ارزیابی دقت روش‌های مختلف در تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) در دشت قزوین

نیازعلی ابراهیمی پاک (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

اصلان اگدرنژاد

استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

محسن احمدی

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی

چکیده

تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع عاملی اساسی در برآورد نیاز آبی گیاه و به دنبال آن مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح آبیاری به شمار می‌آید. برای تخمین این عامل روش‌ها و معادلات متفاوتی ارائه شده که دقت این روش‌ها بر اساس اطلاعات هواشناسی مورد استفاده و شرایط اقلیمی منطقه متفاوت است. بنابراین بررسی و ارزیابی روش‌های مختلف و تعیین روش مناسب برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در هر منطقه امری ضروری می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از داده‌های لایسیمتری برداشت شده در مدت 4 سال در ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل‌آباد واقع در استان قزوین، مقادیر تبخیر- تعرق گیاه مرجع اندازه‌گیری شد. سپس به منظور مقایسه دقت روش‌های مختلف تجربی، روش لایسیمتر به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و روش‌های هارگریوز- سامانی، بلانی- کریدل، تورک، پنمن- مانتیث فائو، مک کینک، بریستلی- تیلور، پنمن- فائو و تشت تبخیر بر اساس آن مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، روش تشت تبخیر با بیشترین ضریب همبستگی (0/973) و کم‌ترین خطای استاندارد (3/81) نسبت به روش مرجع، مناسب‌ترین روش در برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه مورد مطالعه بوده است. همچنین، روش پریستلی- تیلور با کم‌ترین ضریب همبستگی (0/896) و بیشترین خطای استاندارد (23/16) در بین روش‌های مورد مطالعه کم‌ترین دقت را داشته است. معادلات پنمن- مانتیث فائو و هارگریوز سامانی نیز با ضرایب همبستگی 0/904 و 0/899 پس از معادله تشت تبخیر بیشترین همبستگی را با داده‌های لایسیمتری داشتند.

کلمات کلیدی: پنمن- مانتیث فائو، تبخیر- تعرق پتانسیل، لایسیمتر زهکش‌دار

مقدمه

تبخیر-تعرق[1] یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که تعیین آن جهت برآورد آب مصرفی گیاه و طراحی سیستم‌های آبیاری ضروری است. به منظور تعیین این روش می‌بایست از روش‌های متعدد مانند لایسی‌متر استفاده کرد. به علت هزینه‌بر بودن، زمان‌بر بودن و عدم اجرای لایسی‌متر در بسیاری از نقاط، کاربرد این روش در مزارع معمولاً با مشکل مواجه است (عابدی کوپایی و همکاران، 1387). به همین دلیل بسیاری از کشاورزان و طراحان سیستم‌های آبیاری، از روش‌های غیر مستقیم بدین منظور استفاده می‌کنند (علیزاده، 1394).

در روش‌های غیر مسقیم، ابتدا نیاز آبی گیاه مرجع (چمن یا یونجه) با استفاده از روابط ارائه شده توسط محققان مختلف تخمین زده می‌شود. سپس با اعمال ضرایب گیاهی در دوره‌های مختلف رشد گیاه، مقدار تبخیر-تعرق آن در هر مرحله از رشد محاسبه می‌گردد (موسوی بایگی و همکاران، 1388). بنابراین انتخاب رابطه مناسب برای تعیین نیاز آبی گیاه مرجع اهمیت بسیاری در تخمین نیاز آبی گیاه مورد نظر و مقدار آب آبیاری در مزرعه خواهد داشت (شریفان و علیزاده، 1388). از این رو، محققان مطالعات گسترده‌ای برای تعیین مناسبترین رابطه‌ی تعیین تبخیر-تعرق انجام داده‌اند.

اصول این روش‌ها نیز به این صورت بوده که در بازه یک یا چند ساله مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع را به وسیله لایسی‌متر تعیین کرده و با نتایج رابطه‌های مختلف مقایسه کرده‌اند. این تحقیقات از حدود سی سال پیش مورد توجه بوده است و از جمله اولین پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به گزارش نوادیالو[2] (1991) اشاره کرد. این محقق در آزمایشی که به منظور تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه نزوکای نیجریه با شرایط آب و هوای گرمسیری انجام داد؛ روش جنسن هیز اصلاح شده را به عنوان روشی دقیق توصیه کرد. اسماعیل[3] (1993) گزارش کرد که روش جنسن هیز مناسبترین روش برای تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه القیم عربستان است. سانتوس[4] (1994) نیز روش جنسن هیز اصلاح شده را مناسبترین روش برای تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع در برزیل توصیه نمود. آماتیا و همکاران[5] (1995) روش‌های پنمن- مانتیث، مک کینك، پرسیتلی-تیلور، تورک، هارگریوز- سامانی و تورنت-وایت را برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع در سه منطقه از کارولینای شمال شرق مورد بررسی قرار دادند. با توجه به اینکه این محققان دسترسی به داده‌های لایسی‌متری نداشتند؛ از نتایج روش فائو-پنمن-مانتیث به عنوان مرجع مقایسه استفاده کردند. نتایج این محققان نشان داد که همبستگی خوبی بین روش‌های فوق و روش پنمن- مانتیث وجود داشت. آلن[6] (1996) و آلن و همکاران (1998) بر اساس تحقیقات صورت گرفته در نقاط مختلف جهان نشان دادند که دقت روش پنمن- مانتیث در برآورد مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع از دیگر روابط تجربی بهتر بوده و این روش را به

[1] Evapotranspiration
[2] Nwadialo
[3] Ismail
[4] Santos
[5] Amatya et al.
[6] Allen

