نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۶، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۱، ص. ۲۵۰-۲۳۶

Journal of Water and Soil
Vol. 26, No. 1, Mar-Apr 2012, p. 236-250

ارزیابی و واسنجی روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در شرایط محدودیت داده‌های اقلیمی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)

هادی دهقان[1*]- امین علیزاده[2]

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۸
تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۱۲

چکیده

تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_o)، یکی از پارامترهای کلیدی در مطالعات هیدرولوژی، منابع آب و همچنین مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تخمین ET_o وجود دارد؛ اما عملکرد این معادلات در شرایط اقلیمی مختلف، متفاوت می‌باشد. بیش از یک دهه است که روش فائو- پنمن- مانتیث (FAO PM) به‌عنوان یک روش استاندارد جهانی برای تخمین ET_o توسعه داده شده است. در بعضی شرایط، استفاده از روش FAO PM به‌دلیل عدم وجود متغیرهای ورودی، دارای محدودیت می‌باشد. در این موارد، گزینه محاسبه تبخیر- تعرق با روش FAO PM با متغیرهای ورودی برآورد شده مطرح می‌باشد و توسط نشریه شماره ۵۶ فائو نیز توصیه شده است. بر این اساس، هدف از این تحقیق ارزیابی عملکرد روش FAO PM به منظور تخمین ET_o با داده‌های مفقود سرعت باد، تابش خالص و کمبود فشار بخار اشباع، در استان خراسان رضوی می‌باشد. روش‌های تجربی پریستلی- تایلور، هارگریوز و ترنت وایت نیز به‌دلیل نیاز به داده‌های ورودی کمتر، برای منطقه واسنجی شدند. داده‌های هواشناسی مورد نیاز ۱۰ ایستگاه سینوپتیک استان خراسان رضوی، برای مقایسه تبخیر- تعرق برآورد شده با روش FAO PM در شرایط داده‌های کامل و داده‌های مفقود، جمع‌آوری گردید. نتایج این مطالعه نشان داد وقتی که داده‌های تابش خالص و سرعت باد مفقود باشند، روش FAO PM گزینه خوبی برای برآورد تبخیر- تعرق در استان خراسان رضوی می‌باشد؛ به طوری که مقدار RMSE کمتر از ۰/۷۱ میلی‌متر در روز می‌باشد. همچنین روش پریستلی- تایلور، زمانی که داده‌های سرعت باد و کمبود فشار بخار مفقود می‌باشند، گزینه خوبی برای تخمین ET_o می‌باشد؛ خصوصاً وقتی که این روش به صورت محلی واسنجی گردید (RMSE= 0.56 mm/day). وقتی که تنها داده‌های درجه حرارت موجود باشد، روش‌های هارگریوز و ترنت وایت اصلاح شده گزینه مناسبی برای تخمین ET_o نسبت به روش FAO PM می‌باشند؛ به طوری که مقدار RMSE (به ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۶۳ میلی‌متر در روز) کمتر از روش FAO PM (RMSE= 0.88 mm/day) محاسبه گردید.

واژه‌های کلیدی: تبخیر- تعرق گیاه مرجع، پریستلی- تایلور، هارگریوز، ترنت وایت، داده‌های مفقود

مقدمه

تبخیر- تعرق (ET) به انتقال همزمان تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه به سطح اتمسفر در یک سیستم خاک- گیاه اطلاق می‌شود (۴). در مزارع کشاورزی، زمانی که گیاه کوچک می‌باشد، آب عمدتاً به صورت تبخیر از سطح خاک تلف می‌شود؛ اما پس از آنکه گیاه به خوبی توسعه می‌یابد و کانوپی گیاه به طور کامل خاک را پوشش می‌دهد، تعرق به عنوان فرآیند اصلی تلفات آب، جایگزین تبخیر می‌شود. ET_o همچنین پارامتر مهمی در مطالعات هیدرولوژی، منابع آب، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد. آلن و همکاران (۴) نشان دادند که مهمترین پارامترهای هواشناسی مؤثر بر تبخیر- تعرق، تابش خالص، درجه حرارت، کمبود فشار بخار و سرعت باد می‌باشند.

نوع محصول، واریته، مرحله توسعه و همچنین تراکم بوته، بر روی تبخیر- تعرق گیاه تأثیر می‌گذارند. به دلیل تفاوت‌ها در مقاومت گیاهان به تعرق مانند ارتفاع گیاه، زبری پوشش تاجی گیاه، انعکاس، پوشش زمین و ویژگی‌های ریشه گیاه، مقدار تبخیر- تعرق گیاهان حتی در سطوح مشترک مانند داده‌های هواشناسی و شرایط خاک نیز متفاوت می‌باشند. ET_o تقاضای تبخیری اتمسفر را جدا از نوع گیاه، مرحله رشد محصول و عملیات مدیریتی بیان می‌کند. هنگامی که آب

۱و۲- دانشجوی دکتری و استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: Dehghan63.ha@gmail.com)

Archive of SID
www.SID.ir

به اندازه کافی برای تبخیر- تعرق وجود داشته باشد، رطوبت خاک بر مقدار ET_o تأثیر نمی‌گذارد. تنها متغیرهای هواشناسی بر مقدار ET_o تأثیر می‌گذارند. در نتیجه ET_o یک پارامتر اقلیمی می‌باشد که با توجه به داده‌های هواشناسی قابل محاسبه می‌باشد (۱۳).

روش‌های متعددی برای تخمین ET_o وجود دارد؛ اما عملکردشان در شرایط اقلیمی مختلف تغییر می‌کند. اکثر این معادلات به صورت تجربی استخراج شده‌اند. آلن و همکاران (۴) روش ترکیبی FAO PM را به‌عنوان یک روش معتبر برای تخمین ET_o توصیه کردند (۱۷). روش FAO PM با توجه به اندازه‌گیری لایسیمتری تبخیر- تعرق چمن یا یونجه در نقاط مختلف دنیا مورد ارزیابی قرار گرفته و به عنوان روش استاندارد تخمین ET_o انتخاب گردیده است (۱۰ و ۱۸). این روش محاسبه تبخیر- تعرق، براساس هر دو جزء آیرودینامیک و توازن انرژی می‌باشد؛ با این حال در برخی موارد، استفاده از این روش با محدودیت داده‌های اقلیمی مواجه می‌باشد. براین اساس آلن و همکاران (۴) روشی را برای تخمین متغیرهای اقلیمی مفقود مانند تابش خالص، کمبود فشار بخار و سرعت باد، در نشریه شماره ۵۶ فائو پیشنهاد کردند. لازم است که در کشورها و اقلیم‌های مختلف، قابلیت انجام این روش مورد ارزیابی قرار گیرد. ارزیابی روش فائو- پنمن- مانتیث با داده‌های مفقود توسط استوکول و همکاران (۱۴) برای پنج محل در هلند، اسپانیا، فیلیپین، آمریکا و سوریه، پاپوا (۱۱) برای بلغارستان، جابلون و سالی (۹) در تونس و سنتوهز و همکاران (۱۳) در کانادا انجام شده است. در ایران نیز رحیمی خوب و همکاران (۱) دو روش پنمن- مانتیث با حداقل داده (دمای هوا و سرعت باد) و هارگریوز را در استان خوزستان مقایسه کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد روش پنمن- مانتیث با حداقل داده نسبت به روش هارگریوز عملکرد بهتری داشته است.

روش فائو- پنمن- مانتیث مقدار تبخیر- تعرق را در شرایطی که کلیه داده‌های اقلیمی کامل باشند، برآورد می‌نماید. این روش در مکان‌هایی که داده‌های هواشناسی مفقود باشند، دارای محدودیت می‌باشد (۹، ۱۰ و ۱۱). در استان خراسان رضوی تعداد کمی از ایستگاه‌ها (۱۰ ایستگاه) به طور کامل داده‌های هواشناسی را اندازه‌گیری و ثبت می‌کنند. بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون مطالعه جامعی در استان خراسان رضوی در زمینه ارزیابی روش‌های مختلف تخمین تبخیر- تعرق، در شرایطی که داده‌های سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خالص موجود نباشند، انجام نشده است. لذا هدف از مطالعه حاضر، بررسی عملکرد روش فائو- پنمن- مانتیث به منظور برآورد ET_o با داده‌های مفقود در استان خراسان رضوی و همچنین به کارگیری و واسنجی روش‌های جایگزین (هارگریوز، پریستلی- تایلور، ترنت وایت) برای تخمین این متغیر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق ابتدا شناسنامه اطلاعات آب و هوایی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان خراسان رضوی از سایت سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. تعداد کل ایستگاه‌های سینوپتیک استان ۱۲ ایستگاه می‌باشد، که با توجه به داده‌های موجود ۱۰ ایستگاه برای این مطالعه انتخاب گردید. از بین آمار موجود، اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه تبخیر- تعرق شامل درجه حرارت حداقل، درجه حرارت حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی در مقیاس ماهانه اخذ گردید. ماه‌هایی که اطلاعات ناقص بودند از تجزیه و تحلیل‌ها حذف گردیدند و حتی‌الامکان سال‌هایی انتخاب شدند که آمار به طور کامل ثبت شده بود. به عنوان مثال در ایستگاه سینوپتیک مشهد کل دوره آماری ۵۵ سال می‌باشد که به دلیل ناقص بودن آمار در برخی سالها تنها ۴۳ سال در محاسبات استفاده گردید. به دلیل شرایط غیرمرجع در ایستگاه‌های مورد مطالعه، داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر و دمای نقطه شبنم با استفاده از ضرایب تصحیح ماهانه ارائه شده توسط محمدیان و همکاران (۳) نسبت به شرایط مرجع اصلاح گردید. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در این تحقیق ارایه شده است. همچنین در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌ها بر روی نقشه نشان داده شده است.

