



ارزیابی و اصلاح مدل‌های والیانز برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در شرایط کمبود داده

هادی دهقان^۱، مهدی مکاری^۲

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۴

چکیده

برآورد دقیق تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_0) نقش بسزایی در بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه و برنامه‌ریزی آبیاری دارد. روش‌های مختلفی جهت برآورد ET_0 موجود می‌باشد. معتبرترین روش برآورد ET_0 مدل فائو-پنمن-مانتیت (FAO-PM) می‌باشد، اما این مدل به داده‌های ورودی زیادی نیاز دارد که در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی بخصوص در کشورهای در حال توسعه به طور کامل اندازه‌گیری نشده و یا داده‌های اندازه‌گیری شده دقت کافی ندارند. لذا محققین به سایر روش‌های تجربی با داده ورودی کمتر روی آورده‌اند. در این مطالعه ابتدا مقادیر روزانه ET_0 با استفاده از روش‌های تجربی پرستلی-تایلور، هارگریوز، روش پیشنهادی فائو در شرایط کمبود داده و دو شکل معادله والیانز در ایستگاه سینوپتیک مشهد محاسبه و با مقادیر محاسبه شده با روش FAO-PM مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین در این مقاله با اصلاح دو شکل معادلات والیانز مدل‌های جدیدی برای برآورد ET_0 در شرایط کمبود داده سرعت باد و همچنین سرعت باد و رطوبت نسبی ارائه شد. نتایج نشان داد در شرایط کمبود داده سرعت باد و رطوبت نسبی مدل والیانز اصلاح شده در این مقاله نسبت به سایر روش‌ها بالاترین دقت را داشت، به طوری که مقدار شاخص‌های R^2 ، RMSE و MAE به ترتیب ۰/۸۵، ۱/۵۹ و ۱/۲۶ میلی‌متر در روز محاسبه گردیدند. همچنین نتایج نشان داد در شرایطی که در ایستگاه هواشناسی تنها داده دما موجود باشد، روش هارگریوز اصلاح شده بالاترین دقت را داشت.

کلمات کلیدی: تبخیر- تعرق مرجع، پنمن-مانتیت، داده‌های محدود، والیانز، پرستلی تایلور، هارگریوز

۱- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر، ایران، ۰۹۱۳۹۴۹۶۲۲۷، h.dehghan@kashmar.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر، ایران، ۰۹۳۹۸۸۲۱۹۶۰، mehdimokari@gmail.com



مقدمه

بخش کشاورزی با سهم ۸/۳ درصدی از تولید ناخالص داخلی و سهم ۱۸ درصدی از کل شاغلان کشور از اهمیت ویژه‌ای در اقتصاد ایران برخوردار است و یکی از بخش‌های کلیدی در اقتصاد کشور محسوب می‌شود (نوروزی، ۱۳۹۶). از طرفی این بخش عمده‌ترین مصرف‌کننده آب کشور نیز می‌باشد. با توجه به تغییرات اقلیمی، رقابت شدید بین بخش‌های مختلف مصرف‌کننده آب و در نتیجه کاهش سهم بخش کشاورزی از منابع تجدیدپذیر، مدیریت مصرف آب در کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از مهم‌ترین روش‌های بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه، برنامه‌ریزی دقیق آبیاری است. برنامه‌ریزی آبیاری شامل فرآیندهای پیش‌بینی زمان و مقدار آبیاری است و نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های آینده در کشاورزی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه ایفا می‌کند و می‌تواند به روش‌های مختلف انجام شود. یکی از متداول‌ترین روش‌ها، استفاده از نیاز آبی برآورد شده گیاه براساس محاسبه تبخیر- تعرق مرجع است (توکلی و همکاران، ۱۳۹۲).

معتبرترین روش تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع، استفاده از لایسیمتر است. به طوری که دقت سایر روش‌ها با آن سنجیده می‌شود. در شرایط عدم دسترسی به داده‌های لایسیمتری، نتایج پژوهشگران مختلف حاکی از آن است که روش فائو- پنمن-مانتیت بهترین روش محاسبه تبخیر- تعرق می‌باشد. اهمیت و مقبولیت این روش تا اندازه‌ای است که در اقلیم‌های گوناگون، دقت سایر روش‌ها را نسبت به آن می‌سنجند. سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) نیز پس از تحلیل روش‌های مختلف، معادله فائو-پنمن-مانتیت را به عنوان روش استاندارد تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع پیشنهاد نموده است. در طول نیم قرن گذشته، معادلات تجربی یا فیزیکی بسیاری جهت برآورد تبخیر- تعرق مرجع در نواحی اقلیمی مختلف جهان توسعه داده شده‌اند. در بیشتر مطالعات روش فائو پنمن-مانتیت به عنوان روش استاندارد جهت ارزیابی و واسنجی سایر روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. اشکال اصلی معادله فائو پنمن-مانتیت نیاز به ورودی‌های زیاد هواشناسی است. برای حل این مشکل Allen et al. (1998) روش‌هایی را برای

تخمین متغیرهای اقلیمی مفقود مانند تابش خورشیدی، کمبود فشار بخار و سرعت باد در نشریه شماره ۵۶ فائو پیشنهاد کردند. براساس این روش مطالعاتی در اقلیم‌های مختلف جهت ارزیابی معادله پنمن-مانتیت تحت شرایط کمبود داده انجام شده است. به عنوان مثال دهقان و علیزاده (۱۳۹۱) روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در شرایط محدودیت داده‌های اقلیمی در استان خراسان رضوی را ارزیابی و واسنجی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد وقتی که داده‌های تابش خورشیدی و سرعت باد مفقود باشند، روش FAO-PM گزینه خوبی برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع ماهانه در استان خراسان رضوی می‌باشد. همچنین ارزیابی روش فائو- پنمن-مانتیت با داده‌های مفقود توسط Popova et al. (2006) برای بلغارستان، Jabloun and Sahli (2008) در تونس و et al. (2010) Sentelhas در کانادا نیز انجام شده است.