عنوان روش استاندارد برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع پیشنهاد کردند.
محققان داخلی نیز تحقیقات متعددی روی این موضوع انجام داده‌اند. به عنوان مثال، توشیح (1387) مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع را در کردستان با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار و روش‌های تجربی برآورد نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که مقادیر به دست آمده از تشت تبخیر با ضریب رگرسیونی 94 درصد و روش بلانی- کریدل با ضریب رگرسیونی 92 درصد بالاترین همبستگی را با نتایج لایسیمتر گیاه چمن داشته‌اند. نوروزی (1385) با استفاده از یک لایسیمتر زهکش‌دار میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) را در بوشهر به دست آورده و با استفاده از آمار هواشناسی. تبخیر- تعرق را از معادلات تجربی برآورد کرد. بر اساس نتایج این تحقیق، روش هارگریوز مناسبترین روش برای منطقه بوده و بعد از آن روش‌های پنمن- مانتیث. بلانی- کریدل و در نهایت تشت تبخیر توصیه شده‌اند. رحیمی‌خوب (1387) میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع را در همدان با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار تخمین زد. این محقق گزارش کرد که از بین 14 روش مورد مطالعه، روش‌های بلانی- کریدل، تورک و تشت تبخیر به ترتیب دارای بیشترین همبستگی با نتایج لایسیمتر بوده‌اند. میلانی عنابی (1385) مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) را با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار و روش‌های محاسباتی در تبریز برآورد نمود. نتایج نشان‌دهنده آن بود که مقادیر به دست آمده از تشت تبخیر بیشترین همبستگی را با نتایج لایسیمتر داشت. این محقق گزارش کرد که روش‌های بلانی- کریدل اصلاح شده، پنمن- مانتیث، پنمن اصلاح شده و هارگریوز در مراتب بعدی قرار داشتند. مصطفوی (1379) با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع را در یزد برآورد نمود. این محقق روش‌های هارگریوز- سامانی، جنس هیز، پنمن- مانتیث، بلانی- کریدل و تشت تبخیر را مورد مقایسه قرار داد و نتیجه گرفت که روش پنمن- مانتیث بیشترین دقت را در ماه‌های فروردین تا مهر داشت. نیشابوری و همکاران (1384) با ارزیابی روش‌های پیشنهادی FAO برای برآورد میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه کرکج تبریز، روش پنمن- مانتیث را با توجه به مقادیر حداقل خطا به عنوان بهترین روش در این منطقه توصیه کردند. شاهدی و زارعی (1389) در مطالعه‌ای به مقایسه میزان دقت روش‌های بلانی- کریدل، تورنت وایت، پنمن و هارگریوز- سامانی در تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در استان مازندران پرداختند. نتایج این محققان نشان داد که روش بلانی- کریدل در بین روش‌های مورد مطالعه بیشترین دقت را داشت. گرچه کلیه این تحقیقات نتایج ارزشمندی ارائه می‌دهند؛ لیکن اکثر آن‌ها در بازه یک ساله انجام شده‌اند.
شهرستان قزوین یکی از مراکز مهم تولید محصولات کشاورزی با نیاز آبی بالا در کشور محسوب می‌شود که در سال‌های اخیر نیز با کمبود آب مواجه است. همچنین، عدم تخمین مناسب نیاز آبی گیاهان زراعی سبب هدر رفتن بخش قابل توجهی از آب آبیاری می‌شود. از طرفی تاکنون مطالعه‌ای در خصوص ارائه مناسبترین روش تعیین تبخیر-تعرق در این شهرستان در بازه طولانی مدت انجام نشده است. بنابراین، تحقیق حاضر برای دستیابی به این هدف انجام شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت محل آزمایش

این آزمایش در ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل‌آباد قزوین در عرض جغرافیایی 50 درجه، طول جغرافیایی 36 درجه و ارتفاع 1278 متر از سطح دریا به مدت 3 سال زراعی اجرا گردید. پیش از اجرای آزمایش، خاک ناحیه مورد مطالعه در عمق‌های مختلف از لحاظ فیزیکی و شیمیایی مورد تجزیه قرار گرفت. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، ظرفیت زراعی (FC) خاک محل آزمایش به طور متوسط معادل 24/1 درصد رطوبت وزنی، نقطه پژمردگی دائم (PWP) به طور متوسط معادل 12/41 درصد وزنی و متوسط وزن مخصوص ظاهری خاک معادل 1/68 گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. همچنین، بافت خاک این ناحیه در عمق 25 تا 75 سانتی‌متر در دسته لومی، در عمق 75 تا 115 سانتی‌متر در دسته سیلتی- لومی و در عمق 125 سانتی‌متری در دسته لومی بود.

تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از لایسیمتر

در این تحقیق تصمیم‌گیری در مورد محل نصب لایسیمتر بر حسب درجه یکنواختی زمین و موقعیت مکانی مزرعه صورت گرفت. بدین ترتیب 5 عدد لایسیمتر به فاصله 50 متری از یکدیگر نصب گردید. لایسیمترهای مورد استفاده در این طرح از نوع زهکش‌دار بوده و هریک از این لایسیمترها با ابعاد 1×2 متر و با عمق 1/5 متر در وسط قطعه زمینی به ابعاد 50 ×50 متر (2500 متر مربع) نصب گردیدند. برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) با استفاده از لایسیمتر از رابطه (1) (رابطه تعادلی آب) استفاده شد. در این آزمایش جهت حفظ رطوبت ناحیه توسعه ریشه چمن (لایه 0 تا 25 سانتی‌متری سطح خاک) در حد ظرفیت زراعی، دوره‌های آبیاری یک و دو روز در نظر گرفته شد. بنابراین، پارامترهای رابطه (1) بر اساس دوره یک روز، دو روز و یک هفته‌ای و مقادیر تبخیر- تعرق گیاه بر اساس دوره‌های یک هفته‌ای محاسبه گردید.