روش‌های محاسبه ET_o

برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع از روش‌های زیر، به دلیل پذیرش گسترده در بسیاری از مناطق، استفاده شده است.

روش فائو- پنمن- مانتیث (FAO PM)

این روش، روش استاندارد و دقیق‌ترین روش محاسبه تبخیر- تعرق می‌باشد (۴). معادله این روش به‌صورت زیر می‌باشند:

$$ET_o = \frac{0.408\,\Delta(R_n - G) + \gamma\left[890/(T+273)\right]U_2(e_a - e_s)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\,U_2)} \quad (1)$$

که در آن ET_o تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJm^{-2}d^{-1}$)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (^oC)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms^{-1})، $e_a - e_s$ کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($kPa\ ^oC^{-1}$)، γ ضریب رطوبتی ($kPa\ ^oC^{-1}$) و G شار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2}d^{-1}$) می‌باشد. برای به‌دست آوردن اجزای معادله فائو- پنمن- مانتیث، مطابق دستورالعمل ارائه شده توسط آلن و همکاران (۴) عمل شد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در استان خراسان رضوی

ایستگاه	کد	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	دوره آماری (سال)	میانگین بارش (میلی‌متر)	نوع اقلیم
تربت جام	TJA	۳۵ ° ۱۵ '	۶۰ ° ۳۵ '	۹۵۰/۴	۹	۱۷۵/۶	خشک
تربت حیدریه	THE	۳۵ ° ۱۶ '	۵۹ ° ۱۳ '	۱۴۵۰/۸	۲۷	۲۷۳/۹	نیمه‌خشک
سبزوار	SAB	۳۶ ° ۱۲ '	۵۷ ° ۴۳ '	۹۷۷/۶	۲۹	۱۸۹/۶	خشک
سرخس	SAR	۳۶ ° ۳۲ '	۶۱ ° ۱۰ '	۲۳۵	۲۱	۱۸۸/۹	خشک
کاشمر	KAS	۳۵ ° ۱۲ '	۵۸ ° ۲۸ '	۱۱۰۹/۷	۱۷	۲۰۳/۹	خشک
گلمکان	GOL	۳۶ ° ۲۹ '	۵۹ ° ۱۷ '	۱۱۷۶	۱۳	۲۱۴/۵	خشک
گناباد	GON	۳۴ ° ۲۱ '	۵۸ ° ۴۱ '	۱۰۵۶	۱۳	۱۴۴/۴	خشک
مشهد	MAS	۳۶ ° ۱۶ '	۵۹ ° ۳۸ '	۹۹۹/۲	۴۳	۲۵۵/۲	نیمه‌خشک
نیشابور	NAY	۳۶ ° ۱۶ '	۵۸ ° ۴۸ '	۱۲۱۳	۱۲	۲۳۹/۸	خشک
قوچان	GHO	۳۷ ° ۴ '	۵۸ ° ۳۰ '	۱۲۸۷	۱۹	۳۱۳/۱	نیمه‌خشک

با این تفاوت که برای محاسبه تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین (R_s)، از ضرایب ارائه شده توسط خلیلی و رضایی صدر (۲) استفاده گردید؛ به عنوان مثال ضرایب مذکور برای منطقه مشهد به ترتیب ۰/۳ و ۰/۳۷ پیشنهاد شده است (۲).

روش پریستلی- تایلور (P-T)

این روش براساس روش پنمن، ساده‌سازی شده است و جزء آیرودینامیکی معادله پنمن با یک ضریب تجربی جایگزین می‌شود که به پارامتر پریستلی- تایلور معروف است (۱۲):

$$ET_o = 1.26\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(\frac{R_n - G}{\lambda}) \qquad (۲)$$

همه اجزای معادله بالا در قسمت قبلی توضیح داده شد. پارامتر پریستلی- تایلور (۱/۲۶) به عوامل مختلفی از جمله نوع پوشش گیاهی، شرایط رطوبتی خاک و پدیده ادوکتیو (انتقال افقی حرارت) بستگی دارد (۱۲ و ۱۵). در این مطالعه ضریب مذکور به‌طور محلی واسنجی گردید.

روش هارگریوز (HA)

این روش ET_o را با استفاده از داده‌های درجه حرارت حداقل و حداکثر تخمین می‌زند (۷) و به صورت زیر می‌باشد:

$$ET_o = C_0\, R_a^{'}\,(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}(T + 17.8) \qquad (۳)$$

در این معادله $Ra^{'}$ تابش فرازمینی بر حسب میلی‌متر در روز و C_0 ضریب تبدیل (۰/۰۰۲۳) می‌باشد که در این مطالعه این ضریب واسنجی شده است.

روش ترنت- وایت (TH)

اساس این روش داشتن دمای متوسط در هر ماه است که به صورت زیر عمل می‌شود (۱۶):

$$ET_p = 16(\frac{10T_{ave}}{I})^a \qquad (۴)$$

در این معادله I نمایه حرارتی و a با توجه به I به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I = 12(0.2Ta)^{1.514} \qquad (۵)$$

$$a = 0.4924 + 1.79\times10^{-2} I - 7.71\times10^{-5} I^2 + 6.75\times10^{-7} I^3 \qquad (۶)$$

$$ET_o = \frac{ET_p}{30}\frac{N}{12} \qquad (۷)$$

در این معادلات Ta درجه حرارت نرمال سالانه، ET_p تبخیر- تعرق پتانسیل ماهانه و ET_o تبخیر- تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز) می‌باشد. در این مطالعه به جای درجه حرارت متوسط ماهانه از درجه حرارت مؤثر، که توسط کامارگو (۵) پیشنهاد شده، استفاده گردید:

$$Tef = \beta(3T_{\max} - T_{\min}) \qquad (۸)$$

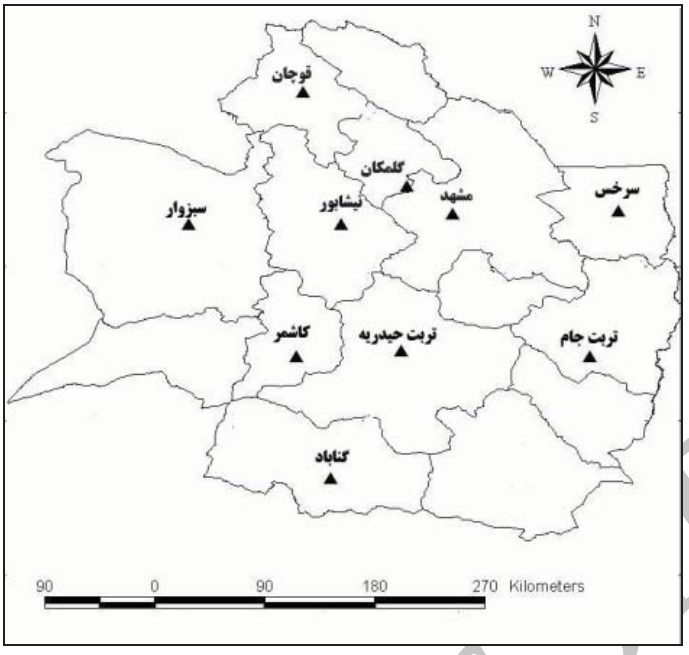
β پارامتر کامارگو می‌باشد (۰/۳۶) که در این مطالعه این ضریب نیز واسنجی شده است.

روش‌های جایگزین برای تخمین داده‌های اقلیمی

استفاده از معادله فائو- پنمن- مانتیث، زمانی که همه داده‌های هواشناسی به طور کامل باشند، امکان‌پذیر می‌باشد. از طرفی آلن و همکاران (۴) نشان دادند که این روش را می‌توان در شرایط محدودیت داده‌های اقلیمی، از طریق برآورد داده‌های غیرموجود استفاده کرد. ایشان روش زیر را برای تخمین داده‌های مفقود تابش خالص، کمبود فشار بخار و سرعت باد پیشنهاد کردند:

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در استان خراسان رضوی

تابش خالص (R_n)

در این مورد R_n با استفاده از روابط ارائه شده توسط آلن و همکاران (۴) برآورد می‌گردد. با این تفاوت که تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های درجه حرارت حداقل و حداکثر و تابش فرازمینی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_s = K_{Rs}\sqrt{T_{\max} - T_{\min}}\,R_a \qquad (۹)$$

که در آن K_{Rs} ضریب تجربی است و مقدار آن بین ۰/۱۶ تا ۰/۱۹ می‌باشد. در این مطالعه مقدار این ضریب ۰/۱۶ در نظر گرفته شده است (۱۳).

