

مقاله پژوهشی

واسنجی و ارزیابی پنج روش تخمین تبخیر-تعرق مرجع مبتنی بر تشعشع خورشیدی در استان یزد

ناصر شیری^{۱*}، محمد حسین کاظمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸

۱- دانش آموخته مهندسی عمران- محیط زیست، دانشکده فنی عمران، دانشگاه تبریز

۲- دانشجو دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nasershiri75@yahoo.com

چکیده

هدف این مطالعه مقایسه و واسنجی پنج روش مختلف تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مقیاس داده‌های نه‌ساله روزانه در استان یزد می‌باشد. روش‌های انتخاب شده شامل هارگریوز - سامانی HS، پریستلی - تیلور PT، تورک Turc، مک کینگ MK و دالتون D بودند. برای این منظور از اطلاعات ده ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در دوره آماره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. نتایج روش‌ها مذکور با روش FPM-56 مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با استفاده از روش FPM-56 نتایج روش‌های مذکور برای ایستگاه‌های مورد مطالعه واسنجی شدند. برای ارزیابی نتایج از معیارهای آماری RMSE، NS، SI، MAE، R^2 استفاده شد. نتایج نشان داد که قبل از واسنجی نتایج روش‌های مختلف اختلاف زیادی با FPM-56 دارند. تنها مدل قابل قبول قبل از واسنجی مدل HS بود. بعد از واسنجی نتایج مدل‌ها بهبود یافت و مدل D که قبل از واسنجی بدترین مدل بود، بعد از واسنجی بهترین مدل تخمین تبخیر-تعرق در استان یزد در بین پنج روش منتخب شناخته شد. مقادیر میانه مدل D قبل از واسنجی $MAE=3/83$ ، $RMSE=4/21$ ، $SI=0/83$ ، $NS=-1/99$ ، $R^2=0/84$ ، و بعد از واسنجی $MAE=0/83$ ، $RMSE=1/02$ ، $SI=0/22$ ، $NS=-0/72$ ، $R^2=0/86$ و همچنین مقادیر R^2 در رده‌های بعدی بهترین مدل قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق، تابش، فائو-پنمن-مانتیث، واسنجی، یزد

Calibration and Evaluation of Five Radiation-Based Reference Evapotranspiration Estimation Methods in Yazd Province

N Shiri^{1*}, M H Kazemi²

Received: July 9, 2022

Accepted: April 17, 2021

1 Graduated Civil and Environmental Eng., Faculty of Civil Eng., Univ. of Tabriz, Iran

2 PhD Student, Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

* Corresponding Author, Email: nasershiri75@yahoo.com

Abstract

The purpose of this study was to compare and evaluate five different methods of estimating the evapotranspiration of the reference plant on a nine-year daily data scale in Yazd province. Selected methods included Hargreaves-Samani (HS), Priestley-Taylor (PT), Turk (Turc), Makkink (MK) and Dalton (D). For this purpose, data from ten synoptic meteorological stations were used covering a period of 9 years. The results of the mentioned methods were evaluated by FPM-56 method. Also, using FPM-56 method, the mentioned methods were calibrated for the studied stations. Also, using FPM-56 method, the mentioned methods were calibrated for the studied stations. RMSE, NS, SI, MAE, R^2 statistical criteria were used to evaluate the results. The results showed that before calibration the results of different methods are very different from FPM-56. The only acceptable model before calibration was the HS model. After calibration, the results of the models improved and model D, which was the worst model before calibration, was recognized as the best model for estimating evapotranspiration in Yazd province among the five selected methods. Mean values of Model D before calibration MAE = 3.83, $R^2 = 0.84$, NS = -1.99, SI = 0.83, RMSE = 4.21 and after calibration MAE=0.83, $R^2 = 0.86$, NS=0.72, SI = 0.22, RMSE=1.02 was obtained. After calibration, Turc, PT and MK models were in the next categories of the best models.

Keywords: Calibration, Evapotranspiration, FAO-Penman-Monteith, Radiation, Yazd

مقدمه

از روش‌های پرهزینه هواشناسی که بر پایه بیلان انرژی و نیز انتقال جریان جرم بخار می‌باشند (روش آیرودینامیک و نسبت باون) می‌توان نیاز آبی گیاه را محاسبه نمود. به‌کارگیری لایسیمتر امکان تعیین تبخیر-تعرق را بر اساس اندازه‌گیری برخی از مؤلفه‌های بیلان آب در یک سطح گیاهی کنترل شده فراهم می‌آورد (آلن و همکاران ۱۹۹۸). مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مقدار تخمینی ET_0 با استفاده از روش فائو پنمن-مانتیث (FPM56) در اقلیم‌های مختلف به مقادیر اندازه‌گیری

