

ANALIZA SEDAM INDIREKTNIH METODA ZA PRORAČUN
REFERENTNE EVAPOTRANSPIRACIJE U
KLIMATSKIM USLOVIMA SRBIJE

Dženita F. Idrizović*, **Gordana S. Matović,**
Enika N. Gregorić i Ružica J. Stričević

Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet,
Nemanjina 6, 11080 Beograd-Zemun, Srbija

Sažetak: Za izračunavanje potreba za vodom poljoprivrednih kultura neophodno je imati uvid u proces evapotranspiracije. Metoda Penman-Monteith (FAO56-PM), koja je od strane Međunarodne komisije za navodnjavanje i odvodnjavanje (engl. *International Commission on Irrigation and Drainage – ICID*) i Organizacije za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija (engl. *Food and Agriculture Organisation – FAO*) predložena za proračun referentne evapotranspiracije (ET_o), zahteva poznavanje više klimatskih parametara, koji često nisu dostupni. Zato su u ovom radu testirane metode za proračun ET_o koje koriste manji broj podataka i upoređivane sa FAO56-PM. Izabrane su metode koje su najčešće korišćene kao zamena za FAO56-PM: Hargreaves, modifikovani Hargreaves, Copais, Turc, Priestley-Taylor, Makkink i Hamon. Proračun je rađen na dnevnom i prosečnom mesečnom nivou, za period 2010–2013. godine, na stanicama: Niš, Beograd, Novi Sad, Loznica, Valjevo, Zlatibor, Čuprija i Kikinda. Poseban značaj dat je vegetacionom periodu tokom sušne godine, interesantnom sa aspekta primene navodnjavanja. Upoređivanje metoda rađeno je na osnovu statističke analize, pri čemu su korišćeni parametri: MXE, MAE, RMSD, ARMSD, WRMSD, b i R². Najbolje slaganje sa metodom FAO-PM na prosečnom mesečnom nivou, kao i u letnjem periodu 2012. godine, pokazale su metode Copais, Turc i Priestley-Taylor, pa se one mogu preporučiti kao zamena za metodu FAO56-PM, u našim klimatskim uslovima. Ukoliko se raspolože samo podacima o temperaturi vazduha, rezultati dobijeni u ovom istraživanju pokazuju opravdanost upotrebe modifikovane metode Hargreaves za proračun ET_o u toku vegetacionog perioda.

Ključne reči: referentna evapotranspiracija, FAO56-PM, Turc, Priestley-Taylor, Hargreaves, modifikovani Hargreaves, Copais, Hamon, humidna i subhumidna klima.

* Autor za kontakt: e-mail: idrizovic@agrif.bg.ac.rs

Uvod

Sa aspekta navodnjavanja, proračun evapotranspiracije je glavni element pri projektovanju hidromodula sistema. Prilikom određivanja potreba biljaka za vodom, potrebno je prvo odrediti referentnu evapotranspiraciju. Organizacija za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija (engl. *Food and Agriculture Organization*, FAO) dala je definiciju referentne evapotranspiracije: „Referentna evapotranspiracija je evapotranspiracija sa hipotetičke referentne kulture pretpostavljene visine 0,12 cm, stalnog površinskog otpora od 70 s m⁻¹ i sa albedom od 0,23 koja je bliska evapotranspiraciji sa velike površine pokrivene zelenom travom u fenofazi aktivnog rasta i u uslovima bez nedostatka lakopristupačne vlage” (Allen et al., 1998).

Međunarodna komisija za navodnjavanje i odvodnjavanje (ICID) i Organizacija za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija (FAO) predlažu metodu Penman-Monteith (FAO56-PM) za proračun referentne evapotranspiracije.

Rezultati Lopez-Urrea et al. (2006), koji su upoređivali dnevne vrednosti evapotranspiracije dobijene direktnom metodom, merenjem lizimetrom, sa sedam indirektnih metoda za čiji su proračun korišćeni dnevni klimatski podaci, potvrđuju izbor metode FAO 56-PM kao referentne. U uslovima semiaridne klime, formula FAO 56-PM pokazala je nabolje slaganje sa dnevnim vrednostima ETo merenim pomoću lizimetra. Slede metode: Hargreaves, FAO-24 Radiation, FAO-24 Penman (II), FAO-24 Penman (I), Penman i FAO-24 Blaney-Criddle. Upoređivanje je rađeno u toku letnje (april–septembar) i zimske (oktobar–mart) sezone. U oba slučaja, metoda FAO-56 Penman-Monteith se pokazala kao najpreciznija.

Međutim, u slučaju nedostatka klimatskih podataka (insolacije, brzine vetra, relativne vlažnosti vazduha), primena metode FAO 56-PM za proračun evapotranspiracije je limitirana. Todorovic et al. (2013) su stoga upoređivali standardnu metodu FAO 56-PM sa metodom Hargreaves, poznatu pod nazivom temperaturna metoda FAO 56-PM, koja koristi samo podatke o temperaturi vazduha. Korišćeni su podaci sa 577 stanica iz oblasti mediteranske klime. U oblastima sa aridnom klimom, rezultati vrednosti kvadratnog korena srednje greške (engl. *root-mean-square error* – RMSE) za obe metode su u intervalu od 0,60 do 0,65 mm dan⁻¹. U vlažnim subhumidnim i humidnim oblastima metodom Hargreaves dobijene su značajno veće vrednosti u odnosu na metodu FAO 56-PM. Droogers i Allen (2002) su takođe analizirali podudarnost metode Hargreaves sa metodom FAO 56-PM. Koristili su tridesetogodišnje podatke sa 56.000 stanica. Zaključili su da je, u slučaju kada nedostaju klimatski podaci, opravdana zamena metode FAO 56-PM metodom Hargreaves, ali da se znatno bolji rezultati postižu primenom metode Hargreaves koju je izmenio Allen (2003). Metoda uključuje korišćenje mesečne sume padavina i izmenjen eksponent, sa 0,5 na 0,76 (RMSD 0,72 mm dan⁻¹). Slična istraživanja je sprovodio i Trajkovic (2005) i pokazao da se primenom metode Hargreaves dobijaju za u proseku 21% veće vrednosti nego

metodom FAO 56-PM. Nakon regionalne kalibracije, ta razlika je smanjena na 13%. Dobijeni rezultati su ukazali na to da regionalnu kalibraciju treba odraditi upotrebom izmenjenog Hargreaves eksponenta. Na osnovu ispitivanja podataka sa meteoroloških stanica iz Srbije, Trajković preporučuje vrednost eksponenta 0,424. Dobijena razlika u ovom slučaju, u odnosu na standardnu metodu FAO 56-PM je 0,3% (Trajković, 2007a).