سرعت باد (U_2)

وقتی که داده‌های سرعت باد موجود نباشند، بر طبق دستورالعمل ارائه شده توسط آلن و همکاران (۴) بهترین روش، استفاده از داده‌های سرعت باد نزدیکترین ایستگاه مورد نظر در منطقه می‌باشد. از طرفی اثر سرعت باد بر ET_o نسبتاً کم (به‌جز مناطق بسیار خشک و بادخیز) بوده و این فرض توسط محققین نیز پذیرفته شده است (۱۱). در این مطالعه، برای ایستگاه مشهد از داده‌های سرعت باد میانگین سالانه و برای سایر ایستگاه‌ها، از اطلاعات میانگین سرعت باد ماهانه در ایستگاه مشهد، به دلیل کامل بودن و طول دوره آماری بیشتر نسبت به سایر ایستگاه‌ها، به عنوان مبنا و مقایسه استفاده شده است.

کمبود فشار بخار (Δe)

هنگامی که داده‌های رطوبت هوا موجود نباشند، کمبود فشار بخار $(e_s - e_a)$ را می‌توان از داده‌های درجه حرارت تخمین زد. فشار بخار واقعی با فرض مساوی بودن دمای نقطه شبنم با دمای حداقل، از معادله زیر به دست می‌آید:

$$e_a = 0.611\exp\left(\frac{17.27\,T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right) \qquad (۱۰)$$

آنالیز داده‌ها

نتایج ET_o تخمین زده شده با روش FAO PM با داده‌های مفقود ذکر شده در بالا، با ET_o تخمین زده شده با مجموعه کامل داده‌ها مقایسه شد. به‌طور مشابه، ET_o تخمین زده با روش‌های جایگزین و روش FAO PM نیز مقایسه گردید. در این مطالعه روش‌های تجربی نیز برای هر ایستگاه، با واسنجی پارامترهای تجربی اصلاح گردید و با روش FAO PM مقایسه شد. واسنجی روش‌های مختلف، از طریق حداقل کردن خطا بین تبخیر- تعرق تخمین زده شده و محاسبه شده با روش FAO PM و همچنین مساوی بودن شیب خط رگرسیون با یک، انجام شد. عملکرد هر یک از روش‌ها از طریق آنالیز رگرسیونی و با درنظر گرفتن عرض از مبدأ خط رگرسیون برابر با صفر (a=0)، تجزیه و تحلیل شدند. از شیب خط رگرسیون (b) و ضریب تبیین (R^2) برای دقت اندازه‌گیری‌ها استفاده گردید. بهترین حالت زمانی می‌باشد که شیب خط رگرسیون و ضریب تبیین

Archive of SID

www.SID.ir

برابر ۱ باشند. برای مقایسه و ارزیابی هر یک از روش‌ها با روش FAO PM، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) با روابط زیر استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(ETo_{est} - ETo_{FAO-PM})^2} \quad (۱۱)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|ETo_{est} - ETo_{FAO-PM}\right| \quad (۱۲)$$

که ETo_{FAO-PM} تبخیر- تعرق برآورد شده با روش فائو- پنمن- مانتیث و ETo_{est} تبخیر- تعرق برآورد شده با روش‌های تجربی می‌باشد. برای مقایسه عملکرد روش‌های مختلف برآورد ET_o، میانگین RMSE برای همه روش‌ها، از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۵ درصد، مقایسه گردید.

نتایج و بحث

تخمین ET_o با روش فائو- پنمن- مانتیث با داده‌های مفقود

در جدول ۲ شیب و ضریب تبیین برای همه روابط بین تبخیر- تعرق با مجموعه کامل داده‌ها و داده‌های مفقود (سرعت باد، تابش خالص، فشار بخار واقعی) محاسبه شده در بخش قبلی، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد وقتی که تنها داده‌های تابش خالص (Rs-) یا ساعات آفتابی مفقود باشند، روش FAO PM گزینه مناسبی برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع می‌باشد. برای همه ایستگاه‌ها شیب خط رگرسیون (b) با مجموعه کامل داده‌ها و داده‌های مفقود تابش خالص (محاسبه شده به روش پیشنهادی فائو) بین ۰/۹۹ تا ۱/۰۵ و ضریب R^2، ۰/۹۹ به‌دست آمد (جدول ۲). شکل ۲-ب نیز عملکرد این روش را تأیید می‌کند. مقدار MAE بین ۰/۰۶ تا ۰/۱۷ میلی‌متر در روز و مقدار RMSE بین ۰/۱ تا ۰/۲۴ میلی‌متر در روز متغیر می‌باشد (شکل ۲ و ۳).

وقتی که داده‌های سرعت باد (U-) مفقود باشند، بهترین روش استفاده از داده‌های نزدیکترین ایستگاه هواشناسی به ایستگاه مورد نظر می‌باشد. در این پژوهش همان‌گونه که قبلاً ذکر گردید برای ارزیابی، از داده‌های سرعت باد ایستگاه مشهد، به دلیل کامل بودن و طول دوره آماری بیشتر، استفاده شده است. در این مورد برای همه ایستگاه‌ها شیب خط رگرسیون بین ۰/۸۲ تا ۱/۱۸ و ضریب تبیین بین ۰/۸۹ تا ۰/۹۸ متغیر می‌باشد (جدول ۲). مقدار MAE بین ۰/۲۳ تا ۰/۷۳ میلی‌متر در روز و مقدار RMSE بین ۰/۳۴ تا ۱/۰۲ میلی‌متر در روز متغیر می‌باشد (شکل ۲ و ۳). با توجه به شاخص‌های آماری ارائه شده، نتایج نشان می‌دهد وقتی که داده‌های سرعت باد مفقود باشند، بازهم نتایج قابل قبول می‌باشد. سنتوهز و همکاران (۱۳) گزارش کردند زمانی که داده‌های سرعت باد مفقود باشند، مقدار RMSE کم و معادل ۰/۱۸ میلی‌متر در روز می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مقدار RMSE به‌طور متوسط، ۰/۶۹ میلی‌متر در روز می‌باشد که به نظر می‌رسد به‌دلیل استفاده از اطلاعات سرعت باد در ایستگاه مشهد است که از لحاظ مکانی و مشخصات جغرافیایی متفاوت از سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. دلیل دیگر احتمالاً به اقلیم خشک و نیمه‌خشک منطقه مربوط می‌شود. به‌عنوان مثال وقتی که از داده‌های متوسط سرعت باد در ایستگاه مشهد استفاده گردید، کمترین مقدار RMSE (۰/۳۴ میلی‌متر در روز) حاصل شد. بنابراین زمانی که در ایستگاه هواشناسی داده‌های سرعت باد موجود نباشند، بهترین روش استفاده از میانگین داده‌های سرعت باد در همان ایستگاه برای تخمین بهتر ET_o می‌باشد.

زمانی که داده‌های فشار بخار واقعی (معمولاً از داده‌های رطوبت نسبی محاسبه می‌شود) مفقود باشند، مقدار شیب خط افزایش می‌یابد. شیب خط رگرسیون از ۱/۰۳ در ایستگاه نیشابور تا ۱/۲۹ در ایستگاه تربت جام و ضریب تبیین بین ۰/۹۲تا ۰/۹۸ متغیر می‌باشد (جدول ۲). مقدار شاخص‌های آماری (RMSE و MAE) در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای مطلق (MAE) در این حالت به‌ترتیب تا ۱/۳۳ و ۰/۹۳ میلی‌متر در روز افزایش می‌یابد. عملکرد روش FAO PM در تخمین ET_o وقتی که داده‌های تابش خورشیدی و فشار بخار واقعی مفقود می‌باشند، با توجه به شکل ۴ (ایستگاه مشهد) بهتر قابل توجیه می‌باشد. ضریب تبیین بین تابش خورشیدی محاسبه شده با معادله آنگستروم- پروسکات پیشنهادی توسط خلیلی و رضایی صدر (۲) و پیشنهادی فائو (دمای حداکثر و حداقل)، ۰/۹۲ می‌باشد. درحالی که ضریب تبیین بین فشار بخار واقعی محاسبه شده با داده‌های رطوبت نسبی و پیشنهادی فائو (دمای حداقل)، ۰/۳۸ محاسبه گردید. عملکرد پایین‌تر روش FAO PM با داده‌های مفقود فشار بخار واقعی نسبت به بخش قبلی که فرض شده بود داده‌های تابش خالص مفقود می‌باشند، با توجه به شکل ۴ قابل توجیه است.

در شرایطی که داده‌های تابش خورشیدی (معمولاً از داده‌های ساعات آفتابی با توجه به معادله آنگستروم- پروسکات محاسبه می‌شود) و سرعت باد موجود نباشند، ET_o تخمین زده شده مشابه زمانی است که تنها داده‌های تابش خورشیدی مفقود می‌باشد. شیب خط رگرسیون بین مجموعه کامل داده‌ها و داده‌های مفقود تابش خالص و سرعت باد بین ۰/۸۱ تا ۱/۲۱ و ضریب تبیین بین ۰/۸۹ تا ۰/۹۷ متغیر می‌باشد (جدول ۲).

