

METODE**EVAPOTRANSPIRACIJA: PREGLED VPLIVNIH DEJAVNIKOV IN METOD IZRAČUNA**

AVTORICI

Polona Cesar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

dr. Mojca ŠrajUniverza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija
mojca.sraj@fgg.uni-lj.si

UDK: 911.2:556.13

COBISS: 1.02

IZVLEČEK

Evapotranspiracija: pregled vplivnih dejavnikov in metod izračuna

Evapotranspiracija je eden izmed pomembnejših členov hidrološkega kroga. Označuje dva ločena procesa in sicer izhlapevanje in transpiracijo, ki pa sta v naravi združena, saj potekata istočasno in ju je med seboj težko ločiti. Na evapotranspiracijo vplivajo tri glavne skupine vplivnih dejavnikov in sicer meteorološki dejavniki (sončno sevanje, temperatura zraka, vlaga v zraku in hitrost vetra), rastlinski dejavniki in okoljske razmere. Slednje so podrobneje predstavljene v prvem delu članka, v nadaljevanju pa je prikazan pregled najpogostejših metod (temperaturnih, radiacijskih in kombiniranih) izračuna referenčne evapotranspiracije ter njihov natančen opis.

KLJUČNE BESEDE

hidrologija, meteorologija, referenčna evapotranspiracija, potencialna evapotranspiracija, izhlapevanje, Penman-Monteith metoda

ABSTRACT

Evapotranspiration: an overview of impact factors and calculation methods

Evapotranspiration is one of the most important factors in the hydrological cycle. As a term it represents two separate processes, evaporation and transpiration. As both processes occur simultaneously it is not easy to distinguish them. Evapotranspiration is influenced by three main groups of factors, such as meteorological factors (solar radiation, air temperature, air humidity and wind speed), plant factors and environmental conditions. The latter are described in the first part of the paper. An overview of the most common methods (temperature, radiation and combined) of reference evapotranspiration calculation is presented in the second part of the paper.

KEY WORDS

hydrology, meteorology, reference evapotranspiration, potential evapotranspiration, evaporation, Penman-Monteith method

Uredništvo je prispevek prejelo 4. novembra 2011.

1 Uvod

Evapotranspiracija je proces, med katerim voda prehaja v obliki vodnih hlapov v atmosfero in vključuje izhlapevanje in transpiracijo. Izhlapevanje je prehod vode iz tekočega agregatnega stanja v plinasto in poteka s površja zemlje (vode ali kopnega) in rastlin, transpiracija pa je fiziološki proces, pri katerem rastlina s koreninskim sistemom črpa vodo iz zemljine in jo po uporabi v metaboličnem procesu skozi listne reže izpusti v atmosfero (Brilly in Šraj 2005). Ker izhlapevanje in transpiracijo med seboj težko razlikujemo, se skupen proces imenuje evapotranspiracija (Ward in Trimble 2004). Zaradi kompleksnosti procesa je brez meritev velikost evapotranspiracije težko oceniti. Ocena količine evapotranspiracije je najbolj pomembna na območjih z omejenimi vodnimi zalogami in na območjih z veliko namakanimi kmetijskimi zemljišči (Pintar 2003). Evapotranspiracija je pomemben člen hidrološkega kroga (Kolbezen 1998; Frantar 2007; Bat in Frantar 2008), hkrati pa je tudi zelo kompleksen pojem, saj je funkcija časa in kraja. Pri izračunih vodne bilance je pomemben del vodnih izgub.

2 Izrazoslovje

2.1 Potencialna evapotranspiracija

Pojem potencialna evapotranspiracija je prvič uporabil Penman (1963). Potencialno evapotranspiracijo je opredelil kot količino vode, ki v določenem času izhlapi iz nizkih zelenih rastlin (te popolnoma zasenčijo tla) z enakomerno višino ter primerno oskrbljenih z vodo (Penman 1963; Irmak in Haman 2003). Vendar pa je kasneje prišlo do zmede, saj je takih rastlin veliko. Da bi ovrgli vse dvome, katere rastline sodijo v omenjeno kategorijo, so v poznih sedemdesetih in zgodnjih osemdesetih letih prejšnjega stoletja sprejeli pojem referenčne evapotranspiracije (ET_0) (Irmak in Haman 2003).

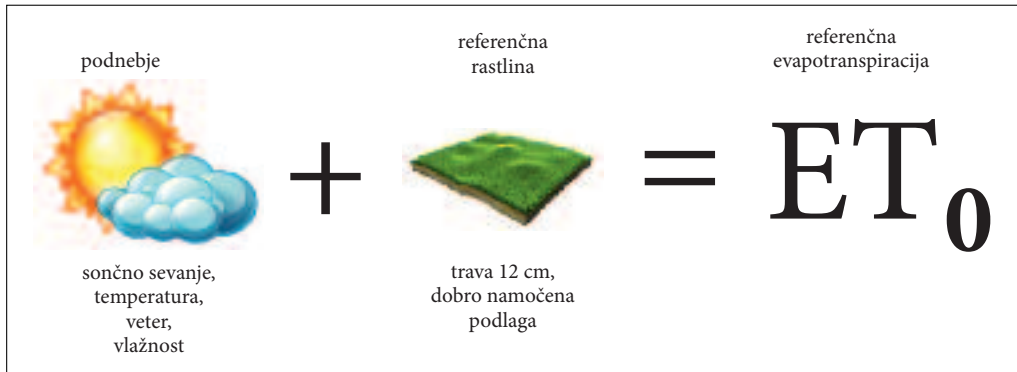
Mikoš in sodelavci (2002) so potencialno evapotranspiracijo opredelili kot največjo količino vode na določenem območju, ki glede na lastnosti atmosfere in količino razpoložljive energije lahko z izhlapevanjem in transpiracijo preide v atmosfero z neprekinjenega območja, ki je v celoti poraslo z rastlinstvom in dobro oskrbljeno z vodo.