S obzirom na to da metoda FAO 56-PM zahteva veliki broj klimatskih podataka koji često nisu dostupni, interesantno je, u okviru naših klimatskih uslova, ispitati metode koje za svoj obračun zahtevaju mali broj klimatskih podataka. Koristeći klimatske podatke sa agrometeorološke stanice Radmilovac, smeštene na eksperimentalnom polju Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Alexandris et al. (2008) su testirali šest različitih metoda za proračun evapotranspiracije. Najbolje slaganje sa metodom FAO 56-PM pokazale su metode Priestly-Taylor (RMSE 0,195 mm·dan⁻¹) i Copais (RMSE 0,281 mm·dan⁻¹). Cilj ovog rada je da se na osnovu podataka sa više meteoroloških stanica širom Srbije testiraju različite metode indirektnog proračuna evapotranspiracije, poređenjem sa metodom FAO 56-PM. Poseban značaj se daje vegetacionom periodu tokom sušne godine, koji je interesantan sa pozicije primene navodnjavanja.

Materijal i metode

Proračun dnevne referentne evapotranspiracije, za četvorogodišnji period na teritoriji Srbije, vršen je sledećim metodama: Hargreaves, modifikovani Hargreaves, Copais, Turc, Priestley-Taylor, Makkink i Hamon. Dobijeni rezultati su upoređivani sa metodom Penman-Monteith (FAO56-PM), koja je predložena od strane Organizacije za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija (FAO) za proračun referentne evapotranspiracije (FAO56-PM).

Jednačina FAO56-PM glasi:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_m + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

gde je: ET_o – referentna potencijalna evapotranspiracija (mm·dan⁻¹); Δ – nagib krive vodene pare (kPa·°C⁻¹); R_n – neto radijacija (MJ·m⁻²·dan⁻¹); G – energija utrošena za zagrevanje zemljišta (MJ·m⁻²·dan⁻¹); γ – psihrometerska konstanta (kPa·°C⁻¹); T_m – srednja temperatura vazduha (°C); u_2 – brzina vetra merena na 2 m visine (m/s); $(e_s - e_a)$ – deficit napona vodene pare (kPa); e_s – srednji saturacioni napon vodene pare (kPa); e_a – stvarni napon vodene pare (kPa).

Urađena je korekcija parametara R_s i R_{so} po formulama koje preporučuju Allen et al. (1998) i Perera et al. (2015). Solarna radijacija vedrog neba je računata formulom:

$$R_{so} = K_T \cdot R_a \quad (2)$$

gde je K_T – koeficijent vedrine neba ili transmisioni indeks.

Korekcija vrednosti solarne radijacije urađena je po formuli:

$$R_s = a \cdot R_a \quad (3)$$

gde je a – korekcionni koeficijent (1,02).

Metoda Turc zasnovana je na korelaciji između potencijalne evapotranspiracije i srednje temperature vazduha i dnevnog trajanja osunčanosti (ili solarne radijacije) ustanovljenoj merenjem na lizimetru u Versaju, Francuska (Turc, 1961). Standardnu kulturu ove metode predstavlja travni pokrivač (košena livada) visine 12–20 cm, površine veće od 6 ha u optimalnim uslovima vlaženja.

$$ET_p = 0,40 \cdot (I_g + 50) \cdot \frac{T}{T + 15} \quad (4)$$

gde je: ET_p – potencijalna evapotranspiracija ($\text{mm} \cdot \text{mesec}^{-1}$); I_g – globalna radijacija ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dan}^{-1}$); T – srednja dnevna temperatura ($^{\circ}\text{C}$) koja se računa kao prosek maksimalne i minimalne temperature vazduha.

Metoda Priestley-Taylor je pojednostavljena verzija kombinovane metode Penman, koja ne koristi aerodinamičku komponentu kombinovane metode, dok se energetska komponenta množi koeficijentom α_t . Metoda Priestley-Taylor važi za evapotranspiraciju sa velike vlažne površine:

$$ET_p = \alpha_t \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (R_n - G) \quad (5)$$

gde je: ET_p – potencijalna evapotranspiracija ($\text{mm} \cdot \text{dan}^{-1}$); α_t – koeficijent; Δ – pad napona zasićene vodene pare ($\text{mb} \cdot ^{\circ}\text{K}^{-1}$); γ – psihrometrijska konstanta ($\text{mb} \cdot ^{\circ}\text{K}^{-1}$); R_n – neto radijacija ($\text{mm} \cdot \text{dan}^{-1}$); G – toplotni fluks zemljišta ($\text{mm} \cdot \text{dan}^{-1}$).