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- شیب (b) و ضریب تبیین (R^2) رابطه بین تبخیر و تعرق محاسبه شده با روش FAO PM در حالت داده‌های کامل و داده‌های مفقود: Rs- : بدون تابش خالص، U- : بدون سرعت با، ea- : بدون فشار بخار واقعی ($ETo_{FAO-PM} = b \times ETo_{est}$)

روش محاسبه	۱		۲		۳		٤		٥		٦		۷*	
ایستگاه	b	R^2	b	R^2	b	R^2	b	R^2	b	R^2	b	R^2	b	R^2
تربت جام	۱/۰۲	۰/۹۹	۱/۱۸	۰/۹۶	۱/۲۹	۰/۹۷	۱/۲۱	۰/۹۵	۱/۳۳	۰/۹۵	۱/۳۸	۰/۹۵	۱/۴۴	۰/۹۲
تربت حیدریه	۱/۰۳	۰/۹۹	۱/۰۲	۰/۹۵	۱/۱۴	۰/۹۸	۱/۰۶	۰/۹۴	۱/۲	۰/۹۵	۱/۱۵	۰/۹۵	۱/۲	۰/۹۲
سبزوار	۱/۰۱	۰/۹۹	۱/۱۰	۰/۹۳	۱/۲۲	۰/۹۸	۱/۱۲	۰/۹۳	۱/۲۵	۰/۹۸	۱/۲۸	۰/۹۵	۱/۳۲	۰/۹۵
سرخس	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۶	۱/۱۳	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۵	۱/۱۴	۰/۹۷	۱/۱۱	۰/۹۶	۱/۱۲	۰/۹۴
کاشمر	۱/۰۵	۰/۹۹	۰/۸۵	۰/۸۹	۱/۱۵	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۸۹	۱/۲۹	۰/۹۳	۱/۲۲	۰/۹۶	۱/۳۷	۰/۹۶
گلمکان	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۲	۰/۹۵	۱/۱۵	۰/۹۸	۱/۰۳	۰/۹۵	۱/۱۵	۰/۹۷	۱/۱۷	۰/۹۶	۱/۱۷	۰/۹۶
گناباد	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۰	۰/۹۱	۱/۱۳	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۹۱	۱/۲	۰/۹۷	۱/۰۸	۰/۹۳	۱/۱۴	۰/۹۲
مشهد	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۰۴	۰/۹۸	۱/۲۴	۰/۹۹	۱/۰۵	۰/۹۶	۱/۱	۰/۹۷	۱/۱	۰/۹۷	۱/۱۱	۰/۹۴
نیشابور	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۲	۰/۹۷	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۸۱	۰/۹۷	۱/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۹۱	۰/۹۷
قوچان	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۹۵	۱/۰۶	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۹۵	۱/۰۷	۰/۹۸	۱/۰۲	۰/۹۶	۱/۰۳	۰/۹۶

*: ۱- (-Rs)، ۲- (-U)، ۳- (-ea)، ۴- (-Rs,-U)، ۵- (-Rs,-ea)، ۶- (-U,-ea)، ۷- (-Rs,-U,-ea)

مقدار MAE در شکل ۲ نشان داده شده است. مقدار RMSE در این حالت بین ۰/۴۶ تا ۰/۸۹ میلی‌متر در روز (به جز ایستگاه تربت جام) متغیر می‌باشد (شکل ۳). در وضعیتی که داده‌های تابش خالص و فشار بخار واقعی و یا فشار بخار واقعی و سرعت باد مفقود باشند، مقدار خطا افزایش پیدا می‌کند و استفاده از روش FAO PM مناسب نمی‌باشد (جدول ۲، شکل ۲ و ۳). همچنین وقتی که تنها داده‌های دمای هوا موجود باشند، مقدار شیب خط بین ۰/۹۱ تا ۱/۴۴ و ضریب تبیین بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۷ متغیر می‌باشد (جدول ۲). در این حالت مقدار خطای مطلق تا ۰/۶۱ میلی‌متر در روز و ریشه میانگین مربعات خطا تا ۰/۸۸ میلی‌متر در روز افزایش می‌یابد (شکل ۲ و ۳). مقدار خطای تخمین ET_o در این حالت نسبت به سایر روش‌ها بالاتر می‌باشد.

تخمین ET_o با سایر روش‌ها

وقتی که در ایستگاه‌های هواشناسی بعضی از داده‌های اقلیمی برای محاسبه تبخیر- تعرق موجود نباشد، روش معمول استفاده از روش‌های جایگزین می‌باشد. اگر در ایستگاه هواشناسی تنها داده‌های درجه حرارت و تابش خالص موجود باشد، بهترین روش معادله پریستلی- تایلور به نظر می‌رسد که در حقیقت این روش ساده‌سازی روش پنمن می‌باشد. در واقع روش پریستلی- تایلور جزء آیرودینامیک معادله پنمن را به‌عنوان کسری از ترم تابش در نظر می‌گیرد و در شرایط مختلف مقدار آن ۰/۲۶ در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۳ نتایج کاربرد روش مذکور در مقایسه با روش FAO PM در شرایط کامل داده‌های اقلیمی، با آنالیز شیب خط و ضریب تبیین ارایه شده است. همچنین در شکل ۵ نتایج محاسبه MAE نشان داده شده است. مقدار RMSE وقتی که از روش پریستلی- تایلور استفاده می‌شود، بین ۰/۳۱ تا ۲/۰۵ میلی‌متر در روز متغیر می‌باشد (شکل ۵). با این حال زمانی که پارامتر تجربی این روش (alpha) برای هر مکان واسنجی گردید، مقدار این پارامتر از ۱/۲۶ به محدوده بین ۱/۲۷ تا ۱/۹ افزایش پیدا کرد و نتایج، به‌خصوص دقت تخمین‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود پیدا کرد (جدول ۳). در این مورد شیب خط رگرسیون تا ۱/۰۰ کاهش پیدا کرد و مقدار ضریب تبیین بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۶ متغیر بود (جدول ۳). مقدار خطای مطلق بین ۰/۲۲ تا ۰/۶۶ میلی‌متر در روز و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا به کمتر از ۰/۸۶ میلی‌متر در روز کاهش پیدا کرد (شکل ۵).

نتایج ارائه شده نشان می‌دهد در فرآیند کالیبراسیون ضریب تجربی معادله پریستلی- تایلور، دقت تخمین‌ها افزایش می‌یابد. همچنین مقدار خطای مطلق و ریشه میانگین مربعات خطا کاهش می‌یابند؛ در حالی که ضریب تبیین تغییر نمی‌کند. مزیت استفاده از این روش پریستلی- تایلور اصلاح شده نسبت به روش FAO PM این است که زمانی که داده‌های سرعت باد و فشار بخار واقعی مفقود باشند، این روش نتایج بهتری ارائه می‌دهد. وقتی که از روش FAO PM استفاده می‌شود مقدار RMSE بین ۰/۳۶ تا ۱/۶۶ میلی‌متر در روز می‌باشد؛ در حالی که از روش پرستلی- تایلور اصلاح شده استفاده می‌گردد، مقدار این شاخص بین ۰/۳۱ تا ۰/۸۶ میلی‌متر در روز می‌باشد.

در این پژوهش آنالیز روش هارگریوز نیز مانند روش پریستلی- تایلور انجام شد. این روش ابتدا برای شرایط اقلیمی نیمه‌خشک توسعه پیدا کرد و برای محاسبه تبخیر- تعرق، تنها از داده‌های دما استفاده می‌کند. این روش مقدار ET_o را در اقلیم‌های مرطوب بیشتر از واقعیت برآورد می‌کند. در شرایط اقلیمی استان خراسان رضوی، روش

Archive of SID

www.SID.ir

هارگریوز مقدار ET_o را کمتر از واقعیت برآورد می‌کند. مقدار شیب خط رگرسیون از ۰/۸۱ در ایستگاه نیشابور تا ۱/۲۸ در ایستگاه تربت جام و همچنین مقدار ضریب تبیین از ۰/۹ تا ۰/۹۶ متغیر می‌باشد (جدول ۴). مقادیر شاخص‌های RMSE و MAE در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار خطای استفاده از روش هاگریوز با توجه به RMSE بین ۰/۴۷ تا ۱/۵۱ میلی‌متر در روز و با استفاده از روش پنمن- مانتیث، وقتی که داده‌های سرعت باد، فشار بخار واقعی و تابش خالص مفقود باشند، بین ۰/۳۸ تا ۱/۹ میلی‌متر در روز می‌باشد که در هر دو حالت مقدار خطا نسبتاً بالا می‌باشد. به هر حال وقتی که این روش به‌طور محلی با تغییر ضریب C_0 واسنجی گردید، صحت نتایج بهبود پیدا کرد. به‌طوری که مقدار MAE به کمتر از ۰/۷۶ میلی‌متر در روز کاهش پیدا کرد و مقدار RMSE از ۰/۳۳ تا ۰/۹ میلی‌متر در روز متغیر بود (شکل ۶). به هرحال دقت تخمین‌ها (ضریب تبیین) تغییری نکرد (جدول ۴). روش‌های واسنجی ارائه شده در روش‌های پریستلی- تایلور و هارگریوز، برای مکان‌هایی امکان‌پذیر می‌باشد که داده‌های هواشناسی برای مقایسه روش مذکور با روش FAO PM به‌طور کامل ثبت شده باشند. به هر حال با واسنجی این روش دقت نتایج نسبت به روش FAO PM، به‌خصوص زمانی که در ایستگاه‌های هواشناسی تنها داده‌های درجه حرارت موجود باشند، افزایش پیدا می‌کند. مزیت استفاده از واسنجی این روش‌ها این است که می‌توان بعد از کالیبراسیون برای سایر ایستگاه‌های منطقه که داده‌های هواشناسی به‌طور کامل ثبت نمی‌شوند، استفاده کرد.