Tomas et al. (2017) دقت برآوردهای تبخیر تعرق مرجع (ET_0) تحت سناریوهای کمبود داده را در شبه جزیره ایبری بررسی کردند. داده‌های هواشناسی مفقود با استفاده از دو سناریوی درون‌یابی (PM-IC) و دستورالعمل ارائه شده توسط فائو ۵۶ (PM-R) برآورد گردیدند. همچنین روش هارگریوز و سامانی (HS) نیز مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش PM-IC بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر روش‌ها داراست.

با توجه به اهمیت برآورد دقیق تبخیر- تعرق گیاه مرجع با روش پنمن-مانتیت در شرایط کمبود داده، Valiantzas (2013) روش‌های برآورد ساده‌ای با عملکرد خوب و دقیق برای وقتی که داده‌های موجود خیلی محدود باشند، ارائه داد. Valipour, Djman et al. (2016) (2015) و Kisi (2013) عملکرد مدل‌های ارائه شده توسط Valiantzas را تست و بررسی کردند.

Kisi (2013) روش‌های مختلف تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه را در اقلیم مدیترانه‌ای بررسی کرد. نتایج نشان داد عملکرد معادله Valiantzas با ورودی کامل هواشناسی، بهتر از دیگر روش‌های تجربی می‌باشد. بدترین برآورد عموماً از معادله Turc به دست آمد.



روش FAO-PM با داده رطوبت نسبی مفقود در کل اوگاندا بسیار خوب می‌باشد، درحالی‌که استفاده از مقادیر سرعت باد متوسط طولانی مدت محلی در ایستگاه با داده مفقود سرعت باد در برآورد ET_0 نتایج مطلوبی نداشت. عملکرد معادلات Valiantzas بستگی به اطلاعات مورد نیاز داشت، هر چقدر تعداد ورودی‌های مدل بیشتر می‌باشد به تناسب آن دقت برآورد ET_0 نیز افزایش می‌یابد.

Ahooghalandari et al. (2017) معادلات Valiantzas را در منطقه Pilbara استرالیا واسنجی کردند. نتایج نشان داد ضریب تعیین (R^2) برای روش‌های Valiantzas 1, 2 (Rs, T, Copais (Rs, T, RH) در فرم‌های اصلی آن‌ها بیشتر از سایر روش‌ها است. با کالیبراسیون معادلات Valiantzas 1, 2 (Rs, T, RH) و Valiantzas 3 (Rs, T, T_{min}) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی MHBMO برآوردهای ET_0 را با ضرایب تبیین ۰/۹۵، ۰/۹۲۷ و ۰/۹ بهبود پیدا کرد.

به طور کلی، داده‌های مورد نیاز برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع شامل دمای هوا، سرعت باد، تابش خورشیدی و رطوبت نسبی هستند. در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران، ایستگاه‌های هواشناسی که به طور کامل همه پارامترهای هواشناسی برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع را ثبت کنند، کم می‌باشند. از طرفی در همین ایستگاه‌های محدود نیز ممکن است اطلاعات برداشت شده از دقت کافی برخوردار نباشند. همچنین ممکن است در منطقه مورد مطالعه ایستگاه‌های موجود باشند که همه داده‌های هواشناسی در آنها ثبت نگردد. لذا در چنین شرایطی استفاده و کاربرد مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع با دقت بالا، نقش مهمی در مدیریت منابع آب دارد. در این مطالعه ابتدا مدل‌های فائو-پنمن-مانتیتز (FAO-PM)، والیانز (Valiantzas)، پرستلی-تایلور (Priestley and Taylor) و هاگریوز (Hargreaves) با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک مشهد در شرایط کمبود داده مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله بعد مدل‌های والیانز (Valiantzas) با کاربرد فاکتور دمای مؤثر اصلاح شدند.

Valipour (2015) معادلات والیانز را در گستره اقلیمی ایران مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که این معادلات برای اکثر استان‌های ایران مناسب می‌باشند. Valiantzas 1 (T, Rs, RH, u) برای مرکز و جنوب ایران، Valiantzas 2 (T, Rs, RH, u) برای غرب، شرق و شمال ایران مناسب‌تر است. علاوه بر این، در میان روش‌های برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در شرایط محدودیت داده، مدل Valiantzas 2 (T, Rs, RH) بهترین روش (۱۸ استان) است.

Djaman et al. (2016 a) در مطالعه‌ای به بررسی برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع روزانه تحت داده‌های محدود در شرق آفریقا پرداختند. نتایج نشان داد در شرایط کاربرد معادله فائو-پنمن-مانتیتز تحت داده‌های مفقود تابش خورشیدی (Rs)، رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد (U_2)، شیب خط رگرسیون به ترتیب از ۰/۶۸ تا ۰/۸۹، ۰/۷۹ تا ۰/۷۹ تا ۰/۹۶، متغیر است، تحت شرایط فقدان داده رطوبت نسبی، روش ساده شده تخمین‌های دقیقی از ET_0 ارائه می‌کند. معادله Valiantzas با داده‌های کامل هواشناسی بیشترین دقت را در شرایط اقلیمی شرق آفریقا نشان داد.

Djaman et al. (2016 b) در مطالعه دیگری به ارزیابی مدل فائو-پنمن-مانتیتز و مدل‌های Valiantzas برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع چمن در شرایط ساحلی با داده‌های محدود پرداختند. نتایج نشان داد زمانی که داده‌های تابش خورشیدی موجود نباشد، برآورد تابش خورشیدی از داده‌های درجه حرارت روزانه حداکثر و حداقل، برآوردهای دقیقی از ET_0 تولید می‌کند. در مورد داده‌های سرعت باد، روش استفاده از متوسط سرعت باد در مقایسه با پیش فرض ارائه شده ۲ متر بر ثانیه، بهترین برآورد را نشان داد. معادله Valiantzas که از داده‌های دمای هوا و رطوبت نسبی استفاده می‌کند، مناسب نبوده و برای استفاده در شرایط آب و هوایی بورکینافاسو توصیه نمی‌شود.