Metoda Hargreaves koristi podatke o temperaturi vazduha kao ulazne podatke. Namenjena je za mesečni ili dekadni period izračunavanja evapotranspiracije,

$$ET_o = 0,0023 \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot (T + 17,8) \quad (6)$$

gde je: ET_o – referentna evapotranspiracija ($\text{mm} \cdot \text{dan}^{-1}$); R_a – ekstraterestrijalna radijacija ($\text{mm} \cdot \text{dan}^{-1}$); T_{max} – maksimalna temperatura vazduha ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} – minimalna temperatura vazduha ($^{\circ}\text{C}$); T – srednja dnevna temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Metoda modifikovani Hargreaves je preporučena za uslove humidne klime, jer se primenom originalne metode Hargreaves dobijaju veće vrednosti evapotranspiracije nego metodom FAO56-PM. Modifikacija se sastoji u promeni eksponenta na vrednost od 0,424 (Trajković, 2007b). Izraz za metodu modifikovani Hargreaves je sledeći:

$$ET_o = 0,0023 \cdot 0,408 \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,424} \cdot \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} + 17,8 \right) \quad (7)$$

gde je: R_a – ekstraterestrijalna radijacija ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dan}^{-1}$).

Metoda Copais je razvijena za proračun ET_o u uslovima mediteranske klime (Copais, Grčka). Prvobitno je namenjena za proračun ET_o za vremenski interval od jednog časa i koristi podatke o temperaturi vazduha, solarnoj radijaciji i relativnoj vlažnosti vazduha (Alexandris i Kerkides, 2003). Za proračun na dnevnom nivou, izraz za metodu Copais glasi:

$$ET_o = m_1 + m_2 C_2 + m_3 C_3 + m_4 C_1 C_2 \quad (8)$$

gde koeficijenti imaju sledeće vrednosti: $m_1 = 0,057$, $m_2 = 0,277$, $m_3 = 0,643$, $m_4 = 0,0124$;

$$C1 = 0,64146 - 0,00784 \cdot RH + 0,372 \cdot Rs - 0,00264 \cdot Rs \cdot RH \quad (9)$$

$$C2 = -0,0033 + 0,00812 \cdot T + 0,101 \cdot Rs + 0,00584 \cdot Rs \cdot T \quad (10)$$

Hamon (1961) je predstavio metodu za proračun potencijalne evapotranspiracije:

$$ETp = k \cdot 0,165 \cdot 216,7 \cdot N \cdot \left(\frac{e_s}{T+273,3}\right) \quad (11)$$

gde je: ETp – potencijalna evapotranspiracija (mm·dan⁻¹); k-koeficijent = 1; N – maksimalno trajanje sunčevog sjaja u toku dana (časovi); e_s – saturacioni napon vodene pare (mb); T – srednja mesečna temperatura (°C).

Izraz za metodu Makkink glasi:

$$ETo = 0,61 \cdot \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \cdot \frac{R_s}{\lambda} - 0,12 \quad (12)$$

gde je: ETo – referentna evapotranspiracija (mm·dan⁻¹); λ – 2,45 MJ·kg⁻¹; R_s – neto solarna kratkotalasna radijacija (MJ·m⁻²·dan⁻¹).

Analizirano područje

Za proračun su korišćeni klimatski podaci za period od 2010. do 2013. godine, sa meteoroloških stanica: Niš, Beograd, Novi Sad, Loznica, Vranje, Zlatibor, Čuprija i Kikinda. Meteorološke stanice su raspoređene na različitim nadmorskim visinama i obuhvataju različite geografske širine (tabela 1), pa se na osnovu podataka sa ovih stanica dobija uvid u klimatske prilike u Srbiji.

Tabela 1. Opis meteoroloških stanica.

Table 1. Description of meteorological stations.

Stanice Stations	Geografska širina Latitude (°N)	Nadmorsk a visina Altitude (m)	Maksimalna temperatura vazduha Maximum air temperature (°C)	Minimalna temperatura vazduha Minimum air temperature (°C)	Relativna vlažnost vazduha Relative humidity (%)	Brzina vetra Wind speed (m/s)
Niš	43,33	204	18,86	7,48	68,28	1,14
Beograd	44,8	132	18,22	9,39	66,21	2,53
Novi Sad	45,32	86	17,46	7,12	75,71	2,55
Zlatibor	43,73	1029	13,75	4,76	74,78	1,72
Vranje	42,55	433	18,15	6,09	69,69	1,88
Loznica	44,53	121	18,30	7,65	73,23	1,04
Čuprija	43,93	123	19,16	6,32	74,22	1,30
Kikinda	45,85	81	17,11	6,91	73,11	3,03

Statistički parametri

Za upoređivanje i rangiranje metoda korišćeni su sledeći parametri: maksimalno apsolutno odstupanje (engl. *maximum absolute difference* – MXE), srednje apsolutno odstupanje (engl. *mean absolute difference* – MAE), kvadratni koren odstupanja (engl. *root-mean-square difference* – RMSD), prilagođeni kvadratni koren odstupanja (engl. *adjusted-root-mean-square difference* – ARMSD), otežani kvadratni koren odstupanja (engl. *weighed root-mean-square difference* – WRMSD), regresioni koeficijenti b i a i koeficijent determinacije R^2 . Parametri su izračunati na osnovu sledećih formula:

$$MXE = \max (|Etpm, i - Eteq, i|)_{i=1}^M \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (|ETpm, i - ETeq, i|)}{n} \quad (14)$$

$$RMSD = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (|ETpm, i - ETeq, i|)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (15)$$

$$ARMSD = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (|ETpm, i - b \cdot ETeq, i|)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (16)$$

$$WRMSD = 0,7 \cdot (0,67 \cdot RMSD + 0,33 \cdot ARMSD) + 0,3 \cdot (0,67 \cdot pRMSD + 0,33 \cdot pARMSD) Eq. \quad (17)$$

gde je: ETpm – vrednost evapotranspiracije dobijena fomulom FAO56-PM; ETeq – vrednost evapotranspiracije dobijena odgovarajućom metodom koja se upoređuje sa FAO56-PM; n – broj posmatranja.