$$ET_C = I + P - D \pm \sum_{i=1}^{n} (Pw_1 - Pw_1) \quad (1)$$

که در آن، ETc تبخیر- تعرق واقعی گیاه در دوره اندازه‌گیري بر حسب میلی‌متر، I آب آبیاری در دوره اندازه‌گیري بر حسب میلی‌متر، P میزان بارش در دوره اندازه‌گیري بر حسب میلی‌متر، D آب زهکش در دوره اندازه‌گیري بر حسب میلی‌متر، Pw_1 رطوبت خاک زمان گذشته دوره اندازه‌گیري بر حسب میلی‌متر (رطوبت خاک قبل از آبیاری) و Pw_2 رطوبت خاک زمان حال دوره اندازه‌گیري بر حسب میلی‌متر (رطوبت خاک بعد از آبیاری) می‌باشد. در این آزمایش به دلیل عدم دسترسی به نوترون‌متر از محاسبه پارامترهای Pw صرف نظر گردید.

تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش‌های محاسباتی

هارگریوز- سامانی[1]

هارگریوز- سامانی در سال 1982 معادله‌ای را مطابق رابطه (2) ارائه دادند که در آن با استفاده از متوسط دمای هوا و همچنین اختلاف

[1] Hargreaves-Samani

حداکثر و حداقل درجه حرارت، مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع برای چمن محاسبه می‌گردد (احمدی و همکاران، 1395):

$$ET_o = 0.0023\, R_a (T_{mean} + 17.8) TD^{0.5} \quad (2)$$

در این معادله ETo تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن (mm/day). Tmean میانگین درجه حرارت روزانه (°c). TD اختلاف درجه حرارت حداکثر و حداقل روزانه (°c) و Rn تشعشعات خالص خورشیدی (mm/day) می‌باشد. در محاسبه پارامترهای TD و Rn نیز به ترتیب از روابط (3) و (4) استفاده می‌گردد.

$$TD = T_{max} - T_{min} \quad (3)$$

$$R_n = 0.77 * R_s - 2.45 * 10^{-9} * f * (0.0261 * EXP(-7.771 * 10^{-4} * T^2 - 0.02) * (Tmax_m^4 - Tmin_m^4 \quad (4)$$

روش بلانی- کریدل[1]

یکی از قدیم‌ترین روش‌های تخمین تبخیر- تعرق پتانسیل روش بلانی- کریدل است که بعداً فرمول پیشنهادی آن‌ها توسط پروت[2] از اساتید سابق دانشگاه کالیفرنیا مورد واسنجی قرار گرفت و برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن به صورت رابطه (5) ارائه شد (علیزاده، 1394).

$$ET_O = a + b[P(0.46T + 8.13)] \quad (5)$$

که در آن ETo تبخیر-تعرق گیاه مرجع (چمن) بر حسب میلی‌متر در روز. p ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که به صورت روزانه توصیف شده است (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در 100). T متوسط ماهانه درجه حرارات (°C) و a و b ضرایب اقلیمی می‌باشند. مقادیر a و b را می‌توان از معادله‌های (6) و (7) بدست آورد.

$$a = 0.0043(RH_{min}) - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (6)$$

$$b = 0.82 - 0.0041(RH_{min}) + 1.07\left(\frac{n}{N}\right) + 0.066(U_{day}) - 0.006(RH_{min})\frac{n}{N} - 0.0006(RH_{min})(U_{day}) \quad (7)$$

در این فرمول‌ها n تعداد ساعات واقعی آفتاب، N حداکثر ساعات ممکن تابش آفتاب، RHmin حداقل رطوبت نسبی (درصد) و Uday سرعت باد در طول روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر در ثانیه) است (علیزاده، 1394).

روش مک کینک[3]

[1] Blany-Criddle
[2] Pruitt
[3] Makkink

در سال 1957 مک کینک معادله (8) را جهت محاسبه و تخمین تبخیر-تعرق برای چمن در دوره‌های 10 روزه به دست آورد.

$$ET_O = 0.61\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)\frac{R_S}{58.5} - 0.12 \quad (8)$$

در این معادله ETp تبخیر- تعرق پتانسیل (mm/day). Rs تشعشع خورشیدی (موج کوتاه) رسیده به زمین (cal/cm2/d). Δ شیب منحنی فشار بخار (kpa یا mbar) و γ ثابت سایکرومتر (kpa یا mbar) که مقدار این ضریب از 0/61 تا 0/9 قابل تغییر می‌باشد. همچنین در این رابطه اگر Rs بر حسب میلی‌متر آب تبخیر شده بیان گردد عدد 58/5 در فرمول فوق به 1 تبدیل می‌گردد (شهابی‌فر و همکاران، 1389).

روش تورک[1]

تورک در سال 1961 معادله (9) را برای محاسبه و تخمین تبخیر- تعرق روزانه پیشنهاد کرد.

$$ET_O = a_T \times 0.013\frac{T_{mean}}{T_{mean}+15}\frac{23.8856\times R_S + 50}{\lambda} \quad (9)$$

که در آن ETo تبخیر- تعرق روزانه ($mm.d^{-1}$)، Tmean دمای متوسط روزانه بر حسب درجه سانتی‌گراد، aT برابر 1 برای RH>50% و aT=1+(50-RHmean)/70 برای RH<50%، Rs تشعشع خورشیدی ($Mj.M^{-2}.d^{-1}$) و λ گرمای نهان تبخیر ($Mj.kg^{-1}$) می‌باشد (شهابی‌فر و همکاران، 1389).