Djaman et al. (2017) فرم‌های ساده شده Valiantzas از مدل تبخیر-تعرق مرجع فائو ۵۶ پنمن-مانتیتز در شرایط اقلیمی مرطوب ارزیابی کردند. عملکرد



$(MJm^{-2}d^{-1})$ می‌باشند. برای به دست آوردن اجزای معادله فائو- پنمن- مانتیث مطابق دستورالعمل ارائه شده توسط Allen et al., (1998) عمل شد.

روش پریستلی-تایلور (P-T)

این روش براساس روش پنمن ساده‌سازی شده است و جز آیرودینامیکی معادله پنمن با یک ضریب تجربی جایگزین می‌شود که به پارامتر پریستلی-تایلور معروف است (Priestley and Taylor, 1972):

$$ET_o = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left(\frac{R_n - G}{\lambda} \right) \quad (2)$$

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 (Priestley and Taylor, 1972, Suleiman and Hoogenboom, 2007). در این مطالعه ضریب مذکور به طور محلی واسنجی گردید.

روش هارگریوز (HA)

این روش ET_o را با استفاده از داده‌های درجه حرارت حداقل و حداکثر تخمین می‌زند (Hargreaves and Samani, 1985) و به صورت زیر می‌باشد:

$$ET_o = C_0 R_a' (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T + 17.8) \quad (3)$$

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.

روش‌های والیانز

Valiantzas (2013) معادله ساده شده زیر را برای محاسبه ET_o در شرایطی که داده‌های سرعت باد در دسترس نباشند ارائه داد:

$$ET_o \approx 0.0393R_s \sqrt{T+9.5} - 0.19R_s^{0.6} \phi^{0.15} + 0.078(T+20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) \quad (4)$$

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی مدل‌های مختلف برآورد ET_o از داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک مشهد در استان خراسان رضوی (طول جغرافیایی $E 38^{\circ} 59'$ ، عرض جغرافیایی $N 36^{\circ} 16'$ و ارتفاع ۹۹۹/۲ متر از سطح دریا) که در اقلیم نیمه‌خشک (روش دومارتن) واقع شده است، استفاده گردید. داده‌های مورد استفاده شامل دمای حداکثر (T_{max})، دمای حداقل (T_{min})، رطوبت نسبی حداقل (RH_{min})، رطوبت نسبی حداکثر (RH_{max})، ساعات آفتابی (n) و سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر حسب متر بر ثانیه (U_2) به صورت روزانه از ابتدای سال ۱۹۹۶ میلادی تا پایان ۲۰۰۸ (۱۳ سال) می‌باشند.

روش‌های محاسبه ET_o

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

روش فائو- پنمن- مانتیث (FAO-PM)

این روش به عنوان روش استاندارد و دقیق‌ترین روش محاسبه تبخیر-تعرق می‌باشد (Allen et al., 1998). معادله این روش به صورت زیر می‌باشند:

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

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 ($^{\circ}C$)، 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 ($kPa^{\circ}C^{-1}$)، γ ضریب رطوبتی ($kPa^{\circ}C^{-1}$)، G = شار گرما به داخل خاک



بوده و این فرض توسط محققین نیز پذیرفته شده است (Popova et al., 2006). در این مطالعه، از داده‌های سرعت باد میانگین ایستگاه و همچنین پیش‌فرض ۲ متر بر ثانیه، برای مقایسه مدل‌ها استفاده شده است.

زمانی 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:

$$e_a = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right) \quad (۸)$$

آنالیز داده‌ها

این پژوهش در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول مقایسه روش‌های برآورد ET_0 در کل دوره آماری انجام شد. در مرحله دوم ابتدا برای ۸۰ درصد ابتدایی داده‌ها (از ابتدای ۱۹۹۶ تا پایان ۲۰۰۵) مدل‌ها واسنجی شدند و برای ۲۰ درصد انتهایی (از ابتدای ۲۰۰۶ تا پایان ۲۰۰۸) ارزیابی گردیدند (Li et al., 2010). نتایج ET_0 تخمین زده شده با روش FAO PM با داده‌های مفقود ذکر شده در بالا با ET_0 تخمین زده شده با مجموعه کامل داده‌ها مقایسه شد. به طور مشابه ET_0 تخمین زده با روش‌های جایگزین و روش FAO-PM نیز مقایسه گردید. در این مطالعه روش‌های تجربی نیز برای هر ایستگاه از 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 در نظر گرفتن عرض از مبدأ خط رگرسیون برابر با صفر ($a=0$)، تجزیه و تحلیل شدند. از شیب خط رگرسیون (b) و ضریب تعیین (R^2) برای دقت اندازه‌گیری‌ها استفاده گردید. بهترین حالت زمانی می‌باشد که شیب خط رگرسیون و ضریب تبیین برابر ۱ باشند. برای مقایسه و ارزیابی هر یک از روش‌ها با روش FAO-PM از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، میانگین مجذور

همچنین (Valiantzas (2013) معادله ساده شده زیر را برای محاسبه ET_0 در شرایطی که داده‌های سرعت باد و رطوبت نسبی در دسترس نباشند ارائه داد:

$$ET_0 \approx 0.0393R_s \sqrt{T+9.5} - 0.19R_s^{0.6} \phi^{0.15} + 0.0061(T+20)(1.12T - T_{\min} - 2)^{0.7} \quad (۵)$$

(Kisi (2013) نشان داد اگر در معادله ۵ عبارت $(1.12T - T_{\min})$ کمتر از ۲ باشد، معادله مذکور قابل کاربرد نیست، لذا معادله زیر را به جای معادله ۵ پیشنهاد کرد:

$$ET_0 = 0.0393R_s \sqrt{|T+9.5|} - 0.19R_s^{0.6} \phi^{0.15} + 0.0061(T+20)(|1.12T - T_{\min} - 2|)^{0.7} \quad (۶)$$

در معادلات ۴ تا ۶، R_s تابش خورشیدی روزانه، T میانگین دمای روزانه، ϕ عرض جغرافیایی (رادیان)، RH میانگین رطوبت نسبی روزانه، T_{\min} حداقل دمای روزانه می‌باشند.