Relacija između FAO56-PM i upoređivane metode data je preko linearne regresije,

$$Y = bx + a \quad (18)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (19)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (20)$$

gde su: b i a regresioni koeficijenti, x_i – mesečna vrednost evapotranspiracije dobijena formulom FAO56-PM; y_i – vrednost evapotranspiracije dobijena odgovarajućim metodama koja se upoređuje sa FAO56-PM; \bar{x} i \bar{y} – aritmetičke sredine.

Rezultati i diskusija

Statistička analiza poređenja dnevnih vrednosti ETo dobijenih ispitivanim metodama, sa metodom FAO56-PM, na svim izabranim meteorološkim stanicama za period 2010–2013, prikazana je u tabeli 2.

Tabela 2. Statistička analiza dnevnih vrednosti ETo (2010–2013) dobijenih ispitivanim metodama, u poređenju sa metodom FAO56-PM (RMSD – kvadratni koren odstupanja, ARMSD – prilagođeni kvadratni koren odstupanja, WRMSD – otežani kvadratni koren odstupanja, MAE – srednje apsolutno odstupanje, MXE – maksimalno apsolutno odstupanje, b – regresioni koeficijent, R² – koeficijent determinacije).

Table 2. Statistical analysis of daily values – of ETo (2010–2013) obtained by tested methods, compared to the FAO56-PM method (RMSD – root-mean-square difference, ARMSD – adjusted-root-mean-square difference, WRMSD – weighed root-mean-square difference, MAE – mean absolute difference, MXE – maximum absolute difference, b – coefficient of regression, R² – coefficient of determination).

Metode Methods	Stanice Stations	RMSD	ARMSD	WRMSD	MAE	MXE	b	R ²	Odstupanje Deviation%
Hargreaves	Niš	1,10	1,90	1,40	1,21	2,71	1,23	0,92	22,86
	Beograd	0,61	0,66	0,84	0,38	4,16	0,92	0,91	-8,25
	Novi Sad	0,66	0,70	0,75	0,44	4,10	1,02	0,93	1,75
	Loznica	0,88	1,16	0,96	0,77	3,33	1,09	0,92	9,46
	Vranje	0,79	1,04	0,89	0,63	2,85	1,08	0,94	7,81
	Zlatibor	0,49	0,46	0,58	0,25	2,30	0,97	0,93	-2,59
	Čuprija	0,93	1,24	1,12	0,87	3,33	1,10	0,90	9,53
	Kikinda	0,56	0,54	0,78	0,31	2,62	0,95	0,93	-5,37
Mod.Hargreaves	Niš	0,56	0,54	0,66	0,31	2,38	0,99	0,92	-1,00
	Beograd	0,82	1,37	1,30	0,66	5,04	0,75	0,91	-24,77
	Novi Sad	0,56	0,86	0,87	0,31	4,71	0,82	0,93	-17,53
	Loznica	0,51	0,56	0,68	0,26	2,23	0,89	0,93	-11,42
	Vranje	0,49	0,68	0,76	0,24	2,26	0,86	0,94	-13,72
	Zlatibor	0,50	0,83	0,80	0,25	2,16	0,80	0,93	-20,01
	Čuprija	0,61	0,75	0,91	0,38	3,18	0,87	0,90	-12,73
	Kikinda	0,71	1,22	1,18	0,51	2,95	0,77	0,93	-23,04
Copais	Niš	0,62	0,58	0,61	0,39	2,13	0,94	0,88	-6,30
	Beograd	0,69	0,89	0,85	0,47	3,12	0,85	0,88	-14,72
	Novi Sad	0,61	0,86	0,79	0,37	3,33	0,84	0,91	-16,41
	Loznica	0,61	0,65	0,64	0,38	2,30	0,89	0,88	-11,08
	Vranje	0,59	0,62	0,62	0,35	1,90	0,91	0,90	-9,32
	Zlatibor	0,57	0,54	0,58	0,33	1,98	0,95	0,89	-5,20
	Čuprija	0,72	1,22	1,05	0,52	6,70	0,76	0,91	-23,76
	Kikinda	0,65	1,01	0,90	0,42	2,17	0,82	0,92	-18,39
Turc	Niš	0,56	0,90	0,68	0,32	2,30	1,13	0,94	13,31
	Beograd	0,54	0,55	0,55	0,29	2,40	1,02	0,93	2,38
	Novi Sad	0,50	0,50	0,58	0,25	2,81	1,00	0,94	0,23
	Loznica	0,53	0,65	0,55	0,28	2,05	1,06	0,94	6,01
	Vranje	0,43	0,51	0,44	0,19	2,15	1,05	0,96	5,42
	Zlatibor	0,42	0,59	0,52	0,18	1,77	1,10	0,93	10,37
	Čuprija	0,55	0,62	0,71	0,30	6,07	0,94	0,93	-6,04
	Kikinda	0,48	0,51	0,59	0,23	2,10	0,97	0,95	-2,77