روش فائو-پنمن- مانتیث[2]

به منظور برآورد مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع به روش فائو پنمن-مانتیث از رابطه (10) استفاده می‌شود.

$$ET_O = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\left[\frac{890}{T+273}\right]U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (10)$$

که در آن ETo تبخیر تعرق گیاه مرجع (mm/day)، Rn تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($Mj.M^{-2}.d^{-1}$)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع 2 متری از سطح زمین (°c)، U2 سرعت باد در ارتفاع 2 متری از سطح زمین (ms-1)، ea-ed کمبود فشار بخار در ارتفاع 2 متری (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار (KPa°c-1)، γ ضریب رطوبتی (KPa°c-1) و G شار گرما به داخل خاک ($Mj.M^{-2}.d^{-}$[1]) می‌باشد (موسوی بایگی و همکاران، 1388).

روش پریستلی- تیلور[3]

پریستلی و تیلور در سال 1972 معادله ساده شده‌ای از روش ترکیبی را برای تعیین تبخیر پتانسیل ارائه دادند. در این فرمول قسمت

[1] Turc
[2] FAO-Penman-Monteith
[3] Priestly- Taylor

آئرودینامیک معادله حذف و قسمت مربوط به انرژی در یک ضریب ثابت (α=1/26) ضرب شده است. این رابطه در معادله (11) نمایش داده شده است.

$$\lambda E_p = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G) \quad (11)$$

در این معادله Δ شیب منحنی فشار بخار (KPa°c-1)، γ ضریب رطوبتی (KPa°c-1)، Rn تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($Mj.M^{-2}.d^{-1}$) و G شار گرما به داخل خاک ($Mj.M^{-2}.d^{-1}$) می‌باشد (شهابی‌فر و همکاران، 1389).

روش پنمن- فائو[1]

برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل به روش پنمن فائو از معادله (12) استفاده می‌شود.

$$ET_r = c\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}R_n + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta}0.27(1.0 + 0.01U_2)(e_a - e_d)\right] \quad (12)$$

در این معادله Δ شیب منحنی فشار بخار آب (mb/°c)، γ ضریب سایکرومتری (mb/°c)، Rn تابش خالص (mm/d)، U_2 سرعت باد در ارتفاع 2 متری (m/s)، Δe=ea-ed کمبود فشار بخار اشباع (mbar) و c ضریب اصلاحی که خود تابعی از عوامل هواشناسی است (ضریب FAO) می‌باشد. در سال 1988 کوئینکا و جنسن[2] ضریب اصلاحی C را به صورت معادله (13) تعریف کردند.

$$c = 0.68 + 0.0028(RH_{max}) + 0.018R_S - 0.068(U_{2day}) + 0.013\left(\frac{U_{day}}{U_{night}}\right) + 0.0097(U_{2day})\left(\frac{U_{day}}{U_{night}}\right) + 0.43 \times 10^{-4}(RH_{max})(R_S)(U_{2day}) \quad (13)$$

که در آن RHmax رطوبت نسبی ماکزیمم (%)، Rs تابش خورشیدی (mm/day)، U2day سرعت باد در طول روز و در ارتفاع دو متری از سطح زمین (m/sec)، Rs تابش خورشیدی (mm/day)، Uday متوسط سرعت باد در روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین (m/sec) و Uday/Unight نسبت سرعت باد در روز به سرعت باد در شب می‌باشد (علیزاده، 1388).

روش تشت تبخیر[3]

یکی از راه‌های محاسبه تبخیر-تعرق استفاده از تشت تبخیر است. این روش از طرف فائو به عنوان یک روش ساده و مناسب جهت برآورد تبخیر-تعرق ارائه شده است. میزان تبخیر از تشت از اختلاف عمق آب در تشت در طی آن دوره بدست می‌آید. میزان تبخیر از تشت را می‌توان با ضریبی به تبخیر- تعرق گیاه مرجع مرتبط نمود. در صورتی که مقدار تبخیر از تشت در یک دوره زمانی مشخص (ماه یا روز) برابر Ep باشد. تبخیر- تعرق مرجع (ETo) در همان دوره از رابطه (14) بدست می‌آید.

[1] FAO-Penman
[2] Cuenca and Jensen
[3] Pan Class A

$$ET_O = K_P(E_P) \quad (14)$$

که در آن ETo تبخیر- تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر)، Kp ضریب تشت و Ep میزان تبخیر از تشت (میلی‌متر) می‌باشد.

پریرا و همکاران (1995) معادله (15) را برای تعیین ضریب تشت بیان کردند.

$$K_P = \frac{0.85(s+\gamma)}{\left[s+\gamma\left(1+\frac{r_c}{r_a}\right)\right]} \quad (15)$$

در این معادله s شیب منحنی تغییرات فشار بخار آب نسبت به دما در نقطه‌ای که دما برابر میانگین دمای هوا روزانه باشد. γ ضریب سایکرومتری. rc مقاومت پوشش گیاهی در مقابل انتقال بخار آب به اتمسفر و ra مقاومت آیرودینامیک لایه هوای مجاور پوشش گیاهی می‌باشد. همچنین. مقاومت آیرودینامیک (ra) بستگی به سرعت باد و ارتفاع پوشش گیاهی دارد که توسط آلن و همکاران (1989) به صورت رابطه (16) پیشنهاد شده است (عابدی کوپایی و همکاران، 1387).