روش‌های جایگزین برای تخمین داده‌های اقلیمی

استفاده از معادله فائو-پنمن-مانتیت زمانی که همه داده‌های هواشناسی به طور کامل باشند، امکان‌پذیر می‌باشد. از طرفی (Allen et al. (1998) نشان دادند که این روش را می‌توان در شرایط محدودیت داده‌های اقلیمی، از طریق برآورد داده‌های غیرموجود استفاده کرد. در مورد داده‌های مفقود تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های درجه حرارت حداقل و حداکثر و تابش فرازمینی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_s = K_{R_s} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad (۷)$$

که در آن K_{R_s} ضریب تجربی است که مقدار آن بین ۰/۱۶ تا ۰/۱۹ می‌باشد. در این مطالعه مقدار این ضریب ۰/۱۶ در نظر گرفته شده است (Sentelhas et al., 2010).

وقتی که داده‌های سرعت باد موجود نباشند بر طبق دستورالعمل ارائه شده توسط (Allen et al. (1998) بهترین روش استفاده از داده‌های سرعت باد نزدیک‌ترین ایستگاه مورد نظر در منطقه می‌باشد. از طرفی اثر سرعت باد بر ET_0 نسبتاً کم (به جز مناطق بسیار خشک و بادخیز)

مانتیت و $ET_{o_{est}}$ تبخیر- تعرق برآورد شده با روش‌های تجربی می‌باشد.

نتایج و بحث

در جدول ۱ برخی از پارامترهای آماری داده‌های مورد استفاده در طول دوره آماره شده است. همچنین اثر هر کدام از متغیرهای هواشناسی بر تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده با روش FAO-PM نیز ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد دمای حداکثر و حداقل نسبت به سایر پارامترها بیشترین همبستگی را با تبخیر-تعرق گیاه مرجع دارد. ضریب تبیین (R^2) بین برآوردهای ET_o روزانه و متغیرهای اقلیمی برای دمای حداکثر ($R^2=0.86$) بیشترین مقدار و برای سرعت باد در ارتفاع دو متری ($R^2=0.34$) کمترین مقدار بود.

مربعیات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) با روابط زیر استفاده شده است:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{o_{FAO-PM}} - ET_{o_{FAO-PM-AVE}})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{o_{est}} - ET_{o_{FAO-PM-AVE}})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{o_{est}} - ET_{o_{FAO-PM}})^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ET_{o_{est}} - ET_{o_{FAO-PM}}| \quad (11)$$

در معادلات بالا $ET_{o_{FAO-PM}}$ تبخیر- تعرق برآورد شده با روش فائو- پنمن- مانتیت، $ET_{o_{FAO-PM-AVE}}$ متوسط تبخیر- تعرق برآورد شده با روش فائو- پنمن-

جدول (۱): برخی از پارامترهای آماری داده‌های مورد استفاده در طول دوره آماری

پارامتر	دمای حداکثر	دمای حداقل	رطوبت نسبی حداقل	رطوبت نسبی حداکثر	ساعات آفتابی	سرعت باد
حداکثر	۴۲/۸	۲۷/۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۴	۳۴/۷۸
حداقل	-۹	-۲۱	۰/۸	۱۲	۰	۰
میانگین	۲۲/۳۳	۹/۲۶	۳۲/۲۸	۷۲/۵۶	۸/۱۸	۴/۴۸
ضریب تبیین	۰/۸۶	۰/۷۹	۰/۴۵	۰/۶۹	۰/۵۷	۰/۳۴

والیانتز، برای هر معادله سه ضریب واسنجی تعریف گردد و این ضرایب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی MHBMO واسنجی گردند. با این حال، در این مطالعه روش جدیدی برای اصلاح مدل‌های والیانتز پیشنهاد شده است. بدین ترتیب در معادلات ۴ و ۵ به جای پارامتر دمای متوسط از فاکتور دمای مؤثر با رابطه زیر که توسط Camargo et al. (1999) پیشنهاد شده است، استفاده گردید:

$$T_{eff} = \beta(3T_{max} - T_{min}) \quad (12)$$

در این معادله T_{min} و T_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل دمای روزانه و β پارامتر کامارگو می‌باشد که مقدار آن ۰/۳۶ پیشنهاد شده است. در معادلات والیانتز ضریب β با کاربرد فاکتور دمای مؤثر 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

مقایسه مدل‌های برآورد ET_o در دوره واسنجی

برای ارزیابی و واسنجی مدل‌های مختلف به کار برده شده در این پژوهش، مجموعه داده‌های روزانه به دو قسمت تقسیم شد. ۸۰ درصد سالهای ابتدایی جهت واسنجی مدل-ها و ۲۰ درصد انتهایی جهت ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌های واسنجی شده شامل مدل‌های والیانتز در شرایط کمبود داده (معادلات ۴ و ۵)، پریستلی-تایلور (معادله ۲) و هارگریوز (معادله ۳) می‌باشند.