2.2 Referenčna evapotranspiracija

Opredelitev potencialne evapotranspiracije bomo lažje razumeli, če jo primerjamo z referenčno evapotranspiracijo. Razlika med njima je predvsem v tem, da so pri referenčni evapotranspiraciji natančno definirani vremenski podatki (Irmak in Haman 2003). Prav zaradi nejasnih opredelitev FAO (Organizacija za prehrano in kmetijstvo Združenih narodov) odsvetuje uporabo izraza potencialna evapotranspiracija in predlaga uporabo izraza evapotranspiracija rastlin pri standardnih pogojih. Za izračun evapotranspiracije pa predlagajo pojem referenčne evapotranspiracije ali evapotranspiracije referenčne rastline.

Kadar navežemo evapotranspiracijo na določeno okolje, jo imenujejo referenčna evapotranspiracija (ET_0). Referenčna evapotranspiracija nam omogoča izračun in primerjavo evapotranspiracije v različnih letnih časih, kot tudi evapotranspiracijo različnih rastlin. Referenčna evapotranspiracija izraža izhlapevanje v atmosfero na določeni lokaciji in v določenem času. Ni odvisna od značilnosti rastline in podlage, odvisna pa je od podnebja, predvsem obsevanja, temperature, hitrosti vetra in vlažnosti (slika 1) (Allen s sodelavci 1998).

Sprva so za referenčno površino določili prosto vodno površino, kasneje pa so jo zamenjali z deteljo alfalfa (lucerna ali rdeča detelja) in referenčno travo (Allen s sodelavci 1998). Rdeča detelja je po fizičnih lastnostih (indeks listne površine in hrapavost) bolj podobna ostalim poljedelskim rastlinam kot trava. Drugi pa so trdili, da je pokošena trava boljši primer referenčne rastline zaradi dveh speci-



Slika 1: Shematski prikaz referenčne evapotranspiracije.

fičnih razlogov. Prvi razlog je, da lahko zanjo bolje opredelimo temeljne značilnosti, drugi pa je, da je trava veliko bolj razširjena kot rdeča detelja. Danes referenčno evapotranspiracijo definiramo kot evapotranspiracijo z referenčne površine, porasle s travo višine 0,12 metra, s konstantno površinsko upornostjo 70 m/s in albedom 0,23 (Allen s sodelavci 1998). Kot standardno metodo izračuna referenčne evapotranspiracije je FAO leta 1990 predlagal Penman-Monteithovo metodo.

Pri oceni referenčne evapotranspiracije je treba opredeliti meteorološke podatke za točno določeno (referenčno) območje, ki je dobro preskrbljeno z vodo in poraslo s travo. Območje mora biti dovolj veliko, saj le tako lahko dobimo dovolj natančne in zadovoljive podatke, ki bodo v nadaljevanju vplivali na oceno referenčne evapotranspiracije. Vpliv meteoroloških podatkov na končne rezultate je lahko zelo velik. V vročih in suhih mesecih je na primer povprečna temperatura zraka nad suhimi tlemi lahko od 5 do 6 °C višja, kot nad dobro namočenimi tlemi. Razlika v temperaturi vpliva na relativno vlažnost in deficit parnega tlaka, nenazadnje pa tudi na končno vrednost referenčne evapotranspiracije (Irmak in Haman 2003).

Referenčno evapotranspiracijo običajno določamo na dva načina (Allen s sodelavci 1998). Prvi način je ocena referenčne evapotranspiracije s pomočjo empiričnih metod. Te se delijo v pet skupin glede na dostopnost podatkov (radiacijske, temperaturne, metode na podlagi energijske bilance, metode na podlagi vodne bilance in kombinirane metode) (Xu in Singh 2002). Drugi način ocene referenčne evapotranspiracije pa so meritve s pomočjo različnih instrumentov (npr. Wildov in Pichejev evaporimeter, evaporacijske posode, lizimetri). Najbolj razširjen inštrument so evaporacijske posode, kjer količino izhlapevanja merimo dnevno, podateke pa v nadaljevanju množimo s koeficientom evaporacijske posode (k_p) in kot rezultat dobimo referenčno evapotranspiracijo (enačba 1):

$$ET_0 = ET_p \cdot k_p \quad (1)$$

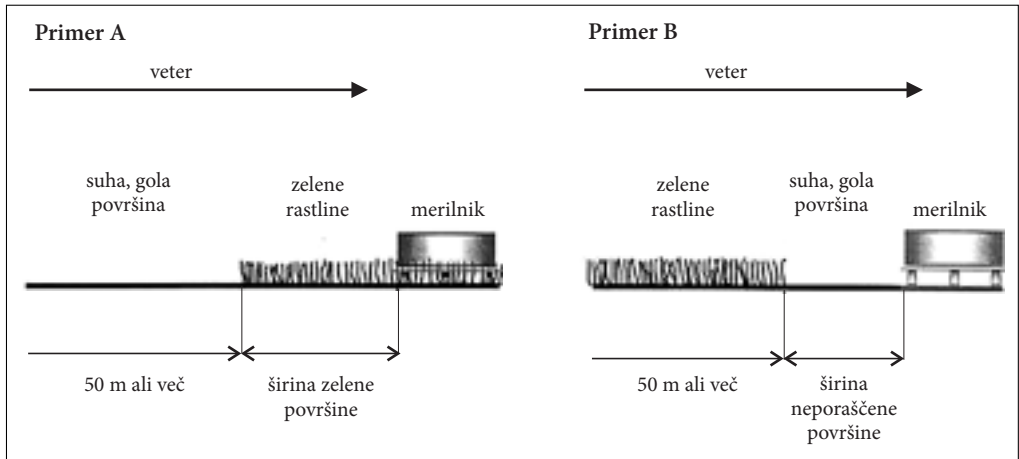
kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],

k_p koeficient evaporacijske posode,

ET_p evapotranspiracija s proste vodne površine [mm/dan].