$$\frac{r_c}{r_a} = 0.34U \quad (16)$$

ارزیابی مدل‌ها

به منظور بررسی دقت روش‌های مختلف مورد مطالعه و تعیین مناسبترین روش در تخمین تبخیر- تعرق پتانسیل دشت قزوین، مقادیر به دست آمده به وسیله لایسیمتر به عنوان داده‌های مرجع در نظر گرفته شده و میزان ضریب همبستگی (رابطه 17) و خطای استاندارد (رابطه 18) هریک از این روش‌ها نسبت به روش مرجع در محیط نرم‌افزار Excel محاسبه گردید.

$$R^2 = \frac{(\sum(E_i-\bar{E})(O_i-\bar{O}))^2}{\sum(E_i-\bar{E}))^2\sum(EO_i-\bar{O}))^2} \quad (17)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-E_i)^2}{n-1}} \quad (18)$$

که در آن، R^2 ضریب تبیین، SEE خطای استاندارد برآورد، Oi تبخیر- تعرق حاصل از داده‌های لایسیمتری، Ei تبخیر- تعرق تخمین زده شده توسط روش‌های محاسباتی، $\bar{O}$ متوسط تبخیر-تعرق مرجع لایسی‌متری، $\bar{E}$ متوسط تبخیر-تعرق روش محاسباتی و n تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج مقایسه روش‌های مختلف تعیین تبخیر-تعرق با داده‌های لایسی‌متری در جدول (1) نشان داده شده است. براساس این نتایج، کلیه روش‌های مورد مطالعه ضریب تبیین بالایی داشتند به طوری که کمترین مقدار R^2 به روش پریستلی-تیلور با مقدار 0/869 اختصاص داشت. روش تشت تبخیر بیشترین مقدار ضریب تبیین را نسبت به سایر

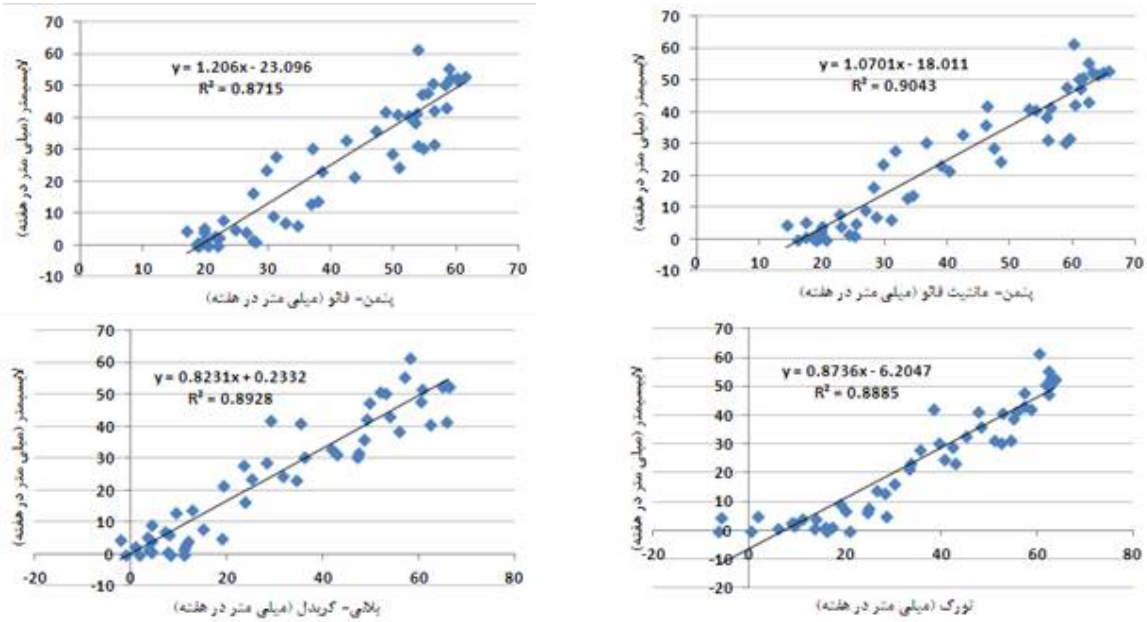
روش‌ها داشت. روش‌های پنمن-مانتیث فائو، هارگریوز-سامانی و بلانی-کریدل ضریب تبیین بالاتری نسبت به سایر روش‌ها داشتند. براساس این آماره، کلیه روش‌های مورد استفاده رفتار نسبتاً همسانی با تغییرات نیاز آبی داشتند. لیکن این معیار نمی تواند به تنهایی برای تعیین معادلات تجربی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به وجود گیاهان زراعی با نیاز آبی بالا در دشت قزوین، توجه به کاهش خطا در تعیین نیاز آبی بسیار اهمیت دارد. به همین دلیل از معیار SSE جهت انتخاب معادلات مناسب استفاده شد. براساس آماره SSE، روش‌های تشت تبخیر و بلانی کریدل دقت مناسبتری نسبت به سایر روش‌ها داشتند. دقت این دو روش نسبت به سایر روش‌ها بسیار کمتر بود به طوری که دقت روش تشت تبخیر نسبت به پنمن-مانتیث فائو و هارگریوز-سامانی به ترتیب 4/35 و 6/0 برابر بهتر بود. براساس نیاز آبی گیاهان زراعی در دشت قروین، وجود هر واحد خطای SSE سبب ایجاد ده متر مکعب اتلاف آب یا تنش آبی بر گیاهان زراعی می‌شود. دقت روش بلانی-کریدل نیز نسبت به پنمن-مانتیث فائو و هارگریوز-سامانی به ترتیب 1/81 و 2/51 برابر بهتر بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، گرچه روش بلانی-کریدل ضریب تبیین کمتری نسبت به این دو روش داشت؛ لیکن به دلیل دقت بالاتر به عنوان روش بهتری تلقی می‌شود. این نتایج با مشاهدات توشیح (1387) مطابقت داشت. این محقق ضریب تبیین برای روش‌های تشت تبخیر و بلانی-کریدل را به ترتیب برابر با 94 و 92 درصد گزارش کرد که نسبت به مقادیر به دست آمده در این تحقیق تفاوت اندکی دارد. محققان دیگر از جمله نوروزی (1385)، رحیمی خوب (1387)، میلانی عنابی (1385) و شاهدی و زارعی (1389) نیز نتایج مشابهی در تحقیقات خود گزارش کردند.

