

REFERENČNÍ EVAPOTRANSPIRACE

Mojmír Kohut

Abstract:

REFERENTIAL EVAPOTRANSPIRATION

The presented contribution analyses in detail the algorithm for the calculation of referential evapotranspiration of a hypothetical surface, by the universally recommended and world-wide-regarded FAO method, which is based on the Penman-Monteith approach. Besides all formulae, which are absolutely necessary for the solution of this problem, the contribution quotes the derivation of the basic relationship for the calculation of referential evapotranspiration from the original Penman-Monteith combination equation for the calculation of potential evapotranspiration. Emphasis is put on the determination, or simplification of the aerodynamic and surface resistance, including other characteristics. The contribution further points to certain peculiarities, which are a reason for a small modification of this method when it is used in our conditions, mainly with respect to the availability of climatic data when making everyday calculations. The referential evapotranspiration of a hypothetical surface which is very close to grass stand is one of the possible ways of evaluation of evaporation, evaporation being a basic balance element in the countryside.

Key words: referential evapotranspiration, FAO method, potential evapotranspiration, Penman-Monteith, evaporation.

1. Úvod

Předkládaný příspěvek popisuje jeden z možných způsobů výpočtu referenční evapotranspirace hypotetického povrchu všeobecně doporučovanou a uznávanou metodikou FAO, založenou na Penman-Monteithově přístupu. Neklade si za cíl srovnat všechny způsoby výpočtů zmíněnou metodikou, avšak soustřeďuje se pouze na vyhodnocení referenční evapotranspirace v denním intervalu.

V české a slovenské odborné literatuře je řada publikací, věnovaných problematice potenciální a aktuální evapotranspirace včetně analýz různých metod výpočtů. Naopak počet prací, které se zabývají pouze výpočtem referenční evapotranspirace hypotetického povrchu podle metodiky FAO, je podstatně nižší.

Výpočet a určení referenční evapotranspirace hypotetického povrchu podle metodiky FAO je obecným přístupem k řešení problematiky výparu (evaporace, evapotranspirace). Referenční evapotranspirací se v tomto smyslu rozumí evapotranspirace z hypotetického povrchu velmi podobnému standardnímu travnímu porostu, který se vyznačuje během celého kalendářního roku konstantní výškou (0,12 m), konstantním albedem (0,23), konstantním povrchovým odporem (70 s.m^{-1}), plným (maximálním) zápojem a optimálním zásobováním srážkovou vodou. Jinými slovy, výpočet proběhne pro den nebo jinou časovou jednotku (metodika FAO uvádí též zpracování pro časové intervaly hodina, 10 dní a měsíc) na základě vstupu základních meteorologických údajů (teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, rychlost větru a trvání slunečního svitu), přičemž všechny ostatní parametry jsou nastaveny na konstantní hladinu. Tímto způsobem lze tedy relativně snadně porovnávat jednotlivé navzájem odlišné oblasti.

Je nutno podotknout, že ve všech dále uváděných vztazích byla pro jednoduchost a srozumitelnost ponecháno původní značení proměnných, které může být poněkud odlišné od našich zvyklostí.

2. Referenční evapotranspirace – odvození základní rovnice

Základní rovnice pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu ET_0 metodikou FAO vychází z originální Penman-Monteithovy kombinační rovnice pro výpočet potenciální evapotranspirace ve tvaru:

$$\lambda * ET = \frac{\Delta * (R_n - G) + \rho_a * c_p * \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

kde: ET = intenzita evapotranspirace [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],
 λ = skupenské (latentní) teplo vypařování neboli měrné teplo vypařování,
 $\lambda = 2,45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,
 Δ = derivace tlaku nasycené vodní páry podle teploty vzduchu [$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$],
 R_n = radiační bilance na povrch [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],
 G = tok tepla v půdě [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],
 ρ_a = hustota vzduchu při dané teplotě vzduchu a atmosférickém tlaku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 c_p = specifické (měrné) teplo vzduchu [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$],
 e_s = tlak nasycené vodní páry při teplotě vzduchu [kPa],
 e_a = aktuální tlak vodní páry [kPa],
 Rozdíl $e_s - e_a$ je sytostní doplněk.
 r_a = aerodynamický odpor (rezistence) [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$],
 r_s = povrchový odpor (rezistence) plodiny [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$],
 γ = psychrometrická konstanta [$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$], $\gamma = 0,66$ pro teplotu vzduchu ve $^\circ\text{C}$ a tlak vodní páry v mb nebo hPa.