تبخیر-تعرق (ET) یکی از مؤلفه‌های مهم سیکل هیدرولوژی برای مدیریت بهینه منابع آب می‌باشد. تبخیر-تعرق به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن آب از سطح خاک و گیاه به اتمسفر منتقل می‌شود که این امر از تأثیر توأم تبخیر از سطح خاک و تعرق از روزنه‌های گیاه صورت می‌پذیرد. برآورد دقیق تبخیر-تعرق در تأمین نیاز آبی گیاهان، برنامه‌ریزی آبیاری و مطالعه بیلان آب مخازن، ضروری می‌باشد. از طریق مستقیم و با استفاده

شده نزدیکتر است (آلن و همکاران ۱۹۸۹). مقادیر ET_0 حاصل از لایسیمتر در اکثر موارد قابل دسترس نیست فلذا، واسنجی مدل‌های تجربی تبخیر- تعرق با نتایج حاصل از مدل فائو پنمن- مانتیث (FPM56) واسنجی یا مورد مقایسه قرار میگیرد (آلن و همکاران ۱۹۹۸، لاندراکس و همکاران ۲۰۰۸). سینگ و خو (۱۹۹۷) با بررسی ۱۳ نوع مدل‌های مختلف تبخیر از سطح آزاد آب (بر مبنای انتقال جرم) بهترین مدل که با داده های تشتک تبخیر شمال غرب کانادا سازگاری داشت، انتخاب نموده و آن را واسنجی کردند. خو و سینگ (۲۰۰۰) هشت روش تخمین تبخیر- تعرق بر مبنای تابش را برای ایستگاه چنگینز در سوئیس انتخاب و در مقایسه با تبخیر از تشتک تبخیر واسنجی کردند. رزنبری و همکاران (۲۰۰۴) دوازده مدل مختلف تخمین تبخیر- تعرق را در منطقه داکوتای شمالی آمریکا با روشهای مختلف مورد مقایسه قرار دادند. سنتلهاس و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از اطلاعات ۱۲ ایستگاه هواشناسی واقع در جنوب کانادا مدل‌های ET_0 و TW ، PT را بر اساس نتایج مدل FPM56 واسنجی کردند. ژای و همکاران (۲۰۱۰) نتایج تخمین تبخیر- تعرق حاصل از یازده مدل تجربی را با داده‌های تبخیر از تشتک، در ده ایستگاه هواشناسی واقع در استان گانسو در شمال چین، مقایسه کردند. ابتدا مقایسه تخمین ET_0 با استفاده از مقادیر پیش فرض برای هر یازده مدل انجام شد و سپس مقایسه بعد از واسنجی مدلها تکرار شد. در ایران نیز مطالعات پراکنده‌ای در زمینه تخمین ET_0 با روش‌های مختلف و مقایسه یا واسنجی آنها انجام شده است. شریفیان و همکاران (۲۰۰۶) مقدار ET_0 منطقه گرگان را در مقیاس روزانه برآورد کردند. ایشان از مدل‌های مختلف شامل گروه مدل‌های ترکیبی (مدل‌های پنمن و پنمن اصلاح شده فائو) و دمایی (هارگریوز- سامانی و بلانی- کریدل- فائو) استفاده و نتایج را با مقادیر حاصل از FPM56 در سه وضعیت متفاوت (شامل استفاده از داده‌های اصلاح نشده و داده‌های اصلاح شده در شرایط توصیه شده