Koeficient evaporacijske posode je odvisen od velikosti, oblike in barve posode, postavitve posode (nad tlemi, vkopana), rabe tal v okolici, vetra in vlažnosti. Na sliki 2 sta prikazana dva primera postavitve standardnega evaporimetra »A«. V primeru A so v okolici posode nizke zelene rastline, v primeru B pa je v okolici suho, golo zemljišče. Glede na ti dve možnosti postavitve evaporacijske posode, se delijo tudi vrednosti koeficienta evaporacijske posode (preglednici 1 in 2).



Slika 2: Dva primera (A in B) postavitve evaporacijske posode (prirejeno po: Allen s sodelavci 1998).

Preglednica 1: Vrednost koeficienta k_p za evaprometer »A«, če ga obkrožajo nizke zelene rastline (Maidment 1993).

srednja relativna vlažnost (%)		< 40	40–70	> 70
hitrost vetra (m/s)	širina zelenega zemljišča (m)			
rahel veter (< 2 m/s)	1	0,55	0,65	0,75
	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,7	0,8	0,85
	1000	0,75	0,85	0,85
srednji veter (2–5 m/s)	1	0,5	0,6	0,65
	10	0,6	0,7	0,75
	100	0,65	0,75	0,8
	1000	0,7	0,8	0,8
močan veter (5–8 m/s)	1	0,45	0,5	0,6
	10	0,55	0,6	0,65
	100	0,6	0,65	0,7
	1000	0,65	0,7	0,75
zelo močan veter (> 8 m/s)	1	0,4	0,45	0,5
	10	0,45	0,55	0,6
	100	0,5	0,6	0,65
	1000	0,55	0,6	0,65

2.3 Evapotranspiracija rastline v standardnih pogojih

Izraz evapotranspiracije rastline v standardnih pogojih (ET_c) je evapotranspiracija za točno določeno rastlino (Allen s sodelavci 1998). Ta rastlina mora biti zdrava, dobro gojena, z zadostno količino

vode glede na dane podnebne pogoje in uspevati na večjih površinah. Evapotranspiracija pa predstavlja količino vode, ki je bila izgubljena. FAO predlaga račun ET_C s pomočjo enačbe 2 (slika 3).

$$ET_C = ET_0 \cdot k_c \quad (2)$$

Pri čemer je:

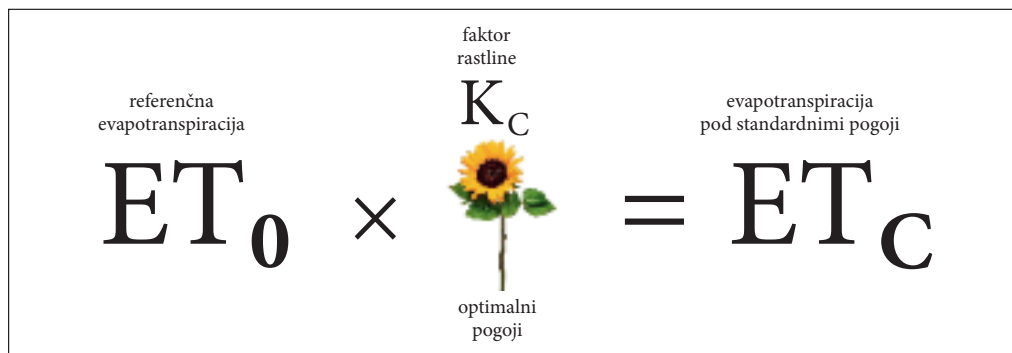
ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],

k_c koeficient rastline,

ET_C evapotranspiracija pod standardnimi pogoji [mm/dan].

Preglednica 2: Vrednost koeficienta k_p za evaporimeter »A«, v primeru, da ga obkroža suho, golo zemljišče (Maidment 1993).

srednja relativna vlažnost (%)		< 40	40–70	> 70
hitrost vetra	širina neporaščene zemljišča (m)			
rahel veter (< 2 m/s)	1	0,7	0,8	0,85
	10	0,6	0,7	0,8
	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,5	0,6	0,7
srednji veter (2–5 m/s)	1	0,65	0,75	0,8
	10	0,55	0,65	0,7
	100	0,5	0,6	0,65
	1000	0,45	0,55	0,6
močan veter (5–8 m/s)	1	0,6	0,65	0,7
	10	0,5	0,55	0,65
	100	0,45	0,5	0,6
	1000	0,4	0,45	0,55
zelo močan veter (> 8 m/s)	1	0,5	0,6	0,65
	10	0,45	0,5	0,55
	100	0,4	0,45	0,5
	1000	0,35	0,4	0,45



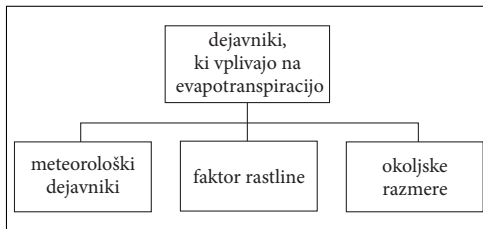
Slika 3: Shematski prikaz evapotranspiracije rastline v standardnih pogojih.