Dle rovnice (1) byl odvozen základní vzorec pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu metodikou FAO:

$$ET_0 = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273,16} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * u_2)} \quad (2)$$

kde: ET_0 = referenční evapotranspirace hypotetického povrchu [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$],
 Δ = derivace tlaku nasycené vodní páry podle teploty vzduchu [$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$],
 R_n = radiační bilance na povrch plodiny [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$],
 G = tok tepla v půdě [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$],
 γ = psychrometrická konstanta [$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$],
 T = průměrná denní teplota vzduchu ve 2 m nad povrchem [$^\circ\text{C}$],
 u_2 = průměrná denní rychlost větru ve 2 m nad povrchem [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 e_s = průměrný denní tlak nasycení vodní páry při teplotě vzduchu ve 2 m nad povrchem [kPa],

e_a = průměrný denní aktuální tlak vodní páry vypočítaný podle teploty vzduchu ve 2 m nad povrchem [kPa],
Rozdíl $e_s - e_a$ je sytostní doplněk [kPa].

K odvození vztahu (2) pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu z původní Penman-Monteithovy kombinační rovnice (1) jsou nutné následující úpravy.

2.1. Úprava aerodynamického odporu (rezistence) r_a

Přenos tepla a vodní páry z vypařujícího povrchu do vrstvy bezprostředně přiléhající k povrchu plodiny je určen aerodynamickou rezistencí podle vztahu:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{0m}}\right] * \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{0h}}\right]}{\kappa^2 * u_z} \quad (3)$$

kde: r_a = aerodynamický odpor (rezistence) [$s \cdot m^{-1}$],
 z_m = výška měření rychlosti větru [m],
 z_h = výška měření vlhkosti vzduchu [m],
 d = efektivní výška porostu [m],
 z_{0m} = parametr (součinitel) dynamické drsnosti [m],
 z_{0h} = parametr (součinitel) dynamické drsnosti pro přenos tepla a vodní páry [m],
 κ = Kármánova konstanta, $\kappa = 0,41$ [-],
 u_z = rychlost větru ve výšce měření z [$m \cdot s^{-1}$].

Přijmeme-li základní předpoklady, že výška travního porostu je po celý rok konstantní ($h = 0,12$ m) a měření meteorologických veličin probíhá ve standardní výšce 2 m nad povrchem ($z_m = z_h = 2$ m pro teplotu vzduchu a vlhkost vzduchu, rychlost větru je nutno na tuto hladinu přepočítat) a použijeme-li základní zjednodušující vztahy ($d = 2/3 * h$, $z_{0m} = 0,123 * h$, $z_{0h} = 0,1 * z_{0m}$), potom rovnici (3) pro výpočet aerodynamického odporu lze přepsat do zjednodušeného tvaru, který se používá k výpočtu referenční evapotranspirace hypotetického povrchu:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{2 - (2/3 * 0,12)}{0,123 * 0,12}\right] * \ln\left[\frac{2 - (2/3 * 0,12)}{0,1 * (0,123 * 0,12)}\right]}{0,41^2 * u_z} = \frac{207,664}{u_z} \approx \frac{208}{u_z} \quad (4)$$

2.2. Úprava povrchového odporu (rezistence) r_s

Pro výpočet se používá jednoduchý vzorec:

$$r_s = \frac{r_1}{LAI_{act}} \quad (5)$$

kde: r_s = povrchový odpor (rezistence) [$s \cdot m^{-1}$],
 r_1 = stomatální odpor (rezistence) optimálně osvětleného listu, $r_1 = 100 s \cdot m^{-1}$,

LAI_{act} = aktivní index plochy listové [m^2 (plocha listoví). m^{-2} (plocha povrchu půdy)], pro který v případě travního porostu platí základní vztah:

$$LAI_{act} = 0,5 * 24 * h \quad (6)$$

kde: h = výška standardního travního porostu [m], $h = 0,12$ m.