جدول 1- نتایج خطای استاندارد و ضریب همبستگی در روش‌های مختلف نسبت به روش لایسیمتر

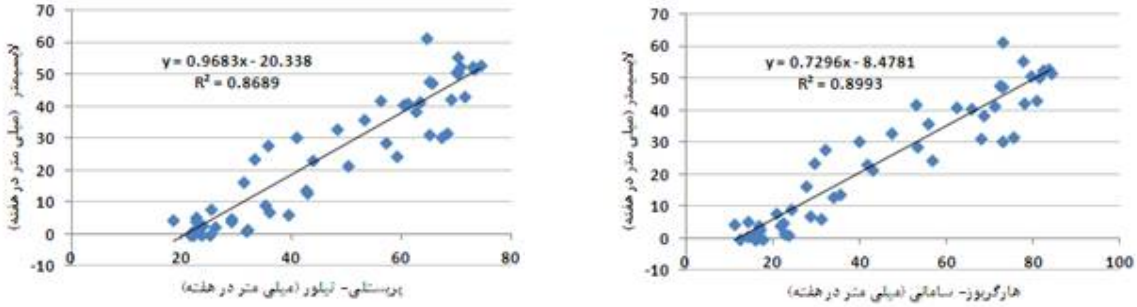
معادله	R^2	SEE	معادله	R^2	SEE
تشت تبخیر	0/973	3/81	مک کینک	0/891	11/34
پنمن-مانتیث-فائو	0/904	16/58	تورک	0/889	12/91
هارگریوز-سامانی	0/899	22/93	پنمن-فائو	0/872	16/97
بلانی-کریدل	0/893	9/13	پریستلی-تیلور	0/869	23/16

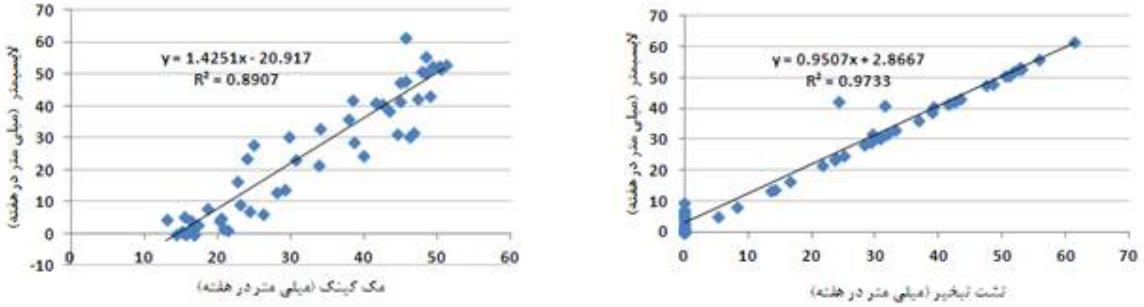
با توجه به شکل‌های (1) و (2)، میزان پراکندگی و رابطه خطی بین مقادیر برداشت شده از لایسی‌متر و روش‌های تشت تبخیر و بلانی-کریدل مشاهده می‌شود. با توجه به عرض از مبدا هر دو نمودار، دو روش مذکور دارای خطای بیش‌برآوردی هستند. با توجه به شیب خطوط، در مقادیر بالاتر این روش‌ها دچار خطای کم‌برآوردی می‌شوند. بنابراین در مراحل ابتدای رشد که نیاز آبی گیاهان کم است؛ استفاده از این دو روش سبب اتلاف آب می‌شود. در مراحل میانی و انتهای رشد که نیاز آبی گیاهان زراعی بیشتر می‌شود؛ استفاده از دو روش مذکور سبب ایجاد تنش به گیاهان زراعی می‌گردد. بنابراین نیاز است در زمان

استفاده از روش‌های تشت تبخیر و بلانی-کریدل مقادیر بیشتری آب نسبت به مقادیر برآورد شده با این دو روش برای آبیاری در نظر گرفته شود. با توجه به جدول (1)، بیشترین خطا به روش‌های پریستلی-تیلور و هارگریوز-سامانی اختصاص داشت. با توجه به شکل (2)، هر دو روش دارای خطای کم‌برآوردی بودند. بنابراین استفاده از این دو روش در کلیه مراحل رشد سبب ایجاد تنش به گیاهان زراعی می‌شود. روش پنمن-مانتیث فائو به عنوان روش پذیرفته شده سازمان خوار و بار کشاورزی، دارای خطای کم‌برآوردی بود لیکن در مقادیر بالاتر این خطا به صورت بیش‌برآوردی ظاهر می‌شود. با توجه به مقدار SSE این رابطه (جدول 1)، استفاده از این روش در مراحل میانی و انتهایی رشد سبب اتلاف بسیار زیاد آب می‌شود.