برای ایران و جهان) مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند. رحیمی خوب و همکاران (۲۰۰۶) روش‌های تخمین ET_0 با استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی در منطقه خوزستان را با استفاده از معادله FPM56 مورد مقایسه قرار دادند. شهابی‌فر و همکاران (۲۰۱۰) هفت روش مختلف تبخیر- تعرق را با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر در ایستگاه تهران مقایسه کردند. دهقانی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های روزانه تنها ایستگاه گرگان مقادیر ET_0 را با روش‌های HG ، $FPM56$ ، PT ، T و M تخمین زدند. مندی سینو و سناتور (۲۰۱۳) با انجام مطالعه‌ای در مناطق جنوبی ایتالیا در بیش از ۱۳۷ ایستگاه هواشناسی به واسنجی منطقه‌ای مدل هارگریوز- سامانی پرداخته و ضریب اصلاحی متناسب با منطقه موردنظر را استخراج نمودند. بر اساس یافته‌های این مطالعه، ضرایب اصلاحی جدید استخراج شده که با بررسی همبستگی آن‌ها با اختلاف دمای بیشینه و کمینه روزانه مورد بررسی و تعدیل و تصحیح نهایی قرار گرفته‌اند سبب افزایش ۲۲ درصدی دقت مدل هارگریوز- سامانی در منطقه مذکور شده‌اند. تائو و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای به بررسی قابلیت‌های مدل فازی ترکیبی با الگوریتم کرم شب تاب (ANFIS-FA) برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع روزانه در منطقه بورکینافاسو پرداختند. نتایج مدل‌ها با مدل پنمن- فائو- مونتیت مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که مدل کرم شب تاب بهتر از مدل مبتنی بر ANFIS کلاسیک برای هر سه ایستگاه مورد مطالعه است و مدل با داده‌های آب‌وهوایی کامل که به‌عنوان ورودی استفاده می‌شوند بهترین نتیجه را می‌دهد. باتوجه به پیشینه پژوهش به نظر می‌رسد مطالعه جامعی در زمینه واسنجی مدل‌های مختلف تبخیر- تعرق در استان یزد بر مبنای مدل FPM56 انجام نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه مقایسه و واسنجی روش‌های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع بسط داده شده بر مبنای دمای هوا، تابش و انتقال جرم باتوجه به نتایج روش FPM56 می‌باشد.

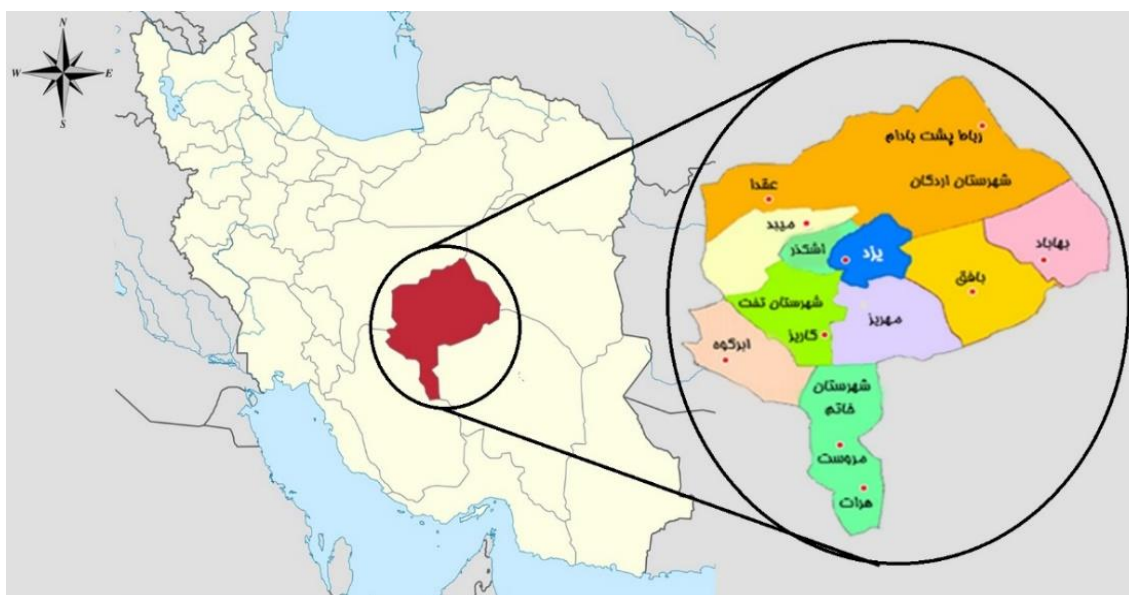
مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه مطالعه جامعی در زمینه واسنجی مدل‌های مختلف تبخیر-تعرق در استان یزد بر مبنای مدل FPM56 انجام نشده است، منطقه مورد مطالعه استان یزد انتخاب شده است که در مرکز ایران واقع شده است، مساحت این استان حدود ۷۶۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. استان یزد دارای آب‌وهوای گرم و خشک است. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل: میانگین حداقل و حداکثر درجه حرارت هوا، ساعات آفتابی، سرعت باد و میانگین رطوبت نسبی در مقیاس روزانه می‌باشد. داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور اخذ شدند. تعداد کمی از داده‌های مذکور ناقص بودند که با روش‌های مناسب بازسازی و قبل از استفاده کنترل کیفی شده است. در این مطالعه از روش‌های تجربی تخمین ET_0 مختلف از قبیل مدل مبتنی بر دمای هوا هارگریوز-سامانی (۱۹۸۵) HS، مدل‌های مبتنی بر تابش خورشیدی؛ پریستلی-تیلور (۱۹۷۲) PT، تورک (۱۹۶۱) Turc، مک کینگ (۱۹۵۷) MK، و مدل مبتنی بر انتقال جرم؛ دالتون (۱۹۰۲) D که به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند، استفاده شده است. برای ارزیابی دقت مدل‌های مذکور و همچنین برای واسنجی مدل‌ها از روش FPM56 استفاده شده است. در این مطالعه تعداد ۱۰ ایستگاه انتخاب شدند. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز مشخصات ایستگاه‌های منتخب را ارائه می‌دهد.