وقتی که از روش ترنت- وایت ($\beta = 0.35$) برای محاسبه ET_o استفاده می‌شود، شیب خط رگرسیون در این روش نسبت به روش FAO PM بین ۰/۸۵ تا ۱/۳۵ و ضریب تبیین بین ۰/۸۸ تا ۰/۹۵ متغیر می‌باشد (جدول ۵). مقدار MAE بین ۰/۳۷ تا ۱/۱۷ میلی‌متر در روز و مقدار RMSE بین ۰/۴۷ تا ۱/۶۴ میلی‌متر در روز متغیر می‌باشد. با واسنجی این روش از طریق ضریب تجربی β در معادله درجه حرارت مؤثر که توسط کامارگو (۳) پیشنهاد شده است، دقت و صحت نتایج در بعضی از ایستگاه‌ها بهبود پیدا کرد. در این حالت شیب خط رگرسیون به ۱ می‌رسد و در نتیجه مقدار MAE به کمتر از ۰/۶۱ میلی‌متر در روز کاهش پیدا می‌کند (شکل ۷). مقدار RMSE به‌دست آمده از این روش بین ۰/۴۶ تا ۰/۷۵ میلی‌متر در روز محاسبه گردید (شکل ۷). این نتایج نشان می‌دهد در صورتی که تنها داده‌های درجه حرارت موجود باشند، روش ترنت- وایت اصلاح شده نسبت به روش FAO PM از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. به هرحال به نظر می‌رسد دقت این روش در مقایسه با روش هارگریوز، که به طور مشابه تنها از داده‌های درجه حرارت استفاده می‌کند، کمتر باشد.

مقایسه روش‌های مختلف برآورد ET_o

در جدول ۶ خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده از مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق، براساس متوسط RMSE و آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای همه ایستگاه‌ها ارائه شده است. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد در شرایط اقلیمی استان خراسان رضوی وقتی که داده‌های تابش خالص و سرعت باد مفقود باشند، روش FAO PM گزینه خوبی برای تخمین تبخیر- تعرق می‌باشد و در مجموع از نظر دقت برآورد در جایگاه هفتم قرار گرفت. این نتایج برخلاف نتایج سنتوهز و همکاران (۱۳) می‌باشد؛ نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد زمانی که داده‌های رطوبت نسبی و سرعت باد مفقود باشند، روش FAO PM بهترین گزینه برای تخمین تبخیر- تعرق می‌باشد.

جدول ۳- شیب (b) و ضریب تبیین (R^2) رابطه بین تبخیر- تعرق محاسبه شده با روش‌های FAO PM و پریستلی- تایلور

ایستگاه	پریستلی- تایلور (alpha= 1.26)		پریستلی- تایلور اصلاح شده		
	b	R^2	alpha	b	R^2
تربت جام	۱/۵۱	۰/۹۲	۱/۹۰	۱/۰۰	۰/۹۲
تربت حیدریه	۱/۱۸	۰/۹۴	۱/۴۹	۱/۰۰	۰/۹۴
سبزوار	۱/۴۲	۰/۹۲	۱/۷۹	۱/۰۰	۰/۹۲
سرخس	۱/۲۳	۰/۹۳	۱/۵۶	۱	۰/۹۳
کاشمر	۱/۱۱	۰/۹۴	۱/۴۰	۱/۰۰	۰/۹۴
گلمکان	۱/۲۳	۰/۹۲	۱/۵۵	۱/۰۰	۰/۹۲
گناباد	۱/۲۴	۰/۹۴	۱/۵۶	۱/۰۰	۰/۹۴
مشهد	۱/۱۱	۰/۹۵	۱/۴۰	۱/۰۰	۰/۹۵
نیشابور	۱/۰۱	۰/۹۷	۱/۲۷	۱/۰۰	۰/۹۷
قوچان	۱/۰۲	۰/۹۶	۱/۲۹	۱/۰۰	۰/۹۶

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ٤- شیب (b) و ضریب تبیین (R^2) رابطه بین تبخیر- تعرق محاسبه شده با روش‌های FAO PM و هارگریوز

ایستگاه	هارگریوز ($C_0 = 0.0023$)		هارگریوز اصلاح شده		
	b	R^2	C_0	b	R^2
تربت جام	۱/۲۸	۰/۹۱	۰/۰۰۲۹۵	۱/۰۰	۰/۹۱
تربت حیدریه	۱/۰۳	۰/۹۰	۰/۰۰۲۳۸	۱/۰۰	۰/۹۰
سبزوار	۱/۱۴	۰/۹۵	۰/۰۰۲۶۳	۱/۰۰	۰/۹۵
سرخس	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۰۰۲۲۳	۱/۰۰	۰/۹۳
کاشمر	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۰۰۲۲۰	۱	۰/۹۵
گلمکان	۱/۰۳	۰/۹۵	۰/۰۰۲۳۰	۱/۰۳	۰/۹۵
گناباد	۱/۰۱	۰/۹۲	۰/۰۰۲۳۳	۱/۰۰	۰/۹۲
مشهد	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۰۰۲۱۵	۱/۰۰	۰/۹۴
نیشابور	۰/۸۱	۰/۹۶	۰/۰۰۱۸۶	۱/۰۰	۰/۹۶
قوچان	۰/۹۰	۰/۹۶	۰/۰۰۲۰۷	۱/۰۰	۰/۹۶

جدول ٥- شیب (b) و ضریب تبیین (R^2) رابطه بین تبخیر- تعرق محاسبه شده با روش‌های FAO PM و ترنت- وایت

ایستگاه	ترنت- وایت ($\beta = 0.35$)		ترنت- وایت اصلاح شده		
	b	R^2	β	b	R^2
تربت جام	۱/۳۵	۰/۹۳	۰/۴۳۸	۱/۰۰	۰/۹۳
تربت حیدریه	۱/۱۰	۰/۸۸	۰/۳۸۵	۱/۰۰	۰/۸۸
سبزوار	۱/۱۳	۰/۹۵	۰/۳۸۰	۱/۰۳	۰/۹۵
سرخس	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۳۴۹	۱/۰۰	۰/۹۳
کاشمر	۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۳۵۰	۱/۰۱	۰/۸۹
گلمکان	۱/۱۰	۰/۹۴	۰/۳۸۵	۱/۰۰	۰/۹۴
گناباد	۱/۰۴	۰/۹۱	۰/۳۶۸	۱/۰۰	۰/۹۱
مشهد	۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۳۵۷	۱/۰۰	۰/۹۳
نیشابور	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۳۲۰	۱/۰۰	۰/۹۲
قوچان	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۳۵۰	۱/۰۰	۰/۹۴

همچنین برخلاف نتایج این مطالعه، نتایج تحقیقات سنتوهز و همکاران (۱۳) نشان داد زمانی که داده‌های تابش خالص مفقود باشند، روش FAO PM گزینه مناسبی نمی‌باشد و ضریب تجربی ارائه شده در معادله پیشنهادی آلن و همکاران (۴) نیاز به واسنجی دارد. در این تحقیق با توجه به این‌که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه داده‌های ساعات آفتابی، خصوصاً در سال های اولیه تأسیس ایستگاه مفقود می‌باشند، بهترین نتایج زمانی حاصل گردید که داده‌های تابش خالص یا ساعات آفتابی موجود نمی‌باشند و در رتبه‌بندی کلی در رتبه ۱ قرار گرفت. در این حالت مقدار RMSE کمتر از ۰/۱۶ میلی‌متر در روز برآورد گردید. این نتایج با تحقیقات پاپوا و همکاران (۱۱) در بلغارستان و جابلون و سالی (۹) در تانزانیا نیز همخوانی دارد که مقدار RMSE را در این حالت کم و به ترتیب حدود ۰/۳ و ۰/۴ میلی‌متر در روز بیان کردند.