Dosažením do rovnice (5) dostaneme závěrečnou hodnotu povrchového odporu r_s , která se používá v metodice FAO k výpočtu referenční evapotranspirace travního porostu:

$$r_s = \frac{100}{0,5 * 24 * 0,12} = 69,444 \approx 70 \quad (7)$$

Správně definovaný povrchový odpor je všeobecně rozhodující pro dosažení uspokojivých výsledků evapotranspirace. Je výrazně variabilní, a to v závislosti na typu a stáří plodiny a na takových vnějších faktorech jako je např. stav půdní vlhkosti.

2.3. Dokončení úpravy základního vztahu (1)

V základní rovnici (1) lze upravit a zjednodušit výraz $(\rho_a * c_p) / r_a$ na pravé straně čitatele, a to pomocí vztahů:

$$\gamma = \frac{c_p * P}{\varepsilon * \lambda} \Rightarrow c_p = \frac{\gamma * \varepsilon * \lambda}{P} \quad (8)$$

$$\rho_a = \frac{P}{1,01 * (T + 273,16) * R} \quad (9)$$

S použitím vztahu (4) výsledkem bude rovnice:

$$\frac{c_p * \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma * \varepsilon * \lambda}{1,01 * (T + 273,16) * R} * \frac{u_2}{208} \quad (10)$$

kde: c_p = specifické (měrné) teplo při konstantním atmosférickém tlaku [$MJ.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$],
 ρ_a = průměrná hustota vzduchu při konstantním atmosférickém tlaku [$kg.m^{-3}$],
 r_a = aerodynamická rezistence [$s.m^{-1}$],
 γ = psychrometrická konstanta [$kPa.\text{°C}^{-1}$],
 ε = poměr molekulárních hmotností vodní páry a suchého vzduchu [-], $\varepsilon = 0,622$,
 λ = latentní teplo výparu [$MJ.kg^{-1}$],
 u_2 = průměrná denní rychlost větru na hladině 2 m nad povrchem [$m.s^{-1}$],
 R = specifická plynová konstanta [$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$], $R = 0,287$ $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$,
 T = průměrná denní teplota vzduchu [°C],
 P = atmosférický tlak [kPa].

Rovnice (10) je vyjádřena v jednotkách $MJ.m^{-2}.\text{°C}^{-1}.s^{-1}$. Po přenásobení počtem sekund dne dostaneme závěrečný tvar rovnice (10) v jednotkách $MJ.m^{-2}.\text{°C}^{-1}.den^{-1}$:

$$\frac{c_p * \rho_a}{r_a} = 86400 * \frac{0,622 * \gamma * \lambda}{1,01 * (T + 273,16) * 0,287 * 208} * u_2 \quad (11)$$

nebo (po vydělení $\lambda = 2,45$):

$$\frac{c_p * \rho_a}{r_a} = \gamma * \frac{891,328}{T + 273,16} * u_2 \approx \gamma * \frac{900}{T + 273,16} * u_2 \quad (12)$$

Základní Penman-Monteithova rovnice pro výpočet potenciální evapotranspirace travního porostu (1) se úpravami 2.1, 2.2 a 2.3 modifikovala na zjednodušenou Penman-Monteithovu rovnici pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu (2) podle metodiky FAO. Výraz 0,408 ve vztahu (2) je reciprokou hodnotou specifického (měrného) tepla vypařování λ .