2.4 Dejanska evapotranspiracija

Dejanska (efektivna, realna) evapotranspiracija predstavlja celotno količino vode, ki je izhlapela s površine tal in rastlin pri dejanski količini vlage v tleh (Mikoš s sodelavci 2002). Dejansko evapotranspiracijo izmerimo z lizimetri.

3 Vplivni dejavniki

Na stopnjo evapotranspiracije vplivajo različni dejavniki (slika 4). Allen in sodelavci (1998) jih delijo v tri glavne skupine in sicer meteorološke dejavnike, faktor rastline in okoljske dejavnike.



Slika 4: Glavni dejavniki, ki vplivajo na evapotranspiracijo (Cesar 2011).

3.1 Meteorološki dejavniki

Meteorološki dejavniki proizvajajo energijo potrebno za izhlapevanje in odstranjujejo vodno paro s površine. Mednje štejemo sončno sevanje, temperaturo zraka, vlago v zraku in hitrost vetra.

Sončno sevanje je eden glavnih dejavnikov, ki omogočajo izhlapevanje vode. Količina energije, ki je potrebna za evapotranspiracijo, je odvisna od letnega časa in zemljepisne lege. Na dejansko količino energije, ki doseže površino s katere izhlapeva voda, vpliva tudi oblačnost. Pri rastlini se večina sončne energije, ki jo vsrkajo listi, porabi za transpiracijo, preostanek pa za fotosintezo.

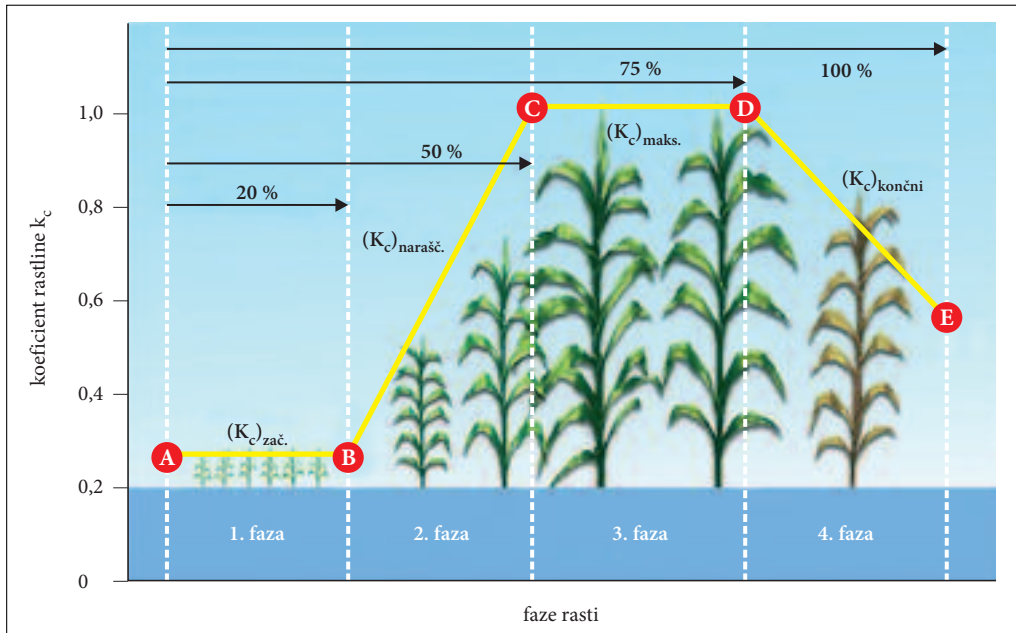
Poglavitna vpliva, ki določata temperaturo zraka, sta sončno sevanje in toplota. Za sončno sevanje je značilno, da ga absorbira atmosfera, medtem ko je za toploto značilno, da jo oddaja poleg Sonca tudi Zemlja. Pri višjih temperaturah je praviloma višja tudi stopnja izhlapevanja in obratno. Visoke temperature zraka, ki pospešijo stopnjo izhlapevanja in obdobja brez padavin, vodijo k zmanjšanju količine vode v tleh, kar predstavlja katastrofo za kmetijska zemljišča (Young s sodelavci 1994).

Pomemben vplivni dejavnik je tudi vlažnost zraka. Na dobro navlaženih poljih v vročih in suhih območjih je izhlapevanje, v nasprotju od vlažnih območij zelo veliko, saj je v vlažnejših območjih zrak že dovolj zasičen, kar znižuje evapotranspiracijo. V sušnih območjih je izhlapevanje odvisno neposredno od količine padavin.

Evapotranspiracija je odvisna tudi od vetra, ki nenehno prinaša velike količine zraka nad površino s katere se vrši izhlapevanje. Ko voda izhlapeva, postane zrak nad površino zasičen. S pomočjo vetra ta zasičen zrak nadomesti bolj suh zrak in evapotranspiracija se lahko nadaljuje, v nasprotnem primeru pa stopnja evapotranspiracije pade (Brilly in Šraj 2005).

3.2 Faktor rastline

Faktor rastline (k_c) se spreminja glede na vrsto rastline in njeno fazo rasti. Odvisen je od anatomije listov, višine rastline, aerodinamičnih lastnosti in albeda. Zaradi naštetih lastnosti je faktor rastline različen za vsako rastlino in se pri vsaki posamezni rastlini spreminja tudi tekom njenega razvoja.



Slika 5: Faktor rastline v odvisnosti od faze rasti (prirejeno po Irmak 2009).