شکل 1- مقایسه داده‌های لایسیمتری با معادلات پنمن- فائو، پنمن- مانتیث فائو، بلانی- کریدل و تورک





شکل 2- مقایسه داده‌های لایسیمتری با معادلات پریستلی- تیلور، هارگریوز- سامانی، مک کینک و تشت تبخیر

تعداد پارامترهای مورد نیاز برای هر روش در جدول (2) نشان داده شده است. براساس این پارامتر، روش تشت تبخیر کمترین تعداد داده ورودی را داشت. پس از آن، روش های هارگریوز- سامانی، مککینگ و پریستلی-تیلور به ترتیب در رده های بعدی قرار گرفتند. با در نظر گرفتن دو آماره R^2 و SSE و تعداد پارامتر مورد نیاز، می‌توان روش تشت تبخیر را به عنوان مناسبترین روش در این دشت پیشنهاد کرد. روش بلانی-کریدل گرچه دقت مناسبی داشت؛ لیکن به تعداد پارامتر قابل توجهی نیاز دارد که عمدتاً نیز در دسترس کشاورزان و محققان نیستند. علی‌رغم آن، روش هارگریوز- سامانی با وجود دقت پایین، ضریب تبیین مناسبی داشت و برای محاسبه به تعداد پارامتر های بسیار کمی نیاز دارد. روش مککینگ تنها به چهار داده ورودی نیاز دارد و دقت آن نسبت به روش هارگریوز- سامانی بهتر بود. از طرف دیگر، اختلاف ضریب تبیین این دو روش بسیار اندک بود. بنابراین می‌توان از این روش به عنوان روشی مناسب بعد از روش تشت تبخیر استفاده کرد.

جدول 2- تعداد پارامترهای مورد نیاز روشهای مورد مطالعه

نام معادله	تعداد پارامترها	معادله
فائو- پنمن- مانتیث	9	Rn تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($Mj.M^{-2}.d^{-1}$)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع 2 متری از سطح زمین (°c)، U2 سرعت باد در ارتفاع 2 متری از سطح زمین (ms-1)، ea-ed کمبود فشار بخار در ارتفاع 2 متری (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار (KPa°c-1)، γ ضریب رطوبتی (KPa°c-1) و G شار گرما به داخل خاک ($Mj.M^{-2}.d^{-1}$)
بلانی- کریدل	7	p ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که به صورت روزانه توصیف شده است (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در 100). T متوسط ماهانه درجه حرارات (°C)، n تعداد ساعات واقعی آفتاب، N حداکثر ساعات ممکن تابش آفتاب، RHmin حداقل رطوبت نسبی (درصد) و Uday سرعت باد در طول روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر در ثانیه)
هارگریوز	3	Tmean میانگین درجه حرارت روزانه (°c)، TD اختلاف درجه حرارت حداکثر و حداقل روزانه (°c) و Rn تشعشعات خالص خورشیدی (mm/day)
تورک	6	Tmean دمای متوسط روزانه بر حسب درجه سانتی‌گراد، aT

		برابر 1 برای RH>50% و aT=1+(50-RHmean)/70 برای RH<50%، Rs تشعشع خورشیدی ($Mj.M^{-2}.d^{-1}$) و λ گرمای نهان تبخیر ($Mj.kg^{-1}$) [1]
پریستلی-تیلور	5	Δ شیب منحنی فشار بخار (KPa°c-1)، γ ضریب رطوبتی (KPa°c-1)، Rn تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($Mj.M^{-2}.d^{-1}$) و G شار گرما به داخل خاک ($Mj.M^{-2}.d^{-1}$)
تورنت وایت	5	Δ شیب منحنی فشار بخار آب (mb/°c)، γ ضریب سایکرومتری (mb/°c)، Rn تابش خالص (mm/d)، U_2 سرعت باد در ارتفاع 2 متری (m/s)، Δe=ea-ed کمبود فشار بخار اشباع (mbar)، RHmax رطوبت نسبی ماکزیمم (%)، Rs تابش خورشیدی (mm/day)، U2day سرعت باد در طول روز و در ارتفاع دو متری از سطح زمین (m/sec)، Rs تابش خورشیدی (mm/day)، Uday متوسط سرعت باد در روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین (m/sec) و Uday/Unight نسبت سرعت باد در روز به سرعت باد در شب
ماکینک	4	Rs تشعشع خورشیدی (موج کوتاه) رسیده به زمین (cal/cm2/d). Δ شیب منحنی فشار بخار (kpa یا mbar) و γ ثابت سایکرومتر (kpa یا mbar) که مقدار این ضریب از 0/61 تا 0/9 قابل تغییر می‌باشد.
تشت تبخیر کلاس A	2	Kp ضریب تشت و Ep میزان تبخیر از تشت (میلی‌متر)

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری تبخیر-تعرق برای استفاده در طرح‌های آبیاری امری ضروری است که مقدار آن به طور دقیق از طریق لایسیمترها تعیین می‌شود. لیکن مشکلات نصب و هزینه نسبتاً زیاد آن‌ها مانع از کاربرد عمومی آن‌ها می‌گردد. لذا این روش بیشتر در کارهای تحقیقاتی و یا واسنجی دیگر روش‌های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شوند. به همین دلیل در این مطالعه دقت روش‌های هارگریوز-سامانی، بلانی- کریدل، تورک، پنمن- مانتیث فائو، مک کینک، بریستلی- تیلور، پنمن- فائو و تشت تبخیر در شرایط اقلیمی دشت قزوین مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش تشت تبخیر بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطا را نسبت به داده‌های لایسیمتری داشت. این روش تنها به دو داده ورودی نیاز دارد که به صورت ساده قابل اندازه‌گیری هستند. پس از آن، روش بلانی کریدل به دلیل تعداد داده کم، ضریب تبیین نسبتاً مناسب و خطای قابل قبول پیشنهاد می‌شود. بنابراین از این روش‌ها می‌توان برای اندازه‌گیری نیاز آبی محصولات کشاورزی در دشت قزوین در هر مرحله از رشد استفاده کرد تا هم از اتلاف آب و هم از ایجاد تنش بر گیاهان زراعی جلوگیری شود.