3. Referenční evapotranspirace hypotetického povrchu – podrobná analýza výpočetních algoritmů

Metodika FAO Penman-Monteith umožňuje výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu ET_0 pro různé časové intervaly (měsíc, 10 dní, den, hodina apod.). Standardní výpočty, prováděné v rámci ČHMÚ, se vztahují na zpracování referenční evapotranspirace pro jednotlivé dny. Předmětem následující podrobné analýzy je právě tento způsob výpočtů, který např. je v současné době aplikován při řešení problematiky evaporace a evapotranspirace v Atlasu podnebí ČR.

Originální metodika FAO doporučuje následující vstupní meteorologická data:

- průměrná denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$], počítaná z maximální a minimální teploty vzduchu jako jejich součet dělený dvěma (pro dílčí výpočty jsou nutné extrémní denní teplotní údaje).
- průměrná denní relativní vlhkost vzduchu [kPa], počítaná z maximální a minimální relativní vlhkosti vzduchu (pro dílčí výpočty jsou nutné extrémní denní údaje o vlhkosti vzduchu).
- denní trvání slunečního svitu [hod].
- průměrná denní rychlost větru, počítaná ze tří termínů 07, 14, 21 hod. [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Vedle výše uvedených meteorologických dat je nutno znát geografické souřadnice výpočetního místa (klimatologické stanice), a to jeho nadmořskou výšku a zeměpisnou šířku.

Výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu podle vztahu (2) je vhodné rozdělit do několika dílčích etap. Zde je nutno upozornit na skutečnost, že k vyčíslení určitých charakteristik se mohou používat poněkud rozdílné vzorce, které se mohou odlišovat v hodnotách konstant. Vedle originálního označení proměnných jsou taktéž zachovány všechny vzorce, které jsou doporučovány metodikou FAO. Stejně tak byly ponechány všechny jednotky, i když v některých případech se v naší praxi používají jednotky poněkud jiné (např. tlak vodní páry u nás většinou v hPa, metodika FAO v kPa). Vzhledem k našim specifickým podmínkám a zvláště dostupnosti některých dat z dlouhodobého pohledu některé algoritmy musí být poněkud modifikovány.

3.1. Pomocné výpočty, vyhodnocení vybraných parametrů

A1. *Přepočet průměrné denní rychlosti větru z hladiny měření na standardní hladinu 2 m nad povrchem:*

$$u_2 = u_z * \frac{4,87}{\ln(67,8 * z - 5,42)} \quad (13)$$

kde: u_2 = průměrná denní rychlost větru na hladině 2 m nad povrchem [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 u_z = průměrná denní rychlost větru měřená na hladině z metrů nad povrchem [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
z = výška měření nad povrchem.

Rychlost větru se obvykle měří na hladině 10 m nad povrchem. Z tohoto důvodu je nutný přepočet s ohledem na logaritmický profil rychlosti větru.

A2. *Přepočet atmosférického tlaku v závislosti na nadmořské výšce výpočetního místa (stanice):*

$$P = 101,3 * \left(\frac{293,16 - 0,0065 * z}{293,16} \right)^{5,26} \quad (14)$$

kde: P = atmosférický tlak [kPa],
z = nadmořská výška výpočetního místa (stanice) [m n. m.].

A3. *Výpočet průměrné denní teploty vzduchu:*

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \quad (15)$$

kde: T_{mean} = průměrná denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],
 T_{max} = maximální denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],
 T_{min} = minimální denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$].

A4. *Sklon křivky napětí vodních par při dané průměrné denní teplotě vzduchu:*

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}} + 237,3} \right) \right]}{(T_{\text{mean}} + 237,3)^2} \quad (16)$$

kde: Δ = sklon křivky napětí vodních par při dané průměrné denní teplotě vzduchu [$\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$],
 T_{mean} = průměrná denní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$].