3.3 Okoljski dejavniki

Pri evapotranspiraciji moramo upoštevati tudi okoljske pogoje. Mednje uvrščamo slanost, rodovitnost prsti, gnojenje, bolezni rastlin, slabo upravljane s tlemi, rabo tal, gostoto poraščenosti, vsebnost talne vode ipd. Matičič (1977) je razdelil vplivne dejavnike glede na evaporacijsko površino, ki je lahko prosta vodna površina ali površina tal. Ward in Trimble (2004) pa dodajata še vpliv dejavnikov na izhlapevanje s površine rastlin in sicer vrsto rastlin in rastlini dostopno vodo.

4 Metode izračuna referenčne evapotranspiracije

V zadnjih petdesetih letih so nastale številne metode za izračun referenčne evapotranspiracije, ki so bile povečini prilagojene za točno določena podnebja in lokacije. Vsaka metoda za izračun referenčne evapotranspiracije temelji na določenem časovnem intervalu v odvisnosti od vhodnih podatkov.

Referenčno evapotranspiracijo lahko izražamo na dva načina. Prvi način je merski in predstavlja količino izgubljene vode iz referenčnih tal v milimetrih na časovno enoto. Drugi način pa predstavlja količino energije, ki je potrebna za izhlapevanje vode z referenčne površine. Pri 0°C potrebujemo 2,45 MJ energije, da izhlapi 1 milimeter vode na kvadratni meter. Pretvorba iz ene v drugo količino je zapisana v naslednji enačbi (Allen s sodelavci 1998):

$$\lambda ET_0 = 2,45 \cdot \frac{\text{MJ}}{\text{mm}} \cdot ET_0 \quad (3)$$

kjer je:

λ latentna toplota izhlapevanja,

ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{\text{mm}}{\text{dan}} \right]$.

Evapotranspiracijo ocenjujemo, če nimamo pogojev za neposredno merjenje. Xu in Singh (2002) sta metode za oceno referenčne evapotranspiracije razdelila v pet skupin: radiacijske metode, temperaturne metode, kombinirane metode, metode na podlagi vodne bilance in metode na podlagi energijske bilance. V nadaljevanju so predstavljene prve tri skupine in metode, ki se največkrat uporabljajo v praksi.

4.1 Radiacijske metode

Večina radiacijskih metod je izpeljanih iz odvisnosti:

$$\lambda_{ET} = (C_r \omega) \cdot R_n \quad (4)$$

kjer je:

- R_n neto sevanje,
- λ latentna toplota izhlapevanja,
- C_r koeficient odvisen od relativne vlažnosti in hitrosti vetra,
- ω faktor odvisen od temperature.

Med najbolj znane radiacijske metode spadajo: Priestley-Taylorjeva, Makkinkova in Jensen-Haiseva. Xu in Singh (2002) sta na območju Švice izvedla primerjavo radiacijskih metod. Med naštetimi sta se najbolj obnesli Makkinkova in Priestley-Taylorjeva.

Priestley-Taylorjeva enačba se uporablja za izračun evapotranspiracije v primerih, ko so tla zasičena z vodo, zato ima dodan koeficient α . Če tla niso zasičena z vodo, se koeficienta ne upošteva (Xu in Singh 2002).

$$ET_0 = \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda} \quad (5)$$

kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{\text{mm}}{\text{dan}} \right]$,

α koeficient, katerega vrednost je 1,26,

R_n neto sevanje $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{dan}} \right]$,

λ latentna toplota izhlapevanja $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$,

γ psihrometrična konstanta $\left[\frac{\text{kPa}}{\text{C}} \right]$,

Δ naklon krivulje parnega tlaka $\left[\frac{\text{kPa}}{\text{C}} \right]$.

Makkinkova enačba je bila razvita na Nizozemskem in predstavlja modificirano Penmanovo enačbo. Enačba je zelo podobna Priestley-Taylorjevi enačbi, razlika je le v energiji sončnega sevanja. Makkinkova enačba je izražena kot (Bakhtiari s sodelavci 2011):

$$ET_0 = 0,61 \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{\lambda} - 0,12 \quad (6)$$

Kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{\text{mm}}{\text{dan}} \right]$,

R_s skupno sončno sevanje $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{dan}} \right]$,

λ latentna toplota izhlapevanja $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$,

γ psihrometrična konstanta $\left[\frac{\text{kPa}}{\text{C}} \right]$,

Δ naklon krivulje parnega tlaka $\left[\frac{\text{kPa}}{\text{C}} \right]$.

Za izračun referenčne evapotranspiracije se uporablja tudi spodnja enačba. Enačba je bila izpeljana s pomočjo kasnejših raziskav, ki so jih izvajali na Nizozemskem (Xu in Singh 2002). Vse enote in oznake v enačbi (7) so enake enotam in oznakam v enačbi (6).

$$ET_0 = 0,7 \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{\lambda} \quad (7)$$

Med radiacijske metode uvrščamo tudi **Jensen-Haisevo enačbo** (Ward in Trimble 2004). Jensen in Haise sta na podlagi več kot 3000 meritev dejanske evapotranspiracije prišla do sledeče enačbe:

$$ET_0 = \frac{C_T \cdot (T - T_x) \cdot R_s}{\lambda} \quad (8)$$

kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{\text{mm}}{\text{dan}} \right]$,

C_T temperaturni koeficient,

λ latentna toplota izhlapevanja $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$,

T srednja dnevna temperatura [$^{\circ}\text{C}$],

T_x sečišče temperaturne osi [$^{\circ}\text{C}$],

R_s sončno sevanje na horizontalni površini $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{dan}} \right]$.

Izračun temperaturnega koeficienta C_T :

$$C_T = \frac{1}{C_I + 7,3 \cdot C_H} \quad (9)$$

kjer se koeficienta C_I in C_H izračunata po enačbah:

$$C_I = 38 - \frac{2H}{305} \quad (10)$$

$$C_H = \frac{5}{e_2 - e_1} \quad (11)$$

in je:

H nadmorska višina [m],

e_1, e_2 zasičen parni tlak [kPa].