در این تحقیق روش FPM56 به‌عنوان یک روش مبنا برای مقایسه و واسنجی سایر مدل‌های بر مبنای تابش انتخاب گردید. فرم اصلاح شده مدل پنمن-مونتیت که توسط فائو ارائه گردیده است به‌صورت زیر قابل بیان است. این مدل برای یک گیاه فرضی (شبییه چمن) با ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب آلبدو ۰/۲۳ می‌باشد. (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad [1]$$

در رابطه فوق ET_0 برحسب میلی‌متر بر روز، R_n تشعشع خالص رسیده به سطح گیاه برحسب مگاژول بر متر مربع بر روز، G شار گرمای خاک برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز، T_{mean} میانگین دمای روزانه هوا (میانگین دمای بیشینه و کمینه) در ارتفاع دومتری برحسب درجه سانتیگراد، U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دومتری برحسب متر بر ثانیه، e_s میانگین فشار بخار اشباع دمای بیشینه و کمینه برحسب کیلوپاسکال، e_a فشار بخار واقعی برحسب کیلوپاسکال، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع برحسب کیلوپاسکال، Δ شیب منحنی فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس، γ ضریب ثابت سایکرومتری برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد. مقدار چگالی شار حرارتی خاک برای دوره‌های روزانه برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود (بر اساس طبیعت سامانه اقلیمی)، بنابراین برای دوره‌های ماهانه و بیشتر، مقدار آن بایستی بر اساس تفاضل دمایی بین ماه‌های متوالی و ظرفیت حرارتی خاک محاسبه شود.



شکل ۱ - منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های منتخب در استان یزد.

جدول ۱ - مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

دوره آماری	ارتفاع از سطح دریا		عرض جغرافیایی		ایستگاه	کد
	متر (m)	درجه	درجه	درجه		
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۱۵۲۳/۸۰	۳۱/۱۲۰	۵۳/۲۲۷		ابركوه	۱
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۹۹۱/۳۰	۳۱/۶۲۹	۵۵/۴۲۱		بافق	۲
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۱۴۳۶/۰۰	۳۱/۸۴۱	۵۶/۰۴۶		بهباد	۳
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۱۱۸۸/۰۰	۳۳/۰۱۲	۵۵/۵۵۸		رباط پشت بادام	۴
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۱۱۵۰/۰۰	۳۲/۴۴۵	۵۳/۶۴۲		عقدا	۵
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۲۱۰۰/۰۰	۳۱/۳۳۱	۵۴/۰۹۷		گاریز	۶
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۱۵۴۷/۰۰	۳۰/۴۰۴	۵۴/۲۰۱		مروست	۷
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۱۱۰۸/۰۰	۳۲/۲۱۸	۵۳/۹۸۴		میبد	۸
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۱۶۳۳/۰۰	۳۰/۰۲۲	۵۴/۳۸۴		هرات	۹
۲۰۱۰-۲۰۱۸	۱۲۳۰/۲۰	۳۱/۹۰۴	۵۴/۲۸۹		یزد	۱۰

هوای و طول جغرافیایی می‌باشد. در این مطالعه پنج روش تخمین ET_0 مبتنی بر تابش (جدول ۲) برای مقایسه و واسنجی انتخاب گردید. در جدول ۲، R_s تشعشع خالص رسیده به سطح گیاه برحسب مگاژول بر متر مربع بر روز، T_{min} و T_{max} به ترتیب بیشینه و کمینه دمای روزانه هوا در ارتفاع دومتری برحسب درجه سانتیگراد، U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دومتری برحسب متر بر

شکل کلی اکثر روش‌های تخمین ET_0 بر مبنای تابش به شرح زیر است (جنسن و همکاران ۱۹۹۰):

$$\lambda ET_0 = C_r(wR_n) \text{ یا } \lambda ET_0 = C_r(wR_s) \quad [2]$$

که در آن λ گرمای نهان تبخیر، C_r ضریبی که بستگی به سرعت باد و رطوبت نسبی دارد، w ضریب وزنی دمای