A5. Výpočet psychrometrické konstanty:

$$\gamma = \frac{c_p * P}{\varepsilon * \lambda} = 0,665 * 10^{-3} * P \quad (17)$$

kde: γ = psychrometrická konstanta [kPa.°C⁻¹],
 c_p = specifické teplo při konstantním tlaku, $c_p = 1,013 \cdot 10^{-3}$ [MJ.kg⁻¹.°C⁻¹],
 P = atmosférický tlak [kPa],
 ε = poměr molekulárních hmotností vodní páry a suchého vzduchu [-],
 $\varepsilon = 0,622$,
 λ = latentní teplo výparné, $\lambda = 2,45$ [MJ. kg⁻¹].

3.2. Vlhkostní charakteristiky, určení sytostního doplňku

B1. Výpočet tlaku nasycené vodní páry pro denní maximální a denní minimální teplotu vzduchu.

Obecně je možno použít následující vzorec:

$$e^0(T) = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right) \quad (18)$$

kde: $e^0(T)$ = tlak nasycené vodní páry při teplotě T [kPa],
T = obecně jakákoliv teplota vzduchu [°C].

Výpočet podle vzorce (18) je nutno provést pro denní maximální a denní minimální teplotu vzduchu. Průměrný denní tlak nasycené vodní páry potom dostaneme pomocí vztahu:

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (19)$$

kde: e_s = průměrný denní tlak nasycené vodní páry [kPa],
 $e^0(T_{\max})$ = tlak nasycené vodní páry pro denní maximální teplotu vzduchu [kPa],
 $e^0(T_{\min})$ = tlak nasycené vodní páry pro denní minimální teplotu vzduchu [kPa].

B2. Výpočet průměrného denního aktuálního tlaku vodní páry pomocí maximální denní a minimální denní relativní vlhkosti vzduchu:

$$e_a = \frac{e^0(T_{\min}) * \frac{RH_{\max}}{100} + e^0(T_{\max}) * \frac{RH_{\min}}{100}}{2} \quad (20)$$

kde: e_a = průměrný denní aktuální tlak vodní páry [kPa],
 $e^0(T_{\min})$ = tlak nasycené vodní páry pro denní minimální teplotu vzduchu [kPa],
 $e^0(T_{\max})$ = tlak nasycené vodní páry pro denní maximální teplotu vzduchu [kPa],
 RH_{\max} = denní maximum relativní vlhkosti vzduchu [%],

RH_{\min} = denní minimum relativní vlhkosti vzduchu [%].

Výpočet $e^0(T_{\min})$ a $e^0(T_{\max})$ proběhne podle vztahu (18). Při aplikaci rovnice (20) v našich podmínkách nastávají jisté problémy. Budeme-li zpracovávat dlouhodobé řady referenční evapotranspirace travního porostu, v denním kroku, nebudeme mít k dispozici extrémní údaje o relativní vlhkosti vzduchu v intervalu jednotlivých dní. Přesný postup podle metodiky FAO bychom tedy mohli zachovat pouze v případě, že bychom zpracování prováděli pouze za období automatických měření v síti klimatologických stanic ČHMÚ, tj. přibližně za období od druhé poloviny 90. let minulého století, kdy u vybraných stanic máme k dispozici řady 15ti minutových dat, z nichž lze již vybrat maximální a minimální hodnotu relativní vlhkosti vzduchu. Metodika FAO však nabízí i náhradní řešení pro případy absence vlhkostních extrémů vzduchu. Doporučuje se následující vztah:

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} * \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (21)$$

kde RH_{mean} je podle metodiky FAO průměrná relativní vlhkost vzduchu, definovaná jako průměr mezi RH_{\max} a RH_{\min} . Zde je v metodice nesrovnalost, neboť extrémy relativní vlhkosti vzduchu nám nejsou známy. Tento problém lze v praxi alespoň přibližně řešit tím, že do rovnice (21) dosadíme průměrnou denní relativní vlhkost, vypočítanou obvyklým způsobem. Rovnice (21) je méně průkazná než rovnice (20).