Sečišče temperaturne osi T_x se izračuna po enačbi:

$$T_x = -2,5 - 1,4 \cdot (e_2 - e_1) - \frac{H}{550} \quad (12)$$

Latentna toplota izhlapevanja pa po enačbi:

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \cdot 10^{-3} T \quad (13)$$

4.2 Temperaturne metode

Temperaturne metode sodijo med najstarejše metode za oceno referenčne evapotranspiracije (Xu in Singh 2002):

$$ET = c \cdot (T_a)^n \quad (14)$$

ali

$$ET = c_1 \cdot d_1 \cdot T_a \cdot (c_2 - c_3 h) \quad (15)$$

kjer je:

ET evapotranspiracija [mm/časovno enoto],

T_a temperatura zraka [°C],

h vlažnost,

c_1, c_2, c_3 konstante,

d_1 dolžina dneva.

Hargreavesova enačba je zelo priljubljena, saj za izračun potrebujemo samo dva podatka: srednjo dnevno temperaturo (preračunano iz maksimalne in minimalne dnevne temperature) in energijo sevanja. Podaja dnevne rezultate referenčne evapotranspiracije izražene v milimetrih:

$$ET_0 = 0,0023 \cdot (T_m + 17,8) \cdot (\sqrt{T_{\max} - T_{\min}}) \cdot R_a \quad (16)$$

$$T_m = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (17)$$

kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],

T_m srednja dnevna temperatura [°C],

T_{\max} dnevna maksimalna temperatura [°C],

T_{\min} dnevna minimalna temperatura [°C],

R_a ekstraterestično sevanje $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{dan}} \right]$.

Blanney-Criddevo enačbo uporabljajo po celem svetu, najpogosteje pa v zahodnih predelih Združenih držav Amerike (Xu in Singh 2002). Rezultate referenčne evapotranspiracije dobimo v milimetrih na izbrano periodo (dan, mesec).

$$ET_0 = k \cdot p \cdot (0,46 T_a + 8,13) \quad (18)$$

kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/periodo],

T^a srednja temperatura [°C] (dnevna ali mesečna),

p odstotek svetlih dnevnih ur za uporabljeno periodo (dnevno ali mesečno),

k koeficient, odvisen od vegetacije, lokacije, letnega časa in obdobja rasti (za obdobje rasti od aprila do septembra znaša 0,85, medtem ko za preostale mesece (oktober do marec) znaša 0,45).

Thorntwaitova enačba se uporablja za oceno mesečne vrednosti referenčne evapotranspiracije. Za izračun potrebujemo vrednost srednje mesečne temperature in število mesečnih ur sončnega sevanja. V hladnejših mesecih so rezultati izračuna lahko višji od dejanskih. Prav tako so lahko vrednosti izračuna v sušnejših območjih nižje, v vlažnejših pa višje od dejanskih, zato je priporočljivo rezultate primerjati še z izračuni drugih metod. Negativna lastnost te enačbe so neustrezne vrednosti evapotranspiracije pri negativnih povprečnih temperaturah (Papadopoulou s sodelavci 2003).

$$ET_0 = 16 \cdot \left(\frac{10T_i}{I} \right)^a \cdot \left(\frac{n}{12} \right) \cdot \left(\frac{N}{30} \right) \quad (19)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(0,09 \cdot (T_i)^{1,5} \right) \quad (20)$$

$$a = 0,016 \cdot I + 0,5 \quad (21)$$

kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/mesec],

T_i srednja mesečna temperatura [°C],

n povprečno število mesečnih ur sončnega sevanja.

4.3 Kombinirane metode

Kombinirane metode upoštevajo pri oceni referenčne evapotranspiracije tako temperaturo kot radiacijo. Med najbolj znane kombinirane metode prištevamo: Turcovo, Penmanovo in Penman-Monteithovo metodo.

Turcova metoda je ena izmed najstarejših in najpreprostejših metod za oceno dnevne referenčne evapotranspiracije. Najboljšo oceno evapotranspiracije dobimo pri tej metodi v vlažnem okolju. V omejenih pogojih je podala boljše rezultate le Penman-Monteith enačba (Trajković in Stojnić 2007).

$$ET_0 = 0,013 \cdot (23,88 \cdot R_s + 50) \cdot T \cdot \frac{1}{(T + 15)} \quad (22)$$

kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],

T povprečna dnevna temperatura zraka [°C],

R_s sončno obsevanje $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{dan}} \right]$.

Penmanova enačba se je v preteklosti v praksi uporabljala najpogosteje, saj so bili njeni rezultati najbolj primerljivi z dejansko evapotranspiracijo. Njena uporaba je enostavna, saj se podatki lahko pridobijo iz standardnih opazovanj na meteoroloških postajah. Za izračun so potrebni naslednji podatki:

sončno sevanje, temperatura, hitrost vetra in vlažnost. Podane so tri enačbe, po katerih se izračunajo osnovne komponente. Aerodinamična komponenta izhlapevanja se izračuna kot:

$$E_a = 0,35 \cdot (e_a - e_d) \cdot \left(0,5 + \frac{u_2}{100} \right) \quad (23)$$

kjer je:

- E_a aerodinamična komponenta izhlapevanja [mm/dan],
- e_a zasičeni parni pritisk (funkcija temperature) [mm · Hg],
- e_d srednji dnevni parni pritisk [mm · Hg],
- u_2 hitrost vetra dva metra nad zemeljskim površjem [m/s].