نتایج این مطالعه نشان داد وقتی که داده‌های رطوبت نسبی موجود نباشند، روش FAO PM گزینه مناسبی برای تخمین تبخیر- تعرق نمی‌باشد و مقدار خطا نسبت به زمانی که داده‌های تابش خورشیدی مفقود می‌باشند، افزایش می‌یابد. در این حالت مقدار RMSE حدود ۰/۶۴ میلی‌متر در روز و در جایگاه پنجم رتبه‌بندی قرار گرفت (جدول ۶). بنابراین به نظر می‌رسد روش توصیه شده (فرض مساوی بون دمای نقطه شبنم با حداقل دمای روزانه) توسط آلن و همکاران (۴)، برای تخمین فشار بخار واقعی از داده‌های دمای حداقل برای شرایط استان خراسان رضوی به دلیل اقلیم خشک و نیمه‌خشک منطقه، گزینه مناسبی نمی‌باشد. زمانی که داده‌های سرعت باد و رطوبت نسبی مفقود باشند، بهترین گزینه برای تخمین تبخیر- تعرق

Archive of SID

www.SID.ir

استفاده از معادله پریستلی- تایلور اصلاح شده می‌باشد. در این حالت مقدار RMSE کمتر از ۰/۵۶ میلی‌متر در روز و در رتبه دوم قرار گرفت. این نتایج با تحقیقات سنتوهز و همکاران (۱۳) در کانادا هم-خوانی دارد که بعد از واسنجی ضریب تجربی معادله (۱/۲۶)، به نتیجه مشابهی دست پیدا کردند. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مقدار ضریب تجربی (alpha) معادله پریستلی- تایلور بسته به اقلیم منطقه متغیر می‌باشد. در اقلیم‌های مرطوب مقدار این پارامتر کمتر از ۱/۲۶ و در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک این مقدار افزایش پیدا می‌کند (۱۳). در شرایط اقلیمی استان خراسان رضوی مقدار این پارامتر بین ۱/۲۷ تا ۱/۹ متغیر بود.

اگر در ایستگاه‌های هواشناسی فقط داده‌های درجه حرارت موجود باشند، بهترین روش در استان خراسان رضوی استفاده از معادله هارگریوز اصلاح شده می‌باشد. این نتایج توسط سایر محققین از جمله ایگبدن و همکاران (۸) در تانزانیا و فولادمند و حقیقت (۶) در استان فارس نیز مشاهده شده است. در این مطالعه روش مذکور با متوسط RMSE، ۰/۵۷ میلی‌متر در روز رتبه سوم را در طبقه‌بندی کلی به-دست آورد. سایر نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است.

براساس نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد بین متوسط RMSE، می‌توان روش‌های مختلف محاسبه تبخیر- تعرق را به چهار گروه تقسیم‌بندی کرد که مقدار RMSE در آنها نسبتاً تفاوت معنی‌داری ندارد. در گروه اول روش FAO PM بدون تابش خالص (-Rs) بهترین گزینه (RMSE=0.16mm/day) می‌باشد. گروه دوم شامل روش‌های پریستلی- تایلور و هارگریوز اصلاح شده می‌باشد که به‌ترتیب RMSE آنها معادل ۰/۵۶ و ۰/۵۷ میلی‌متر در روز می‌باشد. گروه سوم شامل روش‌های ترنت- وایت اصلاح شده، FAO PM بدون فشار بخار واقعی (-ea)، FAO PM بدون سرعت باد (-U)، FAO PM بدون تابش خالص و سرعت باد (-Rs,-U)، FAO PM بدون تابش خالص و فشار بخار واقعی (-Rs,-ea)، هارگریوز و FAO PM بدون سرعت باد و فشار بخار واقعی (-U,-ea) می‌باشند که مقدار RMSE بین ۰/۶۳ تا ۰/۷۶ میلی‌متر در روز متغیر می‌باشد. در نهایت گروه چهارم شامل روش‌های ترنت- وایت، FAO PM بدون تابش خالص، سرعت باد و فشار بخار اشباع واقعی (-Rs,-U,-ea) و پریستلی- تایلور می‌باشند که مقدار RMSE بیشتر از ۰/۸ میلی‌متر در روز می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد وقتی که داده‌های ساعات آفتابی و سرعت باد مفقود باشند، روش فائو- پنمن- مانتیث گزینه خوبی برای برآورد تبخیر- تعرق می‌باشد. در این مورد، داده‌های تابش خالص با استفاده از درجه حرارت حداقل و حداکثر محاسبه می‌گردند و در مورد اطلاعات سرعت باد، از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک استفاده شد. همچنین نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، استفاده از میانگین داده‌های سرعت باد ایستگاه با نقص داده سرعت باد، مؤثرتر از استفاده از داده‌های سرعت باد ایستگاه‌های مجاور آن می‌باشد. وقتی که داده‌های سرعت باد و فشار بخار واقعی مفقود می‌باشد، روش پریستلی- تایلور روش مناسبی می‌باشد.

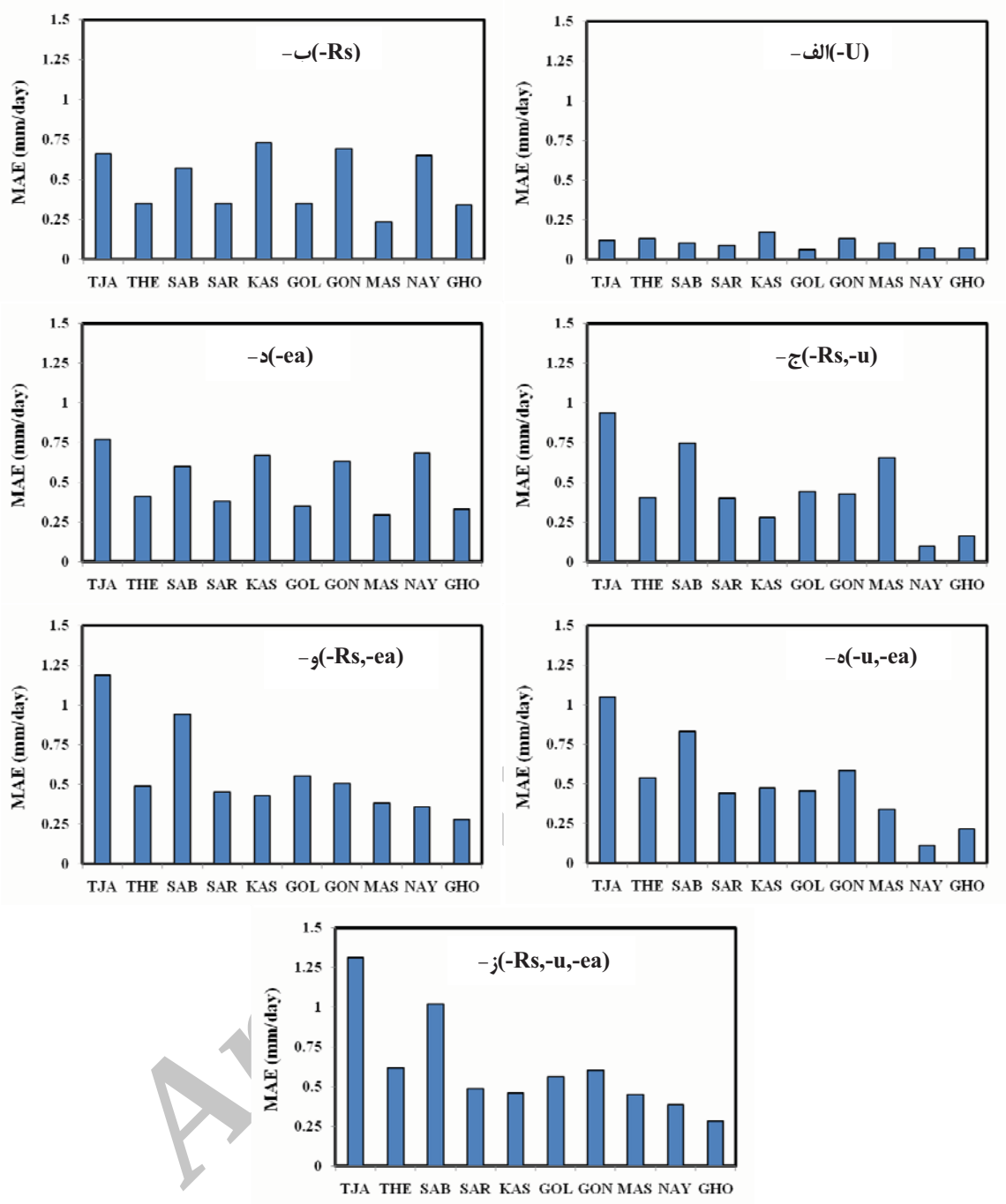
جدول ٦- متوسط RMSE برای تبخیر- تعرق محاسبه شده با روش FAO PM با داده‌های مفقود و روش‌های تجربی

رتبه‌بندی	روش محاسبه تبخیر- تعرق	متوسط RMSE (میلی‌متر در روز)*
۱	FAO- PM (-Rs)	0.16 c
۲	پریستلی تایلور اصلاح شده	0.56 b
۳	هارگریوز اصلاح شده	0.57 b
۴	ترنت وایت اصلاح شده	0.63 ab
۵	FAO PM (-ea)	0.64 ab
۶	FAO PM (-U)	0.69 ab
۷	FAO PM (-Rs,-U)	0.71 ab
۸	FAO PM (-Rs,-ea)	0.74 ab
۹	هارگریوز	0.75 ab
۱۰	FAO PM (-U,-ea)	0.76 ab
۱۱	ترنت وایت	0.80 ab
۱۲	FAO PM (-Rs,-U,-ea)	0.88 ab
۱۳	پریستلی تایلور	0.97 a

*: حروف یکسان بیان‌گر عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین روش‌های مختلف در سطح ۵ درصد می‌باشد.