B3. Průměrný denní sytostní doplněk určíme jako rozdíl průměrného denního tlaku nasycené vodní páry a průměrného denního aktuálního tlaku vodní páry, tj. $e_s - e_a$. Výsledek bude v kPa.

3.3. Pomocné výpočty, využití k řešení radiačních členů

C1. Určení juliánského dne v roce:

$$JD = \text{int}\left(275 * \frac{M}{9} - 30 + D\right) + \text{const} \quad (22)$$

kde: JD = juliánský den, tj. pořadové číslo dne v nepřestupném nebo přestupném roce [-],

M = pořadové číslo měsíce v roce [-],

D = pořadové číslo dne v měsíci [-],

const = konstanta, jejíž hodnota přímo závisí na měsíci a celkovém počtu dní v roce:

- pro leden a únor nepřestupného a přestupného roku platí: const = 0,
- pro březen až prosinec nepřestupného roku platí: const = -2,
- pro březen až prosinec přestupného roku platí: const = -1.

C2. Převod zeměpisné šířky ze stupňů a minut na stupně a desetiny stupně:

$$SS^{\circ}MM' = SS^{\circ} + \frac{MM'}{60} \quad (23)$$

kde: SS° = stupně zeměpisné šířky [-],

MM' = minuty zeměpisné šířky [-].

Převedený údaj je pro severní polokouli kladný, pro jižní záporný.

C3. Převod zeměpisné šířky ze stupňů a desetin stupňů na radiány:

$$[\text{rad}] = \frac{\pi}{180} * [\text{stupně, desetiny}] \quad (24)$$

3.4. Jednotlivé složky radiace

D1. Extraterestrická radiace na horní hranici atmosféry:

Globální (extraterestrická) radiace představuje záření, dopadající na jednotku horizontální plochy na vnější hranici atmosféry. Pro místa s obdobnou zeměpisnou šířkou je přibližně stejné, mění se pouze v průběhu roku. Nad zemskou atmosférou neexistuje vliv oblačnosti, zákalu ani znečištění ovzduší, a proto dávka sluneční energie je zde v libovolném časovém okamžiku nejvyšší. Vedle solární konstanty se musí brát v úvahu též úhel dopadu slunečních paprsků v daném místě na horní hranici atmosféry. Výpočet se provede podle vzorce:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{sc} * d_r * (\omega_s * \sin\varphi * \sin\delta + \cos\varphi * \cos\delta * \sin\omega_s) \quad (25)$$

kde: R_a = extraterestrická radiace na horní hranici atmosféry [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$],

G_{sc} = solární konstanta [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$], $G_{sc} = 0,0820 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,

d_r = inverzní relativní vzdálenost Země-Slunce [-]:

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2 * \pi}{365} * \text{JD}\right) \quad (26)$$

ω_s = hodinový úhel východu Slunce [rad]:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi * \tan\delta) \quad (27)$$

nebo (za předpokladu absence funkce arccos)

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{-\tan\varphi * \tan\delta}{X^{0,5}}\right) \quad (28)$$

kde:

$$X = 1 - (\tan\varphi)^2 * (\tan\delta)^2 \quad (X = 0,00001, \text{ jestliže } X \leq 0) \quad (29)$$

φ = zeměpisná šířka [rad] vyjádřená podle rovnice (24),
 δ = solární deklinace [rad]:

$$\delta = 0,409 * \sin\left(\frac{2 * \pi}{365} * JD - 1,39\right) \quad (30)$$

D2. Maximální trvání slunečního svitu:

$$N = \frac{24}{\pi} * \omega_s \quad (31)$$

kde: ω_s = hodinový úhel východu Slunce [rad], viz vztah (27),

Poměr měřeného slunečního svitu k maximálně možnému je relativní sluneční svit. Tato charakteristika vstupuje do dalších výpočtů.