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{ET_0}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ET_m - ET_0)^2}}{\overline{ET_0}} \quad [4]$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (ET_m - ET_0)^2}{\sum_{i=1}^N (ET_0 - \overline{ET_0})^2} \quad [5]$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (ET_m - \overline{ET_m})(ET_0 - \overline{ET_0})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (ET_m - \overline{ET_m})^2 \sum_{i=1}^N (ET_0 - \overline{ET_0})^2}} \right]^2 \quad [6]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |ET_m - ET_0|}{N} \quad [7]$$

در روابط اخیر ET_m و ET_0 به ترتیب مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده توسط مدل‌های تجربی و مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیث، $\overline{ET_m}$ و $\overline{ET_0}$ به ترتیب متوسط مقادیر شاهد و مدل، N نمایانگر تعداد داده ها و n نیز گام زمانی مورد نظر می باشد. هرچه NS و R^2 به ۱ نزدیک و SI ، $RMSE$ و MAE کمتر باشد، دقت مدل بیشتر است، و برعکس.

ثانیه، e_s میانگین فشار بخار اشباع دمای بیشینه و کمینه برحسب کیلوپاسکال، e_a فشار بخار واقعی برحسب کیلوپاسکال ($e_s - e_a$) کمبود فشار بخار اشباع برحسب کیلوپاسکال، Δ شیب منحنی فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس، γ ضریب ثابت سایکرومتری برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد می باشد.

در این تحقیق ۵ معیار ارزیابی شامل جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، نمایه پراکندگی (SI)، ضریب نش-ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین (R^2) و خطای مطلق متوسط (MAE) برای بررسی دقت مدل‌ها استفاده شده که معادله هر کدام به شرح زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ET_m - ET_0)^2} \quad [2]$$

جدول ۲- پنج روش انتخاب شده برای تخمین ET_0 .

معادله	مخفف	روش
$ET_0 = 0.0023 \frac{R_a}{\lambda} \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right) \sqrt{T_{\max} - T_{\min}}$	HS	هارگریوز - سامانی
$ET_0 = 1.26 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \lambda} \right) R_n / \lambda$	PT	پریستلی - تیلور
$ET_0 = 0.013 \frac{T}{T + 15} (R_s + 50) \quad RH \geq 50$		
$ET_0 = 0.013 \frac{T}{T + 15} (R_s + 50) \left(1 + \frac{50 - RH}{70} \right) \quad RH \leq 50$	Turc	تورک
$ET_0 = 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s / \lambda - 0.12$	MK	مک کینگ
$ET_0 = (0.3648 + 0.07223 \times U_2) \times (e_s - e_a)$	D	دالتون

نتایج و بحث

قبل از واسنجی روش‌های تخمین تبخیر-تعرق مبتنی بر تابش، با توجه به ارقام نظیر آماره R^2 روش D بهترین مدل است اما با توجه به آماره های نظیر جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، نمایه پراکندگی (SI)، ضریب نش-ساتکلیف (NS)، و خطای مطلق متوسط (MAE) روش HS به عنوان بهترین مدل برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان شناخته شد. میانه $RMSE$ ، SI ، NS و MAE به ترتیب برای مدل HS ۱/۵۹، ۰/۳۱، ۰/۵۷، ۰/۶۷ و ۱/۱۱

مربعیات خطا ($RMSE$)، نمایه پراکندگی (SI)، ضریب نش-ساتکلیف (NS)، و خطای مطلق متوسط (MAE) روش HS به عنوان بهترین مدل برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان شناخته شد. میانه $RMSE$ ، SI ، NS و MAE به ترتیب برای مدل HS ۱/۵۹، ۰/۳۱، ۰/۵۷، ۰/۶۷ و ۱/۱۱

بیشترین مقدار ضریب همبستگی قبل از واسنجی برای مدل D ایستگاه عقدا با ۰/۸۶ است که البته مدل D در ایستگاه عقدا دارای NS=-۱/۷۸ و RMSE=۴/۴ که نشان می‌دهد مدل D علی‌رغم اینکه همبستگی بالایی در ایستگاه عقدا دارد، از میزان خطا بالایی نیز برخوردار است. همچنین باتوجه به این جدول HS در همه ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه قبل از واسنجی بهترین مدل است یعنی مقادیر محاسبه شده با HS به مقادیر FPM-56 نزدیکتر است.