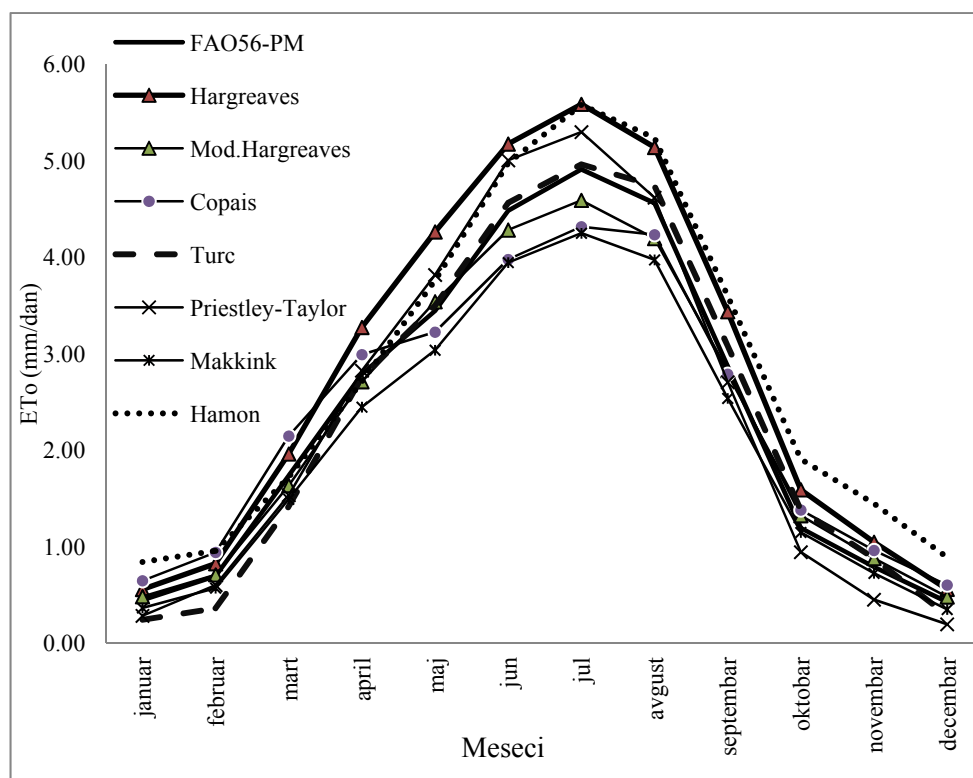
Tabela 2. Nastavak.

Tabele 2. Continuation.

Metode <i>Methods</i>	Stanice <i>Stations</i>	RMSD	ARMSD	WRMSD	MAE	MXE	b	R ²	Odstupanje <i>Deviation%</i>
PT	Niš	0,44	0,66	0,54	0,19	1,93	1,10	0,96	10,34
	Beograd	0,72	0,75	0,86	0,52	4,15	0,96	0,90	-3,94
	Novi Sad	0,57	0,68	0,64	0,32	3,83	1,07	0,93	6,63
	Loznica	0,50	0,84	0,68	0,25	2,46	1,13	0,96	12,89
	Vranje	0,42	0,46	0,47	0,17	2,49	1,04	0,96	3,64
	Zlatibor	0,50	0,70	0,58	0,25	1,94	1,10	0,94	9,82
	Čuprija	0,64	0,64	0,77	0,40	3,31	1,00	0,91	-0,25
	Kikinda	0,56	0,56	0,64	0,31	2,80	1,00	0,93	0,36
Makkink	Niš	0,41	0,54	0,52	0,17	2,44	0,91	0,95	-9,05
	Beograd	0,74	0,68	0,82	0,55	2,53	0,96	0,90	-4,09
	Novi Sad	0,57	0,85	0,79	0,32	4,02	0,86	0,94	-14,40
	Loznica	0,44	0,57	0,52	0,20	2,83	0,90	0,94	-9,60
	Vranje	0,51	0,82	0,71	0,26	2,54	0,86	0,96	-14,31
	Zlatibor	0,54	0,60	0,65	0,29	1,85	0,86	0,91	-14,35
	Čuprija	0,77	1,23	1,14	0,59	6,90	0,79	0,92	-21,35
	Kikinda	0,72	1,18	1,07	0,52	2,93	0,80	0,95	-19,72
Hamon	Niš	1,05	1,43	1,26	1,11	3,42	1,12	0,92	11,69
	Beograd	0,79	1,25	1,16	0,63	4,61	0,80	0,92	-20,28
	Novi Sad	0,76	0,67	0,83	0,58	2,52	0,93	0,90	-6,83
	Loznica	0,97	0,96	1,01	0,95	3,55	0,99	0,88	-0,59
	Vranje	0,68	0,61	0,75	0,46	2,97	0,91	0,91	-9,41
	Zlatibor	0,36	0,47	0,42	0,13	1,70	0,92	0,96	-8,25
	Čuprija	0,74	0,66	0,84	0,54	2,83	0,95	0,90	-4,51
	Kikinda	0,68	0,67	0,84	0,46	2,75	0,90	0,90	-10,2

Metoda Hargreaves je pokazala veliko odstupanje od metode FAO56-PM po parametrima RMSD i b (tabela 2). Parametar RMSD se kreće od 1,10 mm·dan⁻¹ (Niš), do 0,49 mm·dan⁻¹ (Zlatibor). Odstupanje vrednosti ETo od vrednosti FAO56-PM su od 1,75% (b = 1,02) (Novi Sad) do 23% (b = 1,23) (Niš). Allen et al. (1998) su predložili metodu Hargreaves kao alternativnu metodu proračuna evapotranspiracije u slučaju nedostatka klimatskih podataka za proračun po metodi FAO56-PM. Na nedostatke ove formule, kao i dobijanje značajno većih vrednosti ETo u odnosu na FAO56-PM, ukazali su i Allen i Pruitt (1988), Todorovic et al. (2013), Trajkovic (2005), Trajkovic i Kolakovic (2009), Alexandris et al. (2008). Allen (1997) je izneo zaključak da nije moguće samo sa jednim koeficijentom tačno odrediti Rs na osnovu Tmax i Tmin, već da taj koeficijent varira u zavisnosti od područja. Ta činjenica ukazuje da se korišćenjem ove metode mogu dobiti velika odstupanja od realnih vrednosti evapotranspiracija. Istraživanja sprovedena za potrebe ovog rada pokazuju da su na prosečnom mesečnom nivou odstupanja od

FAO56-PM takođe velika i iznose 17,8% (slika 1). U uslovima humidne i subhumidne klime (kojima pripadaju rejni posmatranih meteoroloških stanica), ne preporučuje se upotreba ove metode (Todorovic et al., 2013).



Slika 1. Prosečne mesečne vrednosti ETo (2010–2013) sa osam meteoroloških punktova u Srbiji, dobijene primenom različitih metoda.