D3. Solární krátkovlnná radiace:

$$R_s = R_a * \left(a_s + b_s * \frac{n}{N} \right) \quad (32)$$

kde: R_s = solární krátkovlnná radiace nad povrchem, opravená o vliv oblačnosti [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$],

R_a = extraterestrická radiace na horní hranici atmosféry [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$],

a_s, b_s = Angströmovy koeficienty [-]. Jejich hodnoty se liší v závislosti na zeměpisné šířce a podle ročních období. Pokud pro dané výpočetní místo (stanici) nejsou tyto koeficienty nakalibrovány, což při komplexním zpracování bývá v naprosté většině případů, metodika FAO používá hodnoty $a_s = 0,25$ a $b_s = 0,50$.

n = měřený sluneční svit [hod],

N = maximální trvání slunečního svitu [hod], viz vztah (27).

Angströmův vzorec (32) se používá ze předpokladu, že nejsou k dispozici měření globální radiace. Pro případy, kdy nejsou k dispozici kalibrované Angströmovy koeficienty, metodika FAO dále doporučuje zavést opravu v podobě výrazu R_s/R_{so} (tzv. relativní krátkovlnná radiace), kde

$$R_{so} = R_a * (0,75 + 2 * 10^{-5} * z) \quad (33)$$

kde: R_{so} = solární krátkovlnná radiace za předpokladu bezoblačné oblohy [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$],

R_a = extraterestrická radiace na horní hranici atmosféry [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$],

z = nadmořská výška výpočetního místa (stanice) [m n. m.].

D4. *Radiační bilance krátkovlnného záření:*

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s \quad (34)$$

kde: R_{ns} = radiační bilance krátkovlnného záření [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$],
 α = albedo (odrazivost) povrchu, metodika FAO pro travní porost používá $\alpha = 0,23$ [-],
 R_s = krátkovlnná radiace nad povrchem [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$],

D5. *Radiační bilance dlouhovlnného záření:*

$$R_{nl} = \sigma * \left[\frac{(T_{\max} + 273,16)^4 + (T_{\min} + 273,16)^4}{2} \right] * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a}) * \left(1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (35)$$

kde: R_{nl} = radiační bilance dlouhovlnného záření [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$],
 σ = Stefan-Boltzmannova konstanta [$4,903.10^{-9} \text{ MJ.K}^{-4}.\text{m}^{-2}.\text{den}^{-1}$],
 T_{\max} = denní maximální teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],
 T_{\min} = denní minimální teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],
 e_a = průměrný denní aktuální tlak vodní páry [kPa],
 R_s/R_{so} = relativní krátkovlnná radiace (podmínka: $R_s / R_{so} \leq 1$) [-],
 R_s = solární krátkovlnná radiace [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$], viz vztah (32).
 R_{so} = solární krátkovlnná radiace za předpokladu bezoblačné oblohy, kdy platí $n = N$,
 n = měřený sluneční svit [hod],

D6. *Celková radiační bilance:*

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (36)$$

kde: R_n = celková radiační bilance [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$],
 R_{ns} = radiační bilance krátkovlnného záření [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$], viz vztah (34),
 R_{nl} = radiační bilance dlouhovlnného záření [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$], viz vztah (35).

Poznámka k toku tepla v půdě (G):

Metodika FAO pro denní periodu výpočtu nepředpokládá s tokem tepla v půdě, $G \approx 0$.

Určením radiační bilance máme k dispozici všechny dílčí rovnice pro výpočet referenční evapotranspirace hypotetického povrchu podle metodiky FAO Penman-Monteith.

4. Závěr

Příspěvek kompletně analyzuje algoritmus výpočtu referenční evapotranspirace hypotetického povrchu doporučenou metodikou FAO Penman-Monteith za předpokladu výpočtů v denním kroku. Poukazuje na některé zvláštnosti, které jsou důvodem drobné modifikace této metody při jejím využití v našich podmínkách. Vedle popisu jednotlivých

výpočetních postupů uvádí též způsob odvození základního vzorce této metody hodnocení evapotranspirace travního porostu ze standardního vztahu potenciální evapotranspirace metodou Penman-Monteith. Referenční evapotranspirace hypotetického povrchu je jedním ze způsobů hodnocení výparu jako základního bilančního prvku v krajině.