Druga enačba omogoča oceno energije, ki je potrebna za izhlapevanje in segrevanje zemeljskega površja:

$$R_n = A - B \quad (24)$$

kjer je:

$$A = (1 - r) \cdot R_a \cdot \left(0,18 + 0,55 \frac{n}{N} \right) \quad (25)$$

$$B = \sigma \cdot T_a^4 \cdot \left(0,56 - 0,09 \sqrt{e_d} \right) \cdot \left(0,10 + 0,90 \frac{n}{N} \right) \quad (26)$$

V enačbah predstavljajo črke:

- R_n neto energija sevanja [mm/dan],
- R_a kratkovalovno sevanje sonca in neba, ki ga absorbira površina vode ali travnata površina [mm/dan],
- r koeficient refleksije (albedo) v odvisnosti od vrste površine,
- $\frac{n}{N}$ relativno število ur insolacije,
- T_a srednja dnevna temperatura zraka [K],
- e_d srednji dnevni parni pritisk [mm · Hg],
- σ Stefan-Boltzmannova konstanta.

Tretja enačba je sestavljena iz prvih dveh enačb in predstavlja izhlapevanje:

$$E = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot R_n + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (27)$$

Kjer je:

- E izhlapevanje [mm/dan],
- Δ naklon krivulje zasičenega parnega tlaka $\left[\frac{\text{kPa}}{\text{C}} \right]$,
- γ naklon krivulje parnega tlaka (psihrometrična konstanta) $\left[\frac{\text{kPa}}{\text{C}} \right]$.

Penman-Monteithovo enačbo so razvili na pobudo FAO v sodelovanju z Mednarodno komisijo za namakanje in drenažo (ICID) in Svetovno meteorološko organizacijo (WMO). Od leta 1990 je to standardna metoda izračuna referenčne evapotranspiracije. Ker je v enačbi upoštevana referenčna rastlina,

se lahko uporablja po celem svetu (Allen s sodelavci 2005). Za izračun referenčne evapotranspiracije s pomočjo Penman-Monteith enačbe so potrebni naslednji podatki: sončno sevanje, temperatura zraka, vlažnost zraka in hitrost vetra.

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,43 \cdot u_2)} \quad (28)$$

kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],

R_n neto sevanje $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{dan}} \right]$,

G tok toplote s površja Zemlje $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{dan}} \right]$,

T povprečna temperatura [$^{\circ}\text{C}$],

u_2 hitrost vetra na višini 2 m $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$,

e_s zasičeni parni tlak [kPa],

e_a dejanski parni tlak [kPa],

$e_s - e_a$ razlika med zasičenim in dejanskim parnim tlakom [kPa],

Δ naklon krivulje zasičenega parnega tlakom $\left[\frac{\text{kPa}}{\text{C}} \right]$,

γ naklon krivulje parnega tlaka (psihrometrična konstanta) $\left[\frac{\text{kPa}}{\text{C}} \right]$.

Za določitev vremenskih parametrov potrebujemo še srednjo vrednost zračnega tlaka, radiacijo (R_g) in v nekaterih primerih število ur dnevne svetlobe (N). Če teh meritev nimamo, lahko te količine približno izračunamo tudi s pomočjo podatkov kot sta nadmorska višina (m) in zemljepisna širina lokacije. Postopki in metode izračuna teh parametrov so natančneje obrazloženi v monografiji Evapotranspiracija rastline (Allen s sodelavci 1998, Aneks 2).

5 Sklep

Vodne izgube predstavljajo pomembno vlogo pri obravnavanju vodne bilance. Poleg infiltracije je evapotranspiracija eden od pomembnejših členov vodnih izgub (Šraj s sodelavci 2008; Šraj 2009). V članku so predstavljeni različni pojmi in definicije povezane z evapotranspiracijo ter pregled vplivnih dejavnikov in najbolj uporabljenih metod ter enačb za izračun referenčne evapotranspiracije. Med njimi je tudi Penman-Monteithova enačba, ki jo je FAO leta 1990 predlagal kot standardno metodo izračuna referenčne evapotranspiracije.

Izračunane vrednosti evapotranspiracije so odvisne od vključenosti različnih spremenljivk v izračun in seveda njihove natančnosti. Nekatere enačbe vključujejo zgolj eno spremenljivko, druge pa tudi pet in več. Katera enačba bo na določenem območju podala najboljše rezultate je težko z gotovostjo trditi, lahko pa na podlagi statističnih analiz med posameznimi spremenljivkami ugotovimo, katere so tiste, ki imajo največji vpliv na količino evapotranspiracije. Priporočljivo je, da izračune za določeno območje izvedemo z več enačbami in jih ovrednotimo z meritvami.