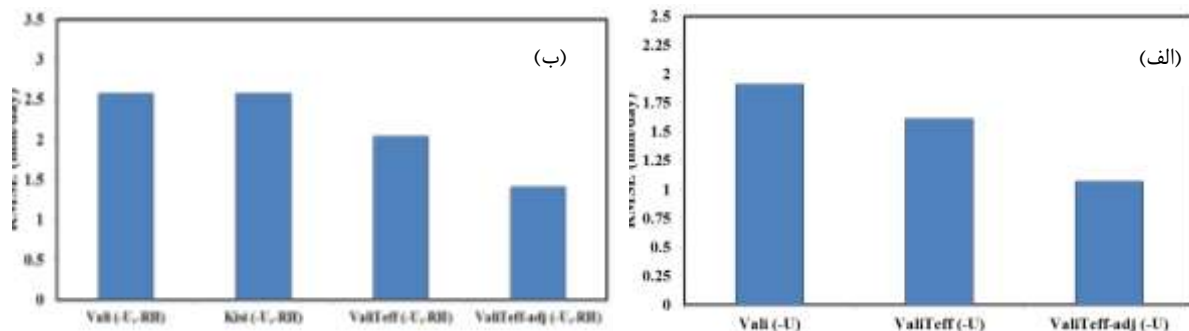
محققین مختلفی برای اصلاح مدل‌های والیانتز پیشنهادهایی ارائه کرده‌اند. به عنوان مثال Kisi (2013) نشان داد اگر در معادله ۵ عبارت $(1.12T - T_{min})$ کمتر از ۲ باشد، معادله مذکور قابل کاربرد نیست، لذا پیشنهاد کرد قبل از استفاده از عبارت $(1.12T - T_{min} - 2)$ در معادله ۵ قدر مطلق گرفته شود. همچنین Ahoghalandari et al. (2017) پیشنهاد کرد قبل از استفاده از معادلات

با در نظر گرفتن متوسط سرعت باد در ایستگاه، کمتر می-باشد.

نتایج مقایسه مدل‌های دو پارامتری (با ورودی دما و ساعات آفتابی) نشان داد مدل والیانتر پس از واسنجی بالا-ترین عملکرد را داشت. به طوری که مقدار شیب خط در مدل والیانتر در فرم اصلی از ۱/۵۶ به ۱/۲۷ و با واسنجی ضریب β به ۱/۰۰ رسیده است. همچنین مقدار MAE از ۱/۹۹ میلی‌متر در روز به ۱/۱۳ میلی‌متر در روز کاهش یافته است. با توجه به شکل ۱-ب اختلاف خاصی بین مدل‌های والیانتر و Kisi در این سناریو مشاهده نشد؛ اما با کاربرد فاکتور دمای مؤثر مقدار RMSE از ۲/۵۷ میلی‌متر در روز به ۲/۰۴ میلی‌متر در روز و با واسنجی ضریب β به ۱/۴۱ میلی‌متر در روز کاهش یافته است. مقدار ضریب β در این حالت ۰/۴۶۱ محاسبه گردید. با واسنجی مدل پرستی-تایلور مقدار RMSE از ۳/۲۱ به ۱/۴۸ میلی‌متر در روز و مقدار MAE از ۲/۵۵ به ۱/۱۳ میلی‌متر در روز کاهش یافته است. مقدار ضریب معادله پرستی-تایلور اصلاح شده ۲/۲۴ محاسبه گردید.

با یک انجام شد. همچنین ضرایب تجربی معادلات هارگریوز (۲۰۰۳/۰) و پرستی-تایلور (۱/۲۶) مورد واسنجی قرار گرفتند. با محاسبه شاخص‌های آماری بدون عمل واسنجی و با عمل واسنجی، میزان واسنجی بر کارایی معادلات تبخیر تعرق مرجع محاسبه شده است (جدول ۲ و شکل ۱).

با توجه به نتایج جدول ۲ در شرایط کمبود داده سرعت باد، شیب خط در مدل والیانتر در فرم اصلی از ۱/۳۵ به ۱/۲۲ و با واسنجی ضریب β به ۱/۰۰ رسیده است. مقدار ضریب β در این حالت ۰/۵۲۷ محاسبه گردید. همچنین مقدار MAE از ۱/۴۲ میلی‌متر در روز به ۰/۸۲ میلی‌متر در روز کاهش یافته است. همانطور که در شکل ۱-الف نیز نشان داده شده است مقدار RMSE در فرم اصلی از ۱/۹۱ میلی‌متر در روز به ۱/۶۱ میلی‌متر در روز و با واسنجی ضریب β به ۱/۰۷ میلی‌متر در روز کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد در شرایط کمبود داده سرعت باد عملکرد مدل والیانتر به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است، گرچه باز هم دقت آن در مقایسه با مدل FAO-PM



شکل ۱: ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از روش‌های والیانتر و Kisi در دوره

واسنجی الف) داده غیرموجود سرعت باد ب) داده غیرموجود سرعت باد و رطوبت نسبی

* Vali (-U): معادله اصلی والیانتر با داده مفقود سرعت باد، Vali Teff (-U): معادله اصلاح شده والیانتر با داده مفقود سرعت باد ($\beta = 0.36$)، Vali Teff-adj (-U): معادله اصلاح شده والیانتر با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی، Kisi (-U, -RH): معادله Kisi با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی، Vali Teff (-U, -RH): معادله اصلاح شده والیانتر با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی ($\beta = 0.36$)، Vali Teff-adj (-U, -RH): معادله اصلاح شده والیانتر با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی ($\beta = 0.461$)

مقادیر RMSE و MAE در روش هارگریوز اصلاح شده به ترتیب ۱/۰۸ و ۰/۸۱ میلی‌متر در روز می‌باشند، در حالی که مقادیر شاخص‌های مذکور در روش FAO-PM به

نتایج مقایسه مدل‌های تک پارامتری (با ورودی داده دمای هوا) در دوره واسنجی نشان داد که دقت روش هارگریوز اصلاح شده بالاتر از روش FAO-PM می‌باشد.



مقدار ضریب معادله هارگریوز اصلاح شده ۰/۰۰۱۴۲۵ محاسبه گردید.

ترتیب ۲/۰۲ و ۱/۴۰ میلی‌متر در روز می‌باشند. این نتایج نشان می‌دهد با واسنجی معادله هارگریوز دقت این معادله از روش FAO-PM در شرایط کمبود داده بالاتر است.