Poděkování:

Předkládaný příspěvek vznikl s využitím výsledků, získaných pomocí projektu NAZV QF3100 „Posouzení nárůstu klimatického sucha v zemědělství a zmírňování jeho důsledků závlahami“.

5. Literatura

1. Allen R.G., Jensen M.E., Wright J.L., Burman R.D.: Operational estimates of evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 81(4), pp. 650-662, 1989.
2. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.: Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization, FAO Irrigation and Drainage Papers No. 56, pp. 301, Rome 1998.
3. Allen R.G., Pruitt W.O.: FAO-24 reference evapotranspiration coefficients. *Journal Irrig. And Drainage Engineering*, ASCE 117(5), pp. 758-773, 1991.
4. Allen R.G., Smith M., Perrier A., Pereira L.S.: An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43(2), pp. 1-34, 1994a.
5. Allen R.G., Smith M., Pereira L.S., Perrier A.: An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43(2), pp. 35-92, 1994b.
6. Bos M.G., Vos J., Feddes R.A.: CRIWAR 2.0. A simulation model on Crop Irrigation Water Requirements. ILRI publication 46, pp. 117, Wageningen 1996.
7. Brutsaert W.: *Evaporation into the Atmosphere*. D.Reidel Publishing Co., pp. 299, Dordrecht 1982.
8. Burman R., Pochop L.O.: *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Elsevier Science B.V., pp. 275, Amsterdam 1994.
9. Cain J.D.: *Modelling evaporation from plant canopies*. Institute of Hydrology Wallingford, Report No. 132, pp. 42, Wallingford 1998.
10. Doorenbos J., Pruitt W.O.: *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd ed. FAO, pp. 156, Rome 1977.
11. Feddes R.A., Lenselink K.J.: *Evapotranspiration*. In: *Drainage Principles and Applications*, H.P. Ritzema (ed.), ILRI, pp. 1125, Wageningen 1994.
12. Gardner C.M.K. (ed.): *The MORECS Discussion Meeting, April 1981*. Institute of Hydrology, Report No. 78, pp. 57, Wallingford 1981.
13. Gardner C.M.K., Field M.: An evaluation of the succes of MORECS, a meteorological model, in estimating soil moisture deficits. *Agricultural Meteorology*, 29, pp. 269-284, Elsevier, Amsterdam 1983.
14. Hough M.N., Jones R.J.A.: The United Kingdom Meteorological Office rainfall and evaporation calculation systém: MORECS version 2.0 – an overview. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(2), pp. 227-239, 1997.

15. Hough M., Palmer S., Weir A., Lee M., Barrie I.: The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System MORECS version 2.0 (1995). An update to Hydrological Memorandum No. 45, pp. 80, Meteorological Office, Bracknell, Meteorological Office, Wolverhampton, 1997.
16. Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G. (eds.): Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, ASCE, pp. 360, New York 1990.
17. Monteith J.L., Unsworth M.H.: Principles of Environmental Physics, Edward Arnold, 2nd ed., pp. 291, London 1990.
18. Novák V.: Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. SAV, Bratislava 1995, 260 str.
19. Penman H.L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. A, 193, pp. 120-145, 1948.
20. Smith M., Allen R.G., Monteith J.L., Perrier A., Pereira L.S., Segeren A.: Report of the Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization, FAO Report, pp. 60, Rome 1992.
21. Thompson N., Barrie I.A., Ayles M.: The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System: MORECS (July 1981). Met 08 (Hydrometeorological Services, Hydrological Memorandum No. 45, pp. 72, Bracknell 1981.
22. Verhoef A., Feddes R.A.: Preliminary Review of Revised FAO Radiation and Temperature Methods. Food and Agricultural Organization, Land and Water Development Division, pp. 116, Rome 1991.