Figure 1. Average monthly values – of ETo (2010–2013) from eight meteorological stations in Serbia, obtained by applying different methods.

Na osnovu rezultata analize dnevnih vrednosti ETo za period 2010–2013, najbolje slaganje metodom modifikovani Hargreaves dobijeno je za meteorološku stanicu Niš (odstupanje je 1%, $b = 0,99$). U slučaju drugih lokaliteta, vrednosti ETo dobijene metodom modifikovani Hargreaves su za 12–25% niže od vrednosti dobijenih metodom FAO56-PM. Vrednosti parametra RMSD su se kretale u intervalu od $0,49 \text{ mm}\cdot\text{dan}^{-1}$ (Vranje) do $0,82 \text{ mm}\cdot\text{dan}^{-1}$ (Beograd). Metoda modifikovani Hargreaves razvijena je nakon regionalne kalibracije i izmenom eksponenta na 0,424, za klimatske uslove

Srbije sa prosečnom brzinom vetra $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Trajkovic, 2007b), pa jedan od razloga odstupanja može biti prosečna brzina vetra na posmatranim područjima, koja se razlikuje od one uzete za kalibraciju. Na prosečnom mesečnom nivou, metoda je pokazala znatno bolje slaganje sa FAO56-PM (odstupanje 2,5%) (slika 1), jer je ova metoda namenjena za proračun na mesečnom, odnosno dekadnom nivou.

Metoda Copais je pokazala bolje rezultate slaganja sa FAO56-PM na prosečnom mesečnom nego na dnevnom nivou (tabela 2, slika 1). Vrednosti parametra RMSD za metodu Copais su $0,57\text{--}0,72 \text{ mm}\cdot\text{dan}^{-1}$ (tabela 2). Najmanje odstupanje od 5% dobijeno je za meteorološku stanicu Zlatibor ($b = 0,95$), RMSD $0,57 \text{ mm}\cdot\text{dan}^{-1}$. Na svim stanicama metoda je dala vrednosti ETo koje su za 5–24% manje od vrednosti dobijenih metodom FAO56-PM. Metoda Copais je razvijena u uslovima semiaridne klime, prvobitno za proračun ETo na časovnom nivou, a zatim modifikovana za proračun na dnevnom nivou. Alexandris et al. (2003, 2006) su dobili odstupanje za u proseku 3% (na časovnom nivou) i 7% (na dnevnom nivou) pri poređenju metode Copais sa FAO56-PM.

Metoda Turc je pokazala dobro slaganje sa metodom FAO56-PM na većini lokaliteta (tabela 2). Vrednosti parametra RMSD su od $0,42$ do $0,56 \text{ mm}\cdot\text{dan}^{-1}$, dok su odstupanja $0,23\text{--}13,3\%$. Najbolji rezultati na osnovu parametara b postignuti su na stanici Novi Sad, odstupanje je $0,23\%$ ($b = 1,0023$). Metoda Turc ne uzima u obzir brzinu vetra, pa su Trajkovic i Kolakovic (2007c) predložili modifikovanu metodu koja koristi brzinu vetra. Rezultati su pokazali da izmenjena metoda daje bolje slaganje sa metodom FAO56-PM. Kashyap i Panda (2001) dobili su odstupanje vrednosti metode Turc od lizimetarskih vrednosti od $2,72\%$. Oni su zaključili da u uslovima subhumidne klime većina metoda, uključujući Turc i Priestley-Taylor, daju veće vrednosti ETo od lizimetarskih, kada je evapotranspiracija mala, dok u slučaju većih vrednosti, metode pokazuju vrednosti koje su niže od lizimetarskih. Primena ove metode preporučuje se u manje vetrovitim područjima umerene klime (Jensen et al., 1990; Trajkovic i Kolakovic, 2009). U uslovima aridne klime, metoda Turc daje vrednosti ETo koje su u proseku 26% veće od vrednosti dobijenih metodom FAO56-PM, pa njena upotreba nije preporučena (Jensen et al., 1990). U našim klimatskim uslovima, na osnovu rezultata drugih istraživača, metoda je pokazala dobro slaganje sa FAO56-PM. Odstupanje od metode FAO56-PM je iznosilo od -5% , na dnevnom nivou (Alexandris et al., 2008), do -10% , na mesečnom nivou (Trajkovic i Kolakovic, 2009).

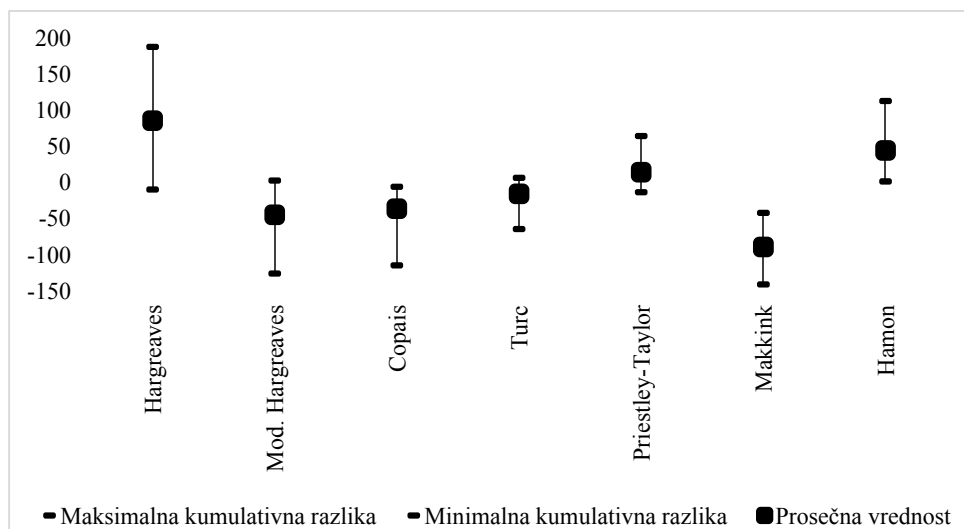
Metoda Priestley-Taylor, u poređenju sa metodom FAO56-PM, dala je minimalna odstupanja na stanicama Čuprija ($-0,25\%$) i Kikinda ($0,36\%$) (tabela 2), dok je najveće odstupanje dobijeno za stanicu Niš (10%). Vrednosti parametra RMSD kreću su u intervalu od $0,42$ do $0,72 \text{ mm}\cdot\text{dan}^{-1}$. Na osnovu