Archive of SID

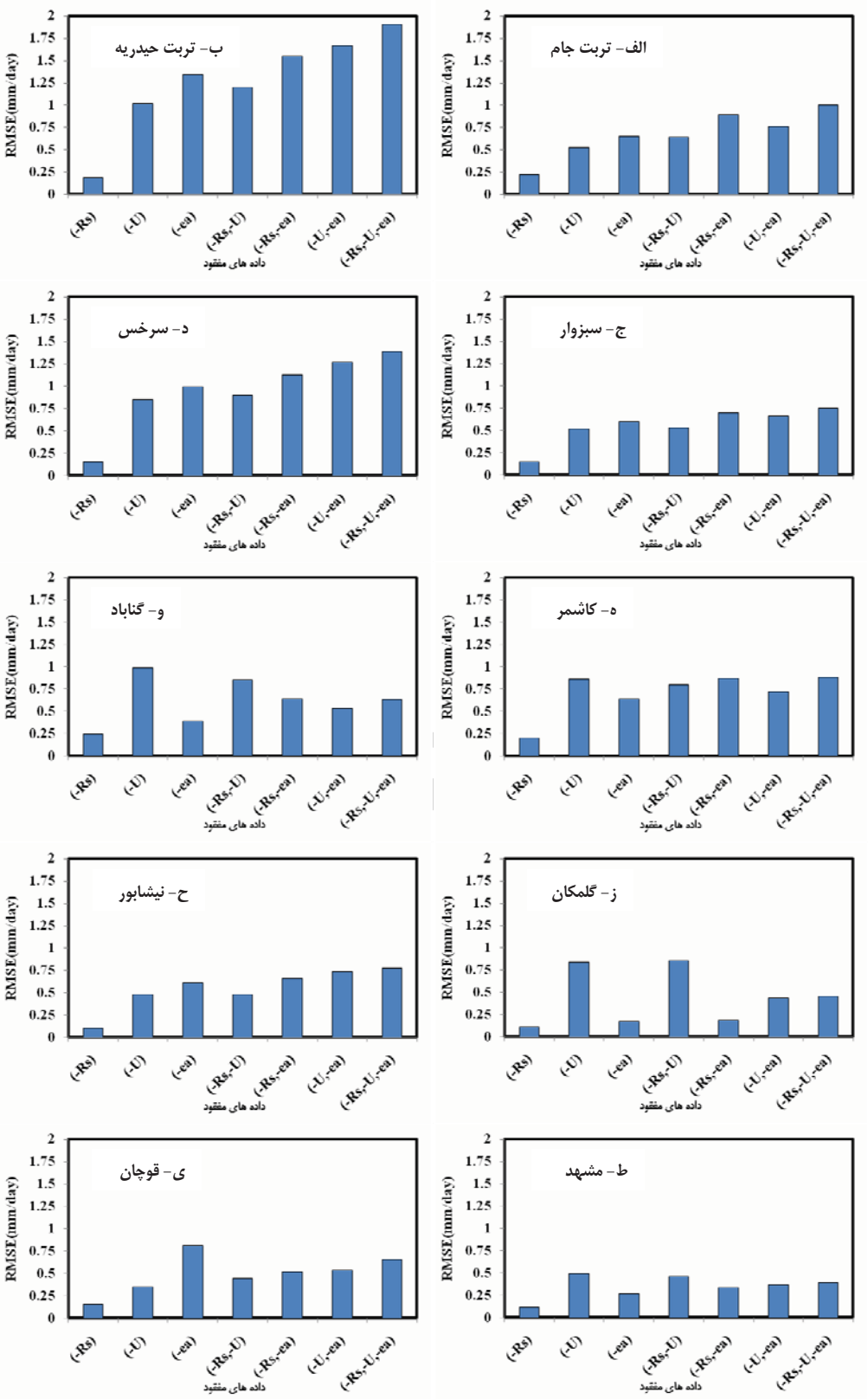
www.SID.ir



شکل ۲- میانگین خطای مطلق (MAE) برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع با داده‌های مفقود در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان رضوی

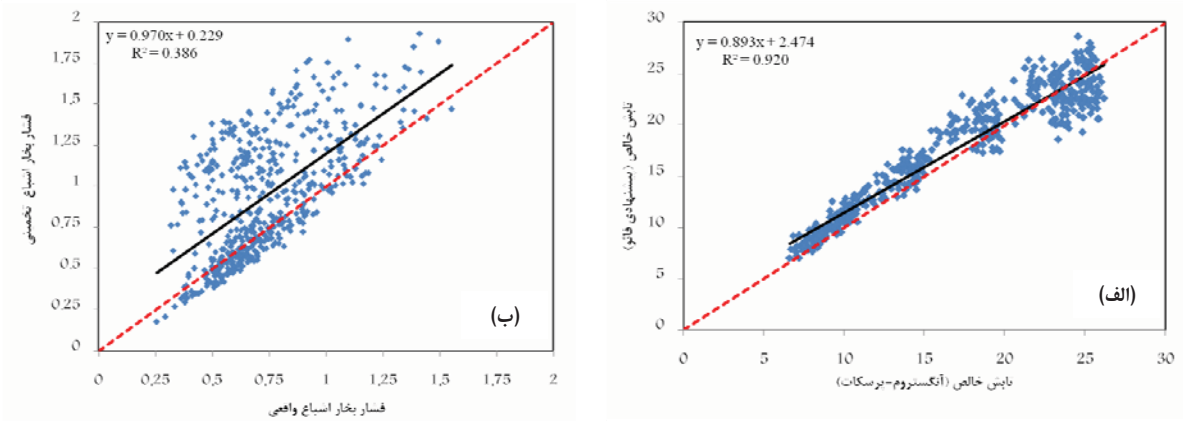
اما قبل از استفاده از این روش، پارامتر تجربی آن (۱/۲۶) باید واسنجی گردد. وقتی که در ایستگاه هواشناسی فقط داده‌های درجه حرارت موجود باشند، که در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی استان خراسان رضوی معمول می‌باشد، روش هارگریوز اصلاح شده بهترین گزینه برای تخمین تبخیر- تعرق می‌باشد. از مزیت‌های واسنجی روش‌های برآورد تبخیر- تعرق که مبتنی بر داده‌های درجه حرارت هستند این است که می‌توان از آن در سایر ایستگاه‌های منطقه، که داده‌های هواشناسی به طور کامل اندازه‌گیری و ثبت نمی‌گردند، استفاده کرد.

www.SID.ir

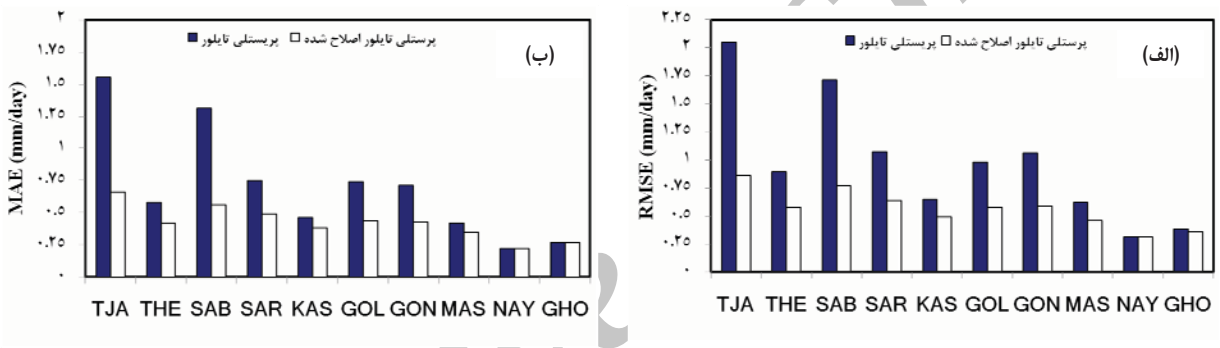


شکل ۳- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع با داده‌های مفقود در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان رضوی