منابع

1- احمدی، محسن، خاشعی سیوکی، عباس و محمد حسن سیاری، (1395)، بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (*Crocus sativus* L.) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی، شماره 8(4).

2- توشیح، وفا، (1378)، گزارش نهایی تعیین آب مصرفی پتانسیل گیاه مرجع (چمن) و مقایسه آن با فرمول‌های تجربی، مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب.

3- رحیمی خوب، علی، (1378)، گزارش نهایی تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) و مقایسه آن با فرمول‌های تجربی و تعیین مناسبترین فرمول برای منطقه همدان، مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب،
4- شاهدی، کاکا و مهدی زارعی، (1389)، ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل در استان مازندران، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، شماره 1(3)، صص 12-21.
5- شریفان، حسین، و امین علیزاده، (1388)، ارزیابی روش‌های دمایی و تشعشعی در برآورد حداکثر تبخیر- تعرق با احتمالات مختلف (مطالعه موردی: منطقه گرگان)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره 23(3)، صص 1-9.
6- شهابی‌فر، مهدی، عصاری، مصطفی، کوچک، زاده مهدی، و سید مجید میر لطیفی، (1389)، ارزیابی برخی از روش‌های محاسباتی تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن با استفاده از داده‌های لایسیمتری در شرایط گلخانه‌ای، مجله پژوهش آب در کشاورزی، شماره 24(1)، صص 13-20.
7- عابدی کوپایی، جهانگیر، اسلامیان، سید سعید، و محمد جواد امیری، (1387)، مقایسه چهار روش تخمین تبخیر-تعرق سطح مرجع با داده‌های میکرولایسیمتری در منطقه اصفهان، دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، 8 الی 10 بهمن، اهواز، ایران.
8- علیزاده، امین، (1388)، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا، مشهد.
9- علیزاده، امین، (1394)، اصول طراحی سیستم‌های آبیاری، انتشارات دانشگاه امام رضا، مشهد.
10- مصطفوی، محمد حسین، آذرفر، سهراب و عباسعلی واحدیان، (1379)، گزارش نهایی تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل (ETo) با استفاده از لایسیمتر چمن، مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
11- موسوی بایگی، سید محمد، عرفانیان، مریم، و مجید سرمد، (1388)، استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع و ارائه ضرایب اصلاحی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره 23(1)، صص 91-99.
12- میلانی عنابی، اژدر، (1385)، گزارش نهایی ارزیابی روش‌های مستقیم و غیر مستقیم برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) در تبریز، مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب،
13- نوروزی، مهرداد، (1385)، گزارش نهایی تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) و گوجه فرنگی با استفاده از مطالعات لایسیمتری در استان بوشهر، مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی ایران، ناشر مؤسسه تحقیقات خاک و آب،
14- نیشابوری، محمد رضا، مرادی دالینی، ابوالفتح، جعفرزاده، علی اصغر و سیروس صادقی، (1384)، ارزیابی روش‌های پیشنهادی FAO برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در منطقه کرکج تبریز، مجله دانش کشاورزی، شماره 15(4)، صص 63-72.
15- Amatya, D. M., Skaggs, R,W, and Gregory J, D, (1995), Comparison of methods for estimating ref ET, Journal of irrigation and drainage engineering, 121(3), pp. 427-432.
16- Allen R,G, (1996), Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation, Journal of irrigation and drainage engineering, 122(2), pp. 97-106.
17- Allen R. G,, Pereira L.S., Raes, D., and Shmith, M, (1998), Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper, No 56.

18- Ismail S. M, (1993), Reference evapotranspiration study in Al- Qassim region, Journal of King Saud University, Agricultural sciences, 5(2), pp. 141-151.
19- Nwadialo B. E, (1991), the estimation of reference crop evapotranspiration with minimum data in tropical climate, CAB Abstract 1995.
20- Santos A, O., Bergasmaschi H., and Cunha G, (1994), Evaluation of method for estimation of maximum evapotranspiration in lucene, CAB Abstract 1996-1997.

Assessment of Different Methods to Estimate Reference Evapotranspiration in Qazvin Plain

Abstract

Determining reference evapotranspiration is considered as a key factor for estimating crop water requirement and managing irrigation plans. Different methods have been presented to estimate this parameter. The accuracy of those methods varies based on meteorological data and climate conditions. So, it is necessary to evaluate different methods and determine appropriate method for estimating reference evapotranspiration in each region. In this study, reference evapotranspiration values were measured using lysimeter data collected from Ismail Abad research station located in Qazvin province, Iran, during a 4-years period. In order to compare different methods, lysimeter values was considered as reference method. So as to find the best evaporation method, Hargreaves-Samani, Blany-Criddle, Turc, FAO-Penman-Monteith, Makkink, Priestly- Taylor, FAO-Penman and Evaporation Pan were used. Evaporation Pan was the most appropriate method to estimate reference evapotranspiration based on the highest correlation coefficient (0.973) and the lowest standard error (3.81). In addition, Priestly- Taylor had the lowest accuracy based on with the lowest correlation coefficient (0.896) and the highest standard error (23.16). FAO-Penman-Monteith and Hargreaves-Samani ranked 2nd and 3rd among other methods because of high correlation coefficients and low standard error.

Key words: Drainage Lysimeter, FAO- Penman- Monteith, Potential Evapotranspiration