جدول (۲): مقایسه مدل‌های برآورد ET_0 در شرایط کمبود داده با روش FAO PM با داده‌های کامل هواشناسی (دوره واسنجی)

مدل	b	R ²	RMSE (mm/day)	MAE (mm/day)
ET_0 (-U), U=2 m/s	۱/۴۲	۰/۹۴	۲/۱۱	۱/۵۲
ET_0 (-U), U= U _{avg}	۱/۰۵	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۶۳
Vali (-U)	۱/۳۵	۰/۹۴	۱/۹۱	۱/۴۲
Vali _{Teff} (-U)	۱/۲۲	۰/۹۱	۱/۶۱	۱/۱۴
Vali _{Teff-adj} (-U)	۱/۰۰	۰/۹۱	۱/۰۷	۰/۸۲
ET_0 (-U,-RH)	۱/۳۰	۰/۹۰	۱/۸۷	۱/۳۳
Vali (-U,-RH)	۱/۵۶	۰/۹۲	۲/۵۷	۱/۹۹
Kisi (-U,-RH)	۱/۵۶	۰/۹۲	۲/۵۷	۱/۹۹
Vali _{Teff} (-U,-RH)	۱/۲۷	۰/۸۳	۲/۰۴	۱/۴۸
Vali _{Teff-adj} (-U,-RH)	۱/۰۰	۰/۸۵	۱/۴۱	۱/۱۳
PT (-U,-RH)	۱/۷۹	۰/۸۳	۳/۲۱	۲/۵۵
PT _{adj} (-U,-RH)	۱/۰۰	۰/۸۳	۱/۴۸	۱/۱۳
ET_0 (-Rs,-U,- RH)	۱/۳۲	۰/۸۷	۲/۰۲	۱/۴۰
HA (-Rs,-U,- RH)	۰/۶۲	۰/۹۱	۴/۱۱	۳/۵۵
HA _{adj} (-Rs,-U,- RH)	۱/۰۰	۰/۹۱	۱/۰۸	۰/۸۱

* ET_0 (-U): معادله FAO PM با داده مفقود سرعت باد (U=2 m/s)، ET_0 (-U): معادله FAO PM با داده مفقود سرعت باد (U= U_{avg})، Vali (-U): معادله اصلی والیانز با داده مفقود سرعت باد، Vali Teff (-U): معادله اصلاح شده والیانز با داده مفقود سرعت باد ($\beta = 0.36$)، Vali Teff-adj (-U): معادله اصلاح شده والیانز با داده مفقود سرعت باد ($\beta = 0.527$)، ET_0 (-U,-RH): معادله FAO PM با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی (U= U_{avg})، Vali (-U,-RH): معادله اصلی والیانز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی، Kisi (-U,-RH): معادله Kisi با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی، Vali Teff (-U,-RH): معادله اصلی اصلاح شده والیانز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی ($\beta = 0.36$)، Vali Teff-adj (-U,-RH): معادله اصلاح شده والیانز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی ($\beta = 0.461$)، PT: معادله پریستلی-تایلور، PT_{adj}: معادله پریستلی-تایلور اصلاح شده، ET_0 (-Rs,-U,-RH): معادله FAO PM با داده مفقود تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی (U= U_{avg})، HA: معادله هارگریوز، HA_{adj}: معادله هارگریوز اصلاح شده

مقایسه مدل‌های برآورد ET_0 در دوره ارزیابی

همانگونه که قبلاً ذکر گردید ۲۰ درصد سال‌های انتهایی جهت ارزیابی مدل‌های کالیبره شده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۳ در گروه اول در شرایط کمبود داده سرعت باد، مدل FAO PM با در نظر گرفتن متوسط سرعت باد در ایستگاه، بالاترین دقت را داشت، به طوری که مقدار شاخص‌های RMSE و MAE به ترتیب ۱/۰۲ و ۰/۷۵ میلی‌متر در روز می‌باشند. این نتایج با مطالعات Djaman et al. (2016 b) و دهقان و علیزاده (۱۳۹۱) همخوانی دارد. مدل والیانز اصلاح شده در این سناریو در جایگاه دوم قرار گرفت. همچنین در شکل ۲- الف نتایج

محاسبه RMSE در مدل والیانز به فرم اصلی، والیانز با کاربرد دمای مؤثر و والیانز با واسنجی دمای مؤثر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با اصلاح معادله والیانز مقدار RMSE به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است، به طوری که مقدار RMSE در فرم اصلی ۲/۰۴ میلی‌متر در روز، والیانز با کاربرد دمای مؤثر ۱/۷۸ میلی‌متر در روز و والیانز با واسنجی دمای مؤثر ۱/۱۷ میلی‌متر در روز می‌باشد (شکل ۲- الف).

در گروه دوم که مبتنی بر پارامترهای ورودی دما و ساعات آفتابی (تابش خورشیدی) می‌باشند، بهترین مدل برای تخمین ET_0 مدل واسنجی شده والیانز می‌باشد که دارای MAE برابر با ۱/۲۶ میلی‌متر در روز است. در شکل



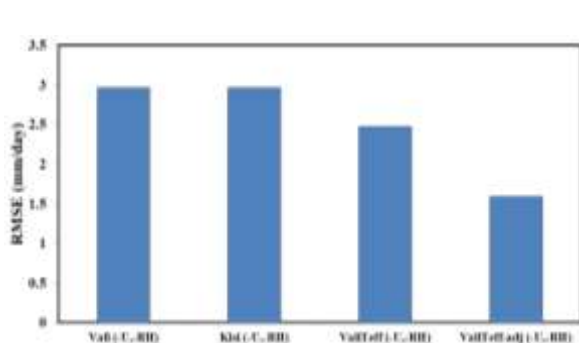
سوم که معادلات آن نیازمند داده‌های دمایی روزانه می‌باشند، مدل هارگریوز اصلاح شده با کم‌ترین RMSE به میزان ۱/۲۵ میلی‌متر در روز از دقت بالاتری برخوردار است. نتایج مطالعه دهقان و علیزاده (۱۳۹۱) نیز نشان داد در شرایط محدودیت داده‌های اقلیمی دقت معادلات پریستلی-تایلور و هارگریوز اصلاح شده در مقیاس ماهانه بالاتر از روش FAO PM می‌باشد.