prosečnih mesečnih vrednosti za osam posmatranih stanica, metoda je dala vrednosti ETo koje su za 0,25% manje od vrednosti dobijenih metodom FAO56-PM (slika 1), što je i najmanje dobijeno odstupanje u odnosu na ostale metode. Ovi rezultati su u skladu sa istraživanjima Alexandris et al. (2008) i Trajkovic i Kolakovic (2009), koji su pokazali da metoda Priestley-Taylor daje zadovoljavajuće rezultate u klimatskim uslovima naše zemlje. Proračun je vršen na mesečnom i dnevnom nivou, a dobijena su odstupanja od -5% do +5%. Metoda postiže dobre rezultate u područjima sa humidnom klimom. Namenjena je za proračun ETo na mesečnom ili dekadnom nivou. Van Kraalingen i Stol (1997) su zaključili da primena metode tokom zimskih meseci nije moguća zbog neto radijacije. Vrednosti neto radijacije u toku zimskih meseci mogu biti negativne, što rezultuje dobijanjem negativne vrednosti ETo pri proračunu, iako je stvarna evapotranspiracija pozitivna. Za unapređenje formule, pri primeni u humidnim krajevima sa većom nadmorskom visinom, Xu i Singh (2002) su predložili korišćenje koeficijenta $\alpha = 0,90$ umesto $\alpha = 1,26$.

Metoda Makkink pokazuje loše slaganje sa metodom FAO56-PM. Vrednosti parametra RMSD iznose od 0,41 do 0,77 mm·dan⁻¹. Na svim stanicama metoda je dala vrednosti ETo manje u odnosu na FAO56-PM, od 4 do 21%. Najmanje odstupanje od 4% dobijeno je za stanicu Beograd ($b = 0,96$). Metoda Makkink daje dobre rezultate slaganja u Zapadnoj Evropi, području za koje je razvijena. Za područje naše zemlje i drugi istraživači (Alexandris et al., 2008) su registrovali velika odstupanja (-20%). Manje vrednosti odstupanja su dobijene na prosečnom mesečnom nivou (slika 1) nego na dnevnom nivou.

Rezultati statističkih parametara RMSD i b dobijeni metodom Hamon imaju najveći interval variranja za posmatrane stanice (tabela 2). Vrednosti RMSD su od 0,36 mm·dan⁻¹, za stanicu Zlatibor, do 1,05 mm·dan⁻¹, za stanicu Niš. Najmanje odstupanje vrednosti ETo dobijeno je za stanicu Loznica, 0,6% ($b = 0,994$), dok je odstupanje za stanicu Beograd bilo 20% ($b = 0,8$). Zbog jednostavnosti korišćenja i malog broja zahtevanih podataka, Lu et al. (2005) navode da se metoda Hamon može koristiti za proračun ETo u slučaju kada ne postoje podaci potrebni za radijacione metode. Na osnovu rezultata svih statističkih parametara (tabela 2) i najvećeg odstupanja na prosečnom mesečnom nivou (18,6%), u poređenju sa svim ostalim metodama (slika 1), primenom metode Hamon ne dobijaju se zadovoljavajući rezultati na području Srbije.

Upoređivanje različitih metoda za izračunavanje ETo sa metodom FAO56-PM rađeno je i na osnovu kumulativne dnevne razlike za letnje mesece 2012. godine (slika 2). Izabrana je 2012. godina, jer su tada zabeležene najveće godišnje sume ETo u posmatranom periodu na svim lokalitetima, a period od 20. aprila do 30. avgusta značajan je sa aspekta navodnjavanja. Biljke su tada u vegetacionoj fazi, pa je najčešće putem navodnjavanja neophodno obezbediti potrebnu količinu vode.



Slika 2. Kumulativne dnevne razlike za letnje mesece (20. april – 30. avgust) 2012. godine.

Figure 2. Cumulative daily differences for summer months (20th of April – 30th of August, 2012).

Najveće odstupanje ETo od metode FAO56-PM u letnjim mesecima pokazale su metode Makkink (Beograd -129 mm, Kikinda -141 mm, Čuprija -139 mm, Novi Sad -92 mm) i Hargreaves (Niš +187 mm, Loznica +134 mm, Vranje +105 mm, Zlatibor +59 mm). Rezultati kumulativne razlike za period 20. april – 30. avgust dobijeni ovim metodama prate trendove odstupanja dnevnih vrednosti za period 2010–2013. Najmanja kumulativna razlika na stanicama Niš (+23 mm), Vranje (-6 mm), Zlatibor (+7,5 mm) dobijena je metodom Copais. Metode Priestley-Taylor i Turc imaju mali opseg variranja kumulativne razlike. Prosečna kumulativna razlika dobijena metodom Turc je 6 mm, a metodom Priestley-Taylor je 14 mm.

Zaključak

Statističkom analizom rezultata indirektnog proračuna evapotranspiracije (2010–2013), dobijenih uz pomoć nekoliko različitih metoda (Hargreaves, modifikovana Hargreaves, Copais, Turc, Priestley-Taylor, Makkink i Hamon), na osam meteoroloških punktova širom Srbije, došlo se do sledećih zaključaka:

- Sve metode su pokazale dobro slaganje sa metodom FAO56-PM na osnovu koeficijenta determinacije R^2 (0,88–0,96).