6 Viri in literatura

- Allen, R. G., Pereira, R. S., Raes, D., Smith, M. 1998: Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rim. Medmrežje: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm> (23. 6. 2011).
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliot, R. L., Howell, D. I., Jensen, M. E., Snyder, R. L. 2005: The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Idaho.
- Bakhtiari, B., Ghahreman, N., Liaghat, A., Hoogenboom, G. 2011: Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. *Journal of Agricultural Science and Tehnology* 13. Teheran.
- Bat, M., Frantar, P. (ur.) 2008: Vodna bilanca Slovenije 1971–2000. Ljubljana. Medmrežje: http://www.arso.gov.si/vode/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/vodna%20bilanca/vodna_bilanca.html (18. 5. 2012).
- Brilly, M., Šraj, M. 2005: Osnove hidrologije. Ljubljana.
- Cesar, P. 2011: Primerjava različnih metod izračuna evapotranspiracije. Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Frantar, P. 2007: Geographical overview of water balance of Slovenia 1971–2000 by main river basins. *Acta geographica Slovenica* 47-1. Ljubljana. DOI: 10.3986/AGS47102
- Irmak, S. 2009: Estimating crop evapotranspiration from reference evapotranspiration and crop coefficients. Medmrežje: <http://elkhorn.unl.edu/epublic/pages/publicationD.jsp?publicationId=1237> (18. 9. 2011).
- Irmak, S., Haman, D. Z. 2003: Evapotranspiration: Potential or reference. Medmrežje: <http://edis.ifas.ufl.edu/ae256> (19. 9. 2011).
- Kolbezen, M., Pristov, J. 1998: Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. Ljubljana. Medmrežje: http://www.arso.gov.si/vode/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/vodotoki_bilanca.html (18. 5. 2012).
- Maidment, D. R. 1993: Handbook of Hydrology. New York.
- Matičič, B. 1977: Evapotranspiration Studies on Different Crops and Irrigation Water Requirements. Ljubljana.
- Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2003: Hidrološko izrazje. *Acta hydrotechnica* 20-32. Ljubljana.
- Papadopoulou, E., Varanou, E., Baltas, E., Dassaklis, A., Mimikou, M. 2003: Estimating potential evapotranspiration and its spatial distribution in Greece using empirical methods. Proceedings of the 8th International Conference on Environmental Science and Technology. Medmrežje: http://www.gnest.org/cest/8cest_papers/abstracts_pdf_names/posters_abs/p198_Papadopoulou.pdf (6. 2. 2011).
- Penman, H. L. 1963: Vegetation and hydrology. Technical Communication No. 53. Bucks.
- Pintar, M. 2003: Osnove namakanja: s poudarkom na vrtninah in sadnih vrstah v severovzhodni Sloveniji. Ljubljana.
- Trajković, S., Stojnić, V. 2007: Effect of wind speed on accuracy of Turc method in a humid climate. *Facta Universitatis, Architecture and Civil Engineering* 5-2. Niš.
- Šraj, M. 2009: Prestrežene padavine: meritve in analiza. *Geografski vestnik* 81-1. Ljubljana.
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2008: Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and Forest Meteorology* 148-1. Amsterdam. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.09.007
- Ward, A. D., Trimble, S. W. 2004: Environmental Hydrology. Boca Raton.
- Xu, C. Y., Singh, V. P. 2002: Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management* 16. New York.
- Young, G. J., Dooge, J. C. I., Rodda, J. C. 1994: Global Water Resource Issues. Cambridge.

7 Summary: Evapotranspiration: an overview of impact factors and calculation methods

(translated by Mojca Šraj)

The article brings an overview of terms related to evapotranspiration, an introduction of influencing factors and the presentation of the methods of calculation. Evapotranspiration is one of the most important factors in the hydrological cycle and it is of great importance in water balance calculations. Reliable estimates of evapotranspiration are necessary for water resources management and planning, water balance calculations as well as in many of the hydrological and ecosystem models (Šraj et al. 2008). By definition, evapotranspiration is a combined process of evaporation and transpiration. Evaporation is the process whereby liquid water is converted to vapor and removed from the evaporating surface, such as lakes, rivers and wet vegetation. Transpiration is the process of the vaporization of water from leaves and stems of the plant. Both processes occur simultaneously and there is no easy way of distinguishing between them (Allen et al. 1998).

Many different terms are related to evapotranspiration, e.g. potential evapotranspiration, reference evapotranspiration, crop evapotranspiration. Also several variations of definitions exist in the literature. Potential evapotranspiration is generally defined as the amount of water that could evaporate and transpire from a vegetated landscape without restrictions other than the atmospheric demand. Because the evaporation surface is not exactly defined, the concept of potential evapotranspiration has been gradually replaced by reference evapotranspiration in the past ten years. By Allen et al. (1998) reference evapotranspiration is defined as the rate of evapotranspiration from hypothetical grass reference crop, not short of water, with height of 0.12 m, canopy resistance 70 s/m and albedo 0.23. Typically, reference crop is grass or alfalfa.

Evapotranspiration is a very complex and non-linear process, because it depends on several influencing factors. Weather parameters, crop characteristics and environmental aspects are factors affecting evapotranspiration (Allen et al. 1998). They should be considered when assessing the evapotranspiration. The driving force for evapotranspiration is the difference between the water vapor pressure at the evaporating surface and atmosphere. The main climatological parameters are therefore solar radiation, temperature, air humidity and wind speed.

Direct measurements of potential evapotranspiration are possible using special instruments – lysimeters. But evapotranspiration is not easy to measure. Accurate measurements are time consuming, expensive and demanding in terms of accuracy. Also the methods are inappropriate for routine measurements (Allen et al. 1998). Measurements are generally limited to a specific research purposes, because lysimeters are difficult to construct and their operation require a special knowledge.

Numerous equations have been developed for indirect estimation of evapotranspiration in the last 50 years. Calculation methods are based on climatological data and differ by complexity, assumptions and data demand. They have been developed for different climatic regions and may give different results. Methods require various climatological and physical parameters. They are in general divided into three groups: temperature-based methods, radiation-based methods and combined methods. Well known temperature-based methods are: Thornthwaite method, Hargreaves method and Blanney-Criddle method. Radiation-based methods are for example: Priestley-Taylor method, Makkink method and Jensen-Hais method. Turc method, Penman method and Penman-Monteith method belong to the combined methods. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) have proposed using Penman-Monteith equation as the standard equation for estimating reference evapotranspiration. Method requires comprehensive climatic data (solar radiation, temperature, humidity and wind speed); the procedure of calculation for each term of this equation is well-defined and that is the reason that the equation is currently frequently applied. A common practice by estimation of evapotranspiration is first to estimate the reference evapotranspiration and then to apply appropriate empirical crop factor.