۲- ب نیز نتایج محاسبه RMSE در مدل‌های والیانتز و Kisi نشان داده شده است. مشابه با مدل قبلی در این سناریو نیز با واسنجی معادله والیانتز مقدار RMSE به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است، به طوری که مقدار آن در فرم اصلی ۲/۹۶ میلی‌متر در روز و در فرم واسنجی شده ۱/۵۹ میلی‌متر در روز می‌باشد. بعد از مدل والیانتز معادله پریستلی-تایلور اصلاح شده با MAE ۱/۲۹ میلی‌متر در روز بالاترین دقت را داشت. این نتایج نشان می‌دهد دقت معادلات واسنجی شده (والیانتز و پریستلی-تایلور) بیشتر از مدل FAO PM در شرایط کمبود داده می‌باشد. در گروه

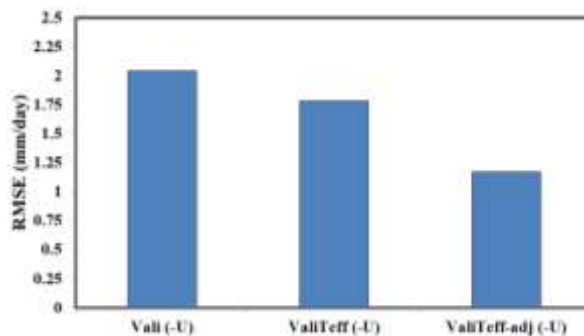
جدول (۳): مقایسه مدل‌های برآورد ET_0 در شرایط کمبود داده با روش FAO PM با داده‌های کامل هواشناسی (دوره ارزیابی)

MAE (mm/day)	RMSE (mm/day)	R ²	b	مدل
۱/۷۴	۲/۳۹	۰/۹۴	۱/۴۳	ET_0 (-U), U=2 m/s
۰/۷۵	۱/۰۲	۰/۹۴	۱/۰۳	ET_0 (-U), U= U _{avg}
۱/۵۲	۲/۰۴	۰/۹۴	۱/۳۴	Vali (-U)
۱/۳۳	۱/۷۸	۰/۹۱	۱/۲۳	Vali _{Teff} (-U)
۰/۹۰	۱/۱۷	۰/۹۱	۱/۰۰	Vali _{Teff-adj} (-U)
۱/۷۱	۲/۳۰	۰/۹۰	۱/۳۶	ET_0 (-U,-RH)
۲/۳۲	۲/۹۶	۰/۹۲	۱/۶۱	Vali (-U,-RH)
۲/۳۲	۲/۹۶	۰/۹۲	۱/۶۱	Kisi (-U,-RH)
۱/۸۸	۲/۴۷	۰/۸۳	۱/۳۶	Vali _{Teff} (-U,-RH)
۱/۲۶	۱/۵۹	۰/۸۵	۱/۰۷	Vali _{Teff-adj} (-U,-RH)
۳/۰۸	۳/۸۳	۰/۸۴	۱/۹۵	PT (-U,-RH)
۱/۲۹	۱/۷۰	۰/۸۴	۱/۱۰	PT _{adj} (-U,-RH)
۱/۷۸	۲/۴۷	۰/۸۸	۱/۴۱	ET_0 (-Rs,-U,- RH)
۳/۳۷	۳/۸۹	۰/۹۱	۰/۶۶	HA (-Rs,-U,- RH)
۰/۹۳	۱/۲۵	۰/۹۱	۱/۰۶	HA _{adj} (-Rs,-U,- RH)

ET_0 (-U): معادله FAO PM با داده مفقود سرعت باد (U=2 m/s)، ET_0 (-U): معادله FAO PM با داده مفقود سرعت باد (U=U_{avg})، Vali (-U): معادله اصلی والیانتز با داده مفقود سرعت باد، Vali Teff (-U): معادله اصلاح شده والیانتز با داده مفقود سرعت باد ($\beta = 0.36$)، Vali Teff-adj (-U): معادله اصلاح شده والیانتز با داده مفقود سرعت باد ($\beta = 0.527$)، ET_0 (-U,-RH): معادله FAO PM با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی (U=U_{avg})، Vali (-U,-RH): معادله اصلی والیانتز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی، Kisi (-U,-RH): معادله Kisi با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی، Vali Teff (-U,-RH): معادله اصلاح شده والیانتز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی ($\beta = 0.36$)، Vali Teff-adj (-U,-RH): معادله اصلاح شده والیانتز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی ($\beta = 0.461$)، PT: معادله پریستلی-تایلور، PT_{adj}: معادله پریستلی-تایلور اصلاح شده، ET_0 (-Rs,-U,-RH): معادله FAO PM با داده مفقود تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی (U=U_{avg})، HA: معادله هارگریوز، HA_{adj}: معادله هارگریوز اصلاح شده



(ب)



(الف)

شکل (۲): ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تخمین تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از روشهای والیانتز و Kisi در دوره ارزیابی الف) داده غیرموجود سرعت باد ب) داده غیرموجود سرعت باد و رطوبت نسبی: Vali (-U): معادله اصلی والیانتز با داده مفقود سرعت باد، Vali Teff (-U): معادله اصلاح شده والیانتز با داده مفقود سرعت باد ($\beta = 0.527$)، Vali (-U,-RH): معادله اصلی والیانتز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی، Kisi (-U,-RH): معادله اصلی والیانتز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی، Vali Teff (-U,-RH): معادله اصلاح شده والیانتز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی ($\beta = 0.36$)، Vali Teffadj (-U,-RH): معادله اصلاح شده والیانتز با داده مفقود سرعت باد و رطوبت نسبی ($\beta = 0.461$)