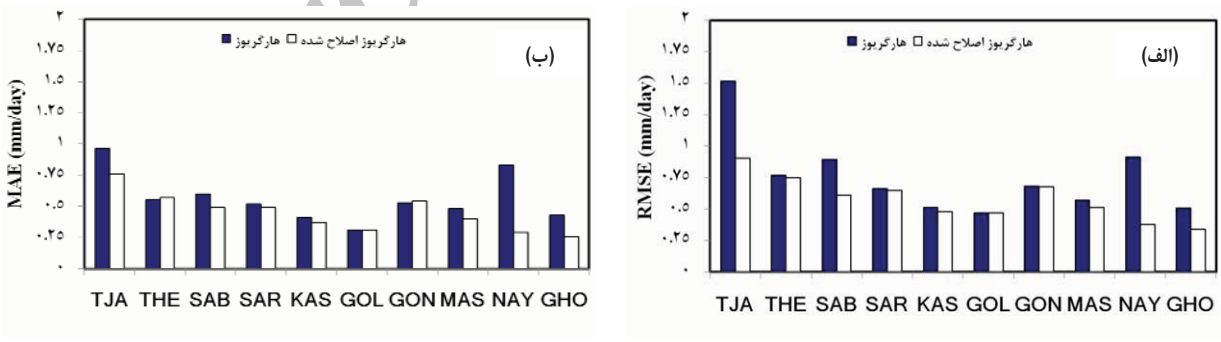
www.SID.ir



شکل ٤- روابط بین الف) تابش خورشیدی محاسبه شده با روش‌های آنگستروم- پرسکات (واسنجی شده توسط خلیلی و رضائی صدر) و پیشنهادی فائو (محاسبه شده از داده‌های دمای حداقل و حداکثر)؛ ب) فشار بخار واقعی (محاسبه شده از داده‌های رطوبت نسبی) و تخمینی (محاسبه شده از داده‌های دمای حداقل) در ایستگاه مشهد

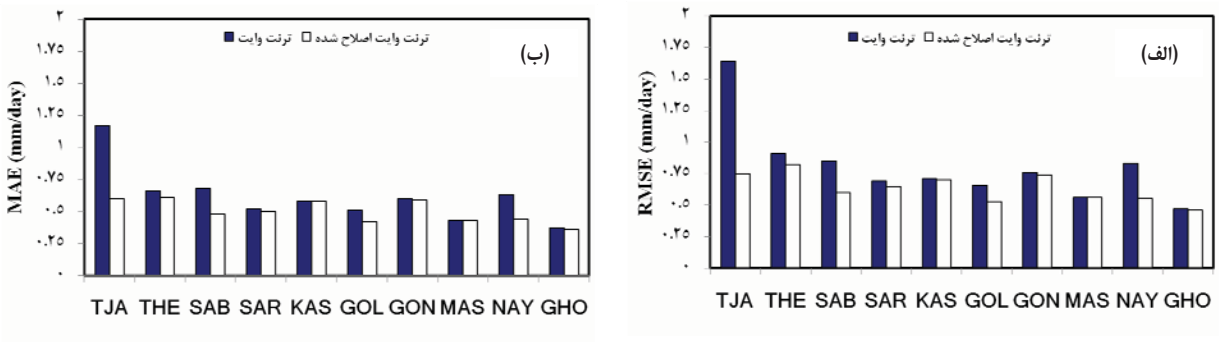


شکل ٥- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) برای تبخیر- تعرق محاسبه شده با روش‌های پریستلی- تایلور (۱/۲٦) و پریستلی- تایلور اصلاح شده در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان رضوی



شکل ٦- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) برای تبخیر- تعرق محاسبه شده با روش‌های هارگریوز ($C_0 = 0.0023$) و هارگریوز اصلاح شده در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان رضوی

www.SID.ir



شکل ۷- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) برای تبخیر- تعرق محاسبه شده با روش‌های ترنت- وایت ($\beta = 0.35$) و ترنت- وایت اصلاح شده در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان رضوی

سپاسگزاری

از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه و دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، به خاطر حمایت از این تحقیق (کد ۱۷۴۲۱/۲) قدردانی می‌شود.

منابع

۱- رحیمی خوب ع.، بهبهانی س.م.ر. و نظری فر م.ه. ۱۳۸۵. بررسی استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی در معادله پنمن- مانتیث- مطالعه موردی استان خوزستان. مجله علوم کشاورزی، ۳: ۶۰۰- ۵۹۱.

۲- خلیلی ع. و رضایی صدر ح. ۱۳۷۶. برآورد تابش کلی خورشید در گستره ایران بر مبنای داده‌های اقلیمی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۴۶، ص ۱۵ تا ۳۵.

۳- محمدیان آ.، علیزاده ا. و جوانمرد س. ۱۳۸۴. محاسبه میزان فرابرآورد تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی غیرمرجع در ایران. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۲۳ (۶): ۸۴-۶۷.

4- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guide-lines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome, Italy (FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56. 300 p.).

5- Camargo A.P., Marin F.R., Sentelhas P.C., and Picini A.G. 1999. Ajuste da equac¸a˜o de Thornthwaite para estimar a evapotranspirac¸a˜o potencial em climas a´ridos esuperu´ midos, com base na amplitude te´rmica. Revista Brasileira de Agrome-teorologia, 7: 251–257.

6- Fooladmand H.R., and Haghighat M. 2007. Spatial and temporal calibration of Hargreaves equation for calculating monthly reference evapotranspiration based on Penman–Monteith method. Irrigation and Drainage, 56: 439–449.

7- Hargreaves G.H., and Samani Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering Agriculture, 1: 96–99.

8- Igbadun H.E., Mahoo H.F., Tarimo A.K.P.R., and Salim B.A. 2006. Performance of two temperature-based reference evapotranspiration models in the Mkoji sub-catchment, Tanzania. Agricultural Engineering International: The CIGR E-jour-nal, 8: 1–18.

9- Jabloun M., and Sahli A. 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: applications to Tunı´- sia. Agricultural Water Management, 95: 707–715.

10- Pereira A.R., Sentelhas P.C., Folegatti M.V., Villa Nova N.A., Maggiotto S.R., and Pereira F.A.C. 2002. Substantiation of the daily FAO-56 reference evapotranspiration with data from automatic and conventional weather stations. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 10: 251–257.

11- Popova Z., Kercheva M., and Pereira L.S. 2006. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to South Bulgaria. Irrigation and Drainage, 55: 201–215.

12- Priestley C.H.B., and Taylor R.J. 1972. On the assessment of surface heat-flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 100: 81– 92.

13- Sentelhas P.C., Gillespie T.J., and Santos E.A. 2010. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. Agricultural Water Management, 97: 635–644.

14- Sto¨ckle C.O., Kjelgaard J., and Bellochi G. 2004. Evaluation of estimates weather data for calculating Penman–Monteith reference crop evapotranspiration. Irrigation Science, 23: 39–46.

Archive of SID

www.SID.ir

15- Suleiman A.A., and Hoogenboom G. 2007. Comparison of Priestley–Taylor and FAO-56 Penman–Monteith for daily reference evapotranspiration estimation in Geor- gia, USA. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133: 175–182.
16- Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38: 55–94.
17- Widmoser P. 2009. A discussion on and alternative to Penman–Monteith equation. Agricultural Water Management, 96: 711–721.
18- Xing Z., Chow L., Meng F.R., Rees H.W., Stevens L., and Monteith J. 2008. Validating evapotranspiration equations using Bowen Ratio in New Brunswick. Maritime Canada. Sensors, 8: 412–42.

Archive of SID

www.SID.ir

Journal of Water and Soil
Vol. 26, No. 1, Mar-Apr 2012, p. 236-250

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۶، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۱، ص. ۲۵۰-۲۳۶

Evaluation and Calibration of Different Methods to Estimate Reference Crop Evapotranspiration under Climatic Data Limitations (Case Study: Khorasan Razavi province)

H. Dehghan[1*] - A. Alizadeh[2]

Received: 30-8-2011
Accepted: 3-12-2011

Abstract

Crop reference evapotranspiration (ETo) is an important agrometeorological parameter for water resources and hydrological studies, as well as for irrigation planning and management. There are several methods to estimate ETo, but their performance in different environments are not the same. The FAO Penman–Monteith (FAO PM) method has been considered as a universal standard method to estimate ETo for more than a decade. In some situations, using FAO PM is limited due to lack of input variables. In these cases, calculating ETo using FAO PM method with estimated variables is introduced, that has recommended by the FAO paper No. 56. So, the purpose of this study is evaluating FAO PM performance to estimate ETo with missing data on wind speed, net radiation and saturation vapor pressure deficit, in Khorasan Razavi province. Empirical methods of ETo estimation including Priestley-Taylor, Hargreaves and Thornthwaite that require less input data, were calibrated for the region. Meteorological data from 10 synoptic stations in Khorasan Razavi province were collected to compare estimates of ETo using FAO PM method, by means of full and missing data. The results showed that when the net radiation and wind speed data are missing, again FAO PM Method is a good option for estimating evapotranspiration in Khorasan Razavi province, so that the RMSE value is less than 0.71 mm day^{-1}. Also, Priestley–Taylor method is a good option to estimate ETo, when wind speed and vapor pressure deficit are missing, especially when this method was calibrated according to local conditions (RMSE = 0.56 mm day^{-1}). When only temperature data are available, adjusted Hargreaves and modified Thornthwaite methods were better options to estimate ETo than the FAO PM method, since RMSEs from these methods (0.57 and 0.63 mm day^{-1}, respectively) were smaller than FAO PM (RMSE = 0.88 mm day^{-1}).

Keywords: Crop reference evapotranspiration, Priestley-Taylor, Hargreaves, Thornthwaite, Missing data

Archive of SID

1,2- PhD Student and Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*-Corresponding Author Email: Dehghan63.ha@gmail.com)

www.SID.ir