- Najmanje odstupanje od metode FAO56-PM, na prosečnom mesečnom nivou, pokazala je metoda Priestley-Taylor (-0,24%), zatim slede metode Copais (-0,47 %) i Turc (-0,64%). Od temperaturnih metoda, najbolje slaganje sa FAO56-PM dobijeno je modifikovanom metodom Hargreaves (-2,5%).

- Za potrebe sagledavanja potrošnje i potrebe biljaka za vodom u letnjim mesecima, metode Copais, Turc i Priestley-Taylor mogu se koristiti kao zamena za FAO56-PM u našim klimatskim uslovima. Za proračun ETo ovim metodama potrebni su podaci o dnevnoj insolaciji i relativnoj vlažnosti vazduha, koji nisu uvek dostupni. Kada su poznati samo podaci o temperaturi vazduha, rezultati dobijeni u ovom istraživanju opravdavaju upotrebu modifikovane metode Hargreaves za proračun ETo u toku vegetacionog perioda. Prosečna kumulativna razlika dobijena ovom metodom je -45 mm.

Zahvalnica

Ovaj rad je realizovan uz finansijsku pomoć Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekata iz programa tehnološkog razvoja „Savremeni biotehnološki pristup rešavanja problema suše u poljoprivredi Srbije”, TR 31005 i „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije”, TR 37005.

Literatura

- Alexandris, S., & Kerkides, P. (2003). New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 60 (3), 157-180.
- Alexandris, S., Kerkides, P., & Liakatas, A. (2006). Daily reference evapotranspiration estimates by the “Copais” approach. *Agricultural Water Management*, 82 (3), 371-386.
- Alexandris, S., Stricevic, R., & Petkovic, S. (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. (1997). Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2 (2), 56-67.
- Allen, R.G., & Pruitt, W.O. (1988). Closure to “Rational Use of the FAO Blaney-Criddle Formula”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114 (2), 375-380.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. U FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Roma: FAO.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., & Allen, R.G. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements. UASCE manuals and reports on engineering practice. ASCE. No. 70.
- Droogers, P., & Allen, R.G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16 (1), 33-45.
- Kashyap, P.S., & Panda, R.K. (2001). Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50 (1), 9-25.
- López-Urrea, R., Martín, d.O.F., Fabeiro, C., & Moratalla, A. (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 85 (1-2), 15-26.

- Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., & Amatya, D.M. (2005). Comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 41 (3), 621-633.
- Perera, K.C., Western, A.W., Nawarathna, B., & George, B. (2015). Comparison of hourly and daily reference crop evapotranspiration equations across seasons and climate zones in Australia. *Agricultural Water Management*, 148, 84-96.
- Todorović, M., Karić, B., & Pereira, L.S. (2013). Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology*, 481, 166-176.
- Trajkovic, S. (2005). Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131 (4), 316-323.
- Trajković, S. (2007a). Jednostavna empirijska formula za proračun referentne evapotranspiracije. *Vodoprivreda*, 39 (229-230), 397-400.
- Trajkovic, S. (2007b). Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133 (1), 38-42.
- Trajkovic, S., & Stojnic, V. (2007). Effect of wind speed on accuracy of Turc method in a humid climate. *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, 5 (2), 107-113.
- Trajkovic, S., & Kolakovic, S. (2009). Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management*, 23 (14), 3057-3067.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy*, 12 (1), 13-49.
- van Kraalingen, D.W.G., & Stol, W. (1997). Evapotranspiration models for crop growth simulation. In W.C.T. De (Eds.), *Quantitative Approaches in Systems Analysis No II*. Wageningen: Wageningen University-Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, 29 pp.
- Xu, C., & Singh, V.P. (2002). Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16 (3), 197-219.

Primljeno: 13. novembra 2017.

Odobreno: 27. februara 2018.

ANALYSIS OF SEVEN INDIRECT METHODS FOR EVALUATION OF
REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION UNDER CLIMATE
CONDITIONS OF SERBIA

Dženita F. Idrizović*, **Gordana S. Matović,**
Enika N. Gregorić and Ružica J. Stričević

University of Belgrade, Faculty of Agriculture,
Nemanjina 6, 11080 Belgrade-Zemun, Serbia

A b s t r a c t

In order to calculate water deficit of agricultural crops, it is necessary to have an insight into the evapotranspiration process. As for evaluation of reference evapotranspiration, the Penman-Monteith (FAO56-PM) method, suggested by The International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) and Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), requires several climate parameters, which are often unavailable. Thus, in this paper, the methods for computing ETo, which use limited weather data, were tested and then compared to FAO56-PM. The selected methods were those most often used as the replacement for FAO56-PM: Hargreaves, adjusted Hargreaves, Copais, Turc, Priestley-Taylor, Makkink and Hamon. ETo was calculated at the daily and average monthly levels, for the 2010–2013 period, using data from the following meteorological stations: Niš, Belgrade, Novi Sad, Loznica, Valjevo, Zlatibor, Čuprija and Kikinda. Special importance was given to the vegetation period during the dry season due to the application of irrigation. The comparison of methods was based on statistical analysis, using parameters: MXE, MAE, RMSD, ARMSD, WRMSD, b and R². The highest rate of matching FAO-PM at the average monthly level, as well as during the 2012 growing season, was shown by Copais, Turc and Priestley-Taylor methods, thus these methods may be recommended as the replacement for FAO-PM under climate conditions of Serbia. In case only temperature data are available, the results of this research justify the use of the adjusted Hargreaves equation to calculate ETo for the vegetation period.

Key words: reference evapotranspiration, FAO-56 Penman-Monteith, Turc, Priestley-Taylor, Hargreaves, adjusted Hargreaves, Copais, Hamon, humid and subhumid climate.

Received: November 13, 2017
Accepted: February 27, 2018

*Corresponding author: e-mail: idrizovic@agrif.bg.ac.rs