ورودی دما و ساعات آفتابی) نشان داد مدل والیانتز اصلاح شده در این مقاله نسبت به سایر روشها بالاترین دقت را داشت. نتایج نشان داد در صورتی که در ایستگاه تنها داده دمای هوا موجود باشد، روش هارگریوز اصلاح شده نسبت به روش فائو در شرایط کمبود داده بالاترین دقت را داشت. نتایج این مطالعه در شرایط مختلف کمبود داده‌های سرعت باد و رطوبت نسبی در سایر ایستگاه‌های هواشناسی که دارای اقلیم مشابه با ایستگاه مورد مطالعه هستند، قابل کاربرد است. پیشنهاد می‌گردد معادلات والیانتز اصلاح شده در این مقاله، در سایر اقلیم‌های کشور نیز بررسی و صحت-سنجی گردند و در صورت مناسب بودن، برای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری در مزرعه مورد استفاده قرار گیرند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روش‌های جدید والیانتز، مدل‌های پرستلی- تایلور، هارگریوز و روش پیشنهادی فائو در شرایط کمبود داده برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در ایستگاه سینوپتیک مشهد مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد در شرایط کمبود داده سرعت باد مدل FAO با در نظر گرفتن متوسط سرعت باد در ایستگاه، بالاترین دقت را دارد. در این مقاله تحت شرایط کمبود داده سرعت باد و رطوبت نسبی، با اصلاح مدل والیانتز با کاربرد فاکتور دمای مؤثر یک مدل جدید برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع ارائه شد. نتایج مقایسه مدل‌های دو پارامتری (با

منابع

- توکلی، ا.، ب. قهرمان، ک. داوری و ح. انصاری. ۱۳۹۲. برآورد تبخیر- تعرق مرجع در شرایط کمبود داده (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال هفدهم، شماره ۶۰، ص ۲۲۲-۲۱۱.
- دهقان، ه. و ا. علیزاده. ۱۳۹۱. ارزیابی و واسنجی روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در شرایط محدودیت داده‌های اقلیمی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۶، شماره ۱، ص ۲۳۶-۲۵۰.
- نوروزی، ۱۳۹۶. بخش کشاورزی و لزوم توسعه پایدار در ایران. معاونت بررسی‌های اقتصادی. اتاق بازرگانی، صنایع معادن و کشاورزی تهران.



- Ahooghalandari, M., M. Khiadani and M. E. Jahromi. 2017. Calibration of Valiantzas' reference evapotranspiration equations for the Pilbara region, Western Australia. *Theoretical and Applied Climatology*, 128(3-4): 845-856.
- Allen R.G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 300(9): D05109.
- Djaman, K., S. Irmak and K. Futakuchi. 2016 a. Daily reference evapotranspiration estimation under limited data in eastern Africa. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4): 06016015.
- Djaman, K., S. Irmak, I. Kabenge and K. Futakuchi. 2016 b. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith Model with Limited Data and the Valiantzas Models for Estimating Grass-Reference Evapotranspiration in Sahelian Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(11): 04016044.
- Djaman, K., D. Rudnick, V. C. Mel, D. Mutibwa, L. Diop, M. Sall, I. Kabenge, A. Bodian, H. Tabari and S. Irmak. 2017. Evaluation of Valiantzas' Simplified Forms of the FAO-56 Penman-Monteith Reference Evapotranspiration Model in a Humid Climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8): 06017005.
- Hargreaves G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2): 96-99.
- Jabloun, M. D., and A. Sahli. 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia. *Agricultural water management*, 95(6): 707-715.
- Kisi, O. 2013. Comparison of different empirical methods for estimating daily reference evapotranspiration in Mediterranean climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(1): 04013002.
- Li, Y., R. Horton, T. Ren and C. Chen. 2010. Prediction of annual reference evapotranspiration using climatic data. *Agricultural Water Management*, 97(2): 300-308.
- Popova, Z., M. Kercheva and L. S. Pereira. 2006. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to South Bulgaria. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 55(2): 201-215.
- Priestley, C. H. B and R. J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2): 81-92.
- Sentelhas, P. C., T. J. Gillespie and E. A. Santos. 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97 (5): 635-644.
- Suleiman, A. A and G. Hoogenboom. 2007. Comparison of Priestley-Taylor and FAO-56 Penman-Monteith for daily reference evapotranspiration estimation in Georgia. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(2): 175-182.
- Tomas-Burguera, M., S. M. Vicente-Serrano, M. Grimalt and S. Beguería. 2017. Accuracy of reference evapotranspiration (ET_o) estimates under data scarcity scenarios in the Iberian Peninsula. *Agricultural water management*, 182: 103-116.
- Valiantzas, J. D. 2013. Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited weather data. *Journal of Hydrology*, 505: 13-23.
- Valipour, M. 2015. Investigation of Valiantzas' evapotranspiration equation in Iran. *Theoretical and applied climatology*, 121(1-2): 267-278.



Evaluation and Modification of Valiantzas Models for the Reference Evapotranspiration Estimation by Lack of Data

Hadi Dehghan^{*}, Mehdi Mokari²

Abstract

The precise estimation of reference crop evapotranspiration (ET_0) has a significant role in improving water management in field and irrigation management. Different methods are available for ET_0 estimating. The FAO-PM equation is the most reliable method for ET_0 estimating, but this method requires large input data that is not fully measured in most meteorological stations. Also, the measured data lacks enough precision, especially in developing countries. Therefore, the researchers have used the empirical equations with minimum input data. In this study, the daily values of ET_0 were calculated at the synoptic station of Mashhad using Priestley-Taylor, Hargreaves, the FAO-PM proposed method by the lack of data and two forms of the Valiantzas equation. Then, the calculated values were compared with FAO Penman Monteith (PM) method. In this paper, new models for estimating ET_0 were presented by lack of wind speed and relative humidity data by modifying two forms of the Valiantzas equations. The results showed that by the lack of wind speed and relative humidity data, the modified Valiantzas model had the highest accuracy compared with the other methods. It was showed that the R^2 , RMSE and MAE indices were 0.85, 1 and 1.26 mm per day, respectively. Also, the results showed that the modified Hargreaves method had the highest accuracy when only temperature data is available.

Keywords: Reference Evapotranspiration, Penman-Monteith, Lack of Data, Valiantzas, Priestley and Taylor, Hargreaves

1- Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute, Kashmar, Iran. h.dehghan@kashmar.ac.ir

2- Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute, Kashmar, Iran. Mehdimokari@gmail.com