محاسبه شد. پس از روش D روش‌های PT، MK، TURC و D در رده های بعدی قرار دارد. جدول ۳ معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای تخمین ET₀ با ۵ روش تجربی قبل از واسنجی را نشان می‌دهد. همانطور که از این جدول می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر RMSE از کمترین مقدار ۱/۲۵ برای ایستگاه یزد برای مدل HS تا بیشترین مقدار ۴/۶۱ برای ایستگاه بافق برای مدل D تغییر میکند. مقادیر MAE نیز از کمترین مقدار ۰/۸۶ برای مدل HS ایستگاه گاریز تا بیشترین مقدار ۴/۱۷ برای مدل D ایستگاه باق متغیر است. همچنین باتوجه به این جدول

جدول ۳ - معیارهای آماری اندازه‌گیری شده برای تخمین ET₀ با ۵ روش در ایستگاه‌های مورد مطالعه (قبل از واسنجی).

RMSE (mm day ⁻¹)	SI	NS	R ²	MAE (mm)	روش	ایستگاه	RMSE (mm day ⁻¹)	SI	NS	R ²	MAE (mm)	روش	ایستگاه
۱/۳۶	۰/۳۲	۰/۶۱	۰/۶۵	۰/۸۶	HR		۱/۳۳	۰/۲۷	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۹۵	HR	
۲/۱۸	۰/۵۱	۰/۰۱	۰/۶۷	۱/۷۶	PT		۲/۸۳	۰/۵۷	-۰/۴۶	۰/۶۴	۲/۴۱	PT	
۳/۴۱	۰/۸۰	-۱/۴۳	۰/۶۲	۳/۰۴	Turc	گاریز	۳/۸۶	۰/۷۸	-۱/۷۱	۰/۵۵	۳/۴۶	Turc	ابركوه
۲/۶۴	۰/۶۲	-۰/۴۵	۰/۵۴	۲/۱۷	Mk		۳/۲۶	۰/۶۶	-۰/۹۳	۰/۴۱	۲/۷۵	Mk	
۳/۷۸	۰/۸۹	-۱/۹۸	۰/۸۳	۳/۳۸	D		۴/۱۰	۰/۸۳	-۲/۰۵	۰/۸۵	۳/۷۵	D	
۱/۵۲	۰/۳۳	۰/۴۲	۰/۵۸	۱/۱۰	HR		۲/۱۵	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۴۹	۱/۴۲	HR	
۲/۴۶	۰/۵۳	-۰/۴۹	۰/۶۰	۲/۱۰	PT		۳/۳۸	۰/۵۹	-۰/۵۴	۰/۵۴	۲/۸۰	PT	
۳/۵۰	۰/۷۵	-۲/۰۲	۰/۵۳	۳/۱۹	Turc	مروست	۴/۱۸	۰/۷۴	-۱/۳۶	۰/۴۵	۳/۶۲	Turc	بافق
۲/۸۵	۰/۶۱	-۱/۰۱	۰/۴۳	۲/۴۳	Mk		۳/۳۴	۰/۵۹	-۰/۵۱	۰/۴۴	۲/۶۷	Mk	
۳/۸۳	۰/۸۲	-۲/۶۱	۰/۷۸	۳/۵۳	D		۴/۶۱	۰/۸۱	-۱/۸۷	۰/۷۸	۴/۱۷	D	
۱/۸۱	۰/۳۵	۰/۵۶	۰/۶۰	۱/۲۰	HR		۱/۵۰	۰/۳۰	۰/۶۴	۰/۶۸	۱/۰۰	HR	
۳/۱۵	۰/۶۰	-۰/۳۵	۰/۶۹	۲/۶۷	PT		۲/۹۲	۰/۵۹	-۰/۳۶	۰/۶۶	۲/۴۶	PT	
۴/۲۰	۰/۸۰	-۱/۴۰	۰/۶۵	۳/۷۳	Turc	میبد	۳/۸۹	۰/۷۸	-۱/۴۱	۰/۵۹	۳/۴۶	Turc	بهباد
۳/۵۲	۰/۶۷	-۰/۶۸	۰/۵۵	۲/۹۹	Mk		۳/۲۸	۰/۶۶	-۰/۷۱	۰/۴۹	۲/۷۵	Mk	
۴/۳۶	۰/۸۳	-۱/۵۸	۰/۸۲	۳/۹۰	D		۴/۱۶	۰/۸۴	-۱/۷۵	۰/۸۶	۳/۷۵	D	
۱/۶۴	۰/۳۰	۰/۴۸	۰/۶۶	۱/۲۶	HR		۱/۶۱	۰/۳۲	۰/۶۲	۰/۷۳	۱/۱۵	HR	
۳/۱۷	۰/۵۸	-۰/۹۵	۰/۶۴	۲/۸۳	PT		۱/۹۱	۰/۵۸	-۰/۲۶	۰/۷۱	۲/۴۷	PT	
۴/۲۰	۰/۷۷	-۲/۴۱	۰/۵۹	۳/۸۸	Turc	هرات	۳/۹۱	۰/۷۸	-۱/۲۸	۰/۷۰	۳/۴۹	Turc	رباط پشت بادام
۳/۵۶	۰/۶۵	-۱/۴۶	۰/۴۵	۳/۱۴	Mk		۳/۲۴	۰/۶۵	-۰/۵۷	۰/۵۸	۲/۷۶	Mk	
۴/۴۵	۰/۸۲	-۲/۸۴	۰/۸۴	۴/۱۵	D		۴/۱۹	۰/۸۴	-۱/۶۱	۰/۸۷	۳/۷۶	D	

