate type, the lowest average amount of potential evapotranspiration was found according to the Ivanov method (553.01 mm), while in this case the highest amount was found according to the Penman-Monteith method (705.87 mm). On Hvar, Csa type climate, the smallest amount of potential evapotranspiration was recorded according to the Thornthwaite method (891.57 mm), and the largest according to the Ivanov method in the amount of 1368.55 mm. According to the average annual values of potential evapotranspiration, the Penman-Monteith method was the closest to the Ivanov method in the area of lowland Croatia, and the Blaney-Criddle method in the area of mountainous, sub-mountainous and Mediterranean Croatia. The highest correlation in the amount of $r = 0.98^*$ was between the Thornthwaite and Blaney-Criddle methods, and the smallest in the amount of $r = 0.49^*$ was determined between the Ivanov and Blaney-Criddle methods. The Penman-Monteith, Thornthwaite and Ivanov methods in lowland Croatia, and Thornthwaite and Blaney-Criddle methods in mountainous, pre-mountainous and Mediterranean Croatia had the highest correlation.

KEY WORDS: potential evapotranspiration, climate, climate type