۱/۲۵	۰/۲۴	۰/۷۵	۰/۸۳	۰/۹۰	HR		۱/۷۲	۰/۳۱	۰/۵۸	۰/۷۹	۱/۲۸	HR
۲/۲۷	۰/۴۴	۰/۱۷	۰/۸۴	۱/۹۵	PT		۳/۴۸	۰/۶۳	-۰/۷۴	۰/۶۴	۳/۰۲	PT
۳/۱۵	۰/۶۱	-۰/۶۰	۰/۸۴	۲/۸۲	Turc	یزد	۴/۳۵	۰/۷۹	-۱/۷۱	۰/۵۸	۳/۸۹	Turc
۲/۰۴	۰/۴۰	۰/۳۳	۰/۸۳	۱/۶۴	Mk		۲/۸۳	۰/۶۹	-۱/۱۰	۰/۴۲	۲/۲۶	Mk
۴/۲۲	۰/۸۲	-۱/۸۷	۰/۸۸	۳/۸۴	D		۴/۴۰	۰/۸۰	-۱/۷۸	۰/۸۸	۴/۰۳	D

مربوط به مدل HS در ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد که البته دلیل این امر می‌تواند این باشد که با توجه به اینکه مدل HS قبل از واسنجی نتایج مطلوب‌تری ارائه نموده بود پس بعد از واسنجی نیز نتایج مطلوب تری ارائه خواهد داد به همین خاطر فاصله تغییر مقادیر آماری این مدل در ایستگاه‌های مورد مطالعه کمتر است. با توجه به معیارهای آماری ارزیابی مدل‌ها، بعد از واسنجی مدل‌های مبتنی بر انتقال جرم (D) که تابعی از اختلاف فشار و سرعت باد است دارای عملکرد بهتری بودند و بعد از آن مدل مبتنی بر دما دارای عملکرد بهتری بود (HS) و مدل‌های مبتنی بر تابش خورشیدی بعد از واسنجی دارای عملکرد ضعیف‌تری هستند. به ترتیب D، HR، Turc، PT و MK در ایستگاه‌ها عملکرد بهتری داشتند. شکل ۳ نمودار بکس و ویسکر آماره RMSE برای ۵ روش تخمین ET_0 را در مقابل FPM-56 قبل و بعد از واسنجی نشان می‌دهد. بطوریکه از این شکل می‌توان استنباط کرد، قبل از واسنجی میانه سری مربوط به ارقام RMSE از بیشترین مقدار ۴/۲۰ برای D تا کمترین مقدار ۱/۶۶ برای HS تغییر می‌کند. درحالی‌که بعد از واسنجی از بیشترین مقدار ۱/۸۷ برای MK تا کمترین مقدار ۱/۰۳ برای D متغیر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بعد از واسنجی مقادیر RMSE کاهش یافته است.

جدول ۴ معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای تخمین ET_0 با ۵ روش تجربی بعد از واسنجی را نشان می‌دهد. مقایسه جدول ۴ با جدول ۳ نشان می‌دهد که همه ۵ مدل در ده ایستگاه مورد مطالعه بعد از واسنجی نتایج بهتری را نسبت به قبل از واسنجی ارائه می‌دهند که بیانگر این است که برای استفاده از مدل‌های تجربی باید ابتدا آنها را برای ایستگاه‌های مورد مطالعه واسنجی کرد تا نتایج بهتری و نزدیکتری به FPM-56 ارائه دهند. در جدول ۴ میزان تغییر RMSE از بیشترین مقدار (۳/۱۹) ایستگاه هرات تا کمترین مقدار (۰/۸۳) مدل D ایستگاه یزد می‌باش که در مقایسه با قبل از واسنجی مدل‌ها، نتایج برای مدل‌های بعد از واسنجی نتایج مطلوب تری ارائه شده است. فقط RMSE مدل PT در ایستگاه هرات بعد از واسنجی مقدار ۰/۰۲ افزایش یافته است که با توجه به سایر معیارها مدل PT بعد از واسنجی در ایستگاه هرات نتیجه بدتری نسبت به قبل از واسنجی دارد البته تفاوت مقادیر قبل و بعد از واسنجی خیلی کم است. با توجه به شکل ۲ که نشانگر مقادیر معیارهای RMSE و NS قبل و بعد از واسنجی است در این شکل محور افقی بیانگر مدل‌ها مورد استفاده شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد، مقادیر RMSE بعد از واسنجی کاهش یافته است که بیشترین مقدار کاهش مربوط به مدل D ایستگاه عقدا با مقدار ۳/۴۸ می‌باشد. البته مقادیر RMSE و SI مدل D در ایستگاه‌ها بیشتر کاهش یافته است که بیانگر این موضوع است که مدل دالتون بعد از واسنجی نتایج تبخیر - تعرق را بهتر و نزدیک به واقعیت بدست می‌دهد، اما اگر این مدل واسنجی نشود نتایج حاصله با خطا زیادی روبرو خواهد بود. کمترین مقدار تغییر RMSE، SI و NS

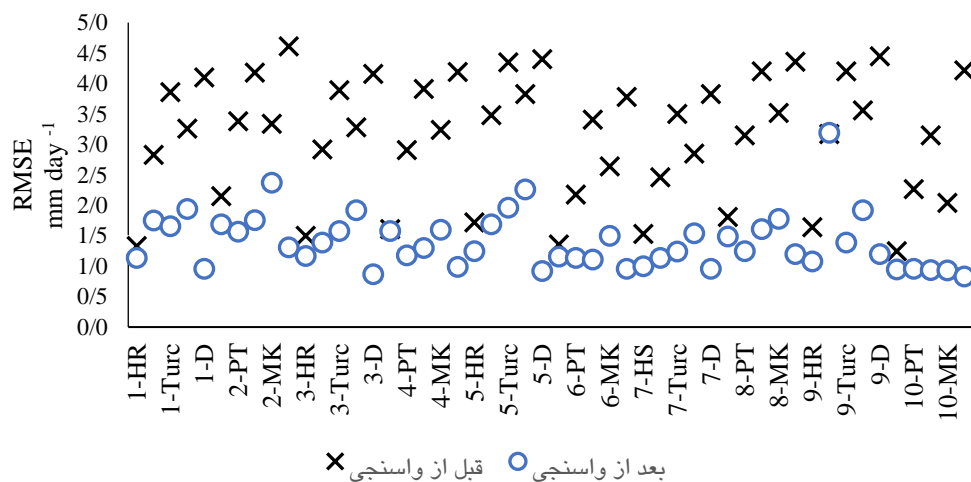
جدول ۴ - معیارهای آماری اندازه‌گیری شده برای تخمین ET_0 با ۵ روش در ایستگاه‌های مورد مطالعه (بعد از واسنجی)

ایستگاه	رو ش	MA E (mm)	R^2	NS	SI	RMSE (mm day ⁻¹)	ایستگاه	رو ش	MA E (m m)	R^2	NS	SI	RMSE (mm day ⁻¹)
ابركوه	HR	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۲۴	۱/۱۴	گاریز	HR	۰/۹۰	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۲۴	۱/۱۶
	PT	۱/۳۵	۰/۷۴	۰/۲۴	۰/۳۷	۱/۷۵		PT	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۲۴	۰/۳۷	۱/۱۴
	Tur _c	۱/۲۹	۰/۷۸	۰/۳۲	۰/۳۵	۱/۶۶		Tur _c	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۳۲	۰/۳۵	۱/۱۱
	Mk	۱/۵۲	۰/۷۵	۰/۰۶	۰/۴۱	۰/۹۴		Mk	۰/۱۲	۰/۷۵	۰/۰۶	۰/۴۱	۱/۵۰
	D	۰/۷۴	۰/۸۷	۰/۷۷	۰/۲۰	۰/۹۶		D	۰/۷۶	۰/۸۷	۰/۷۷	۰/۲۰	۰/۹۶
	HR	۱/۳۷	۰/۵۶	۰/۴۵	۰/۳۲	۱/۶۹		HR	۰/۸۰	۰/۵۶	۰/۴۵	۰/۳۲	۱/۰۰
بافق	PT	۱/۲۲	۰/۵۶	۰/۵۳	۰/۲۹	۱/۵۷	مروست	PT	۰/۸۹	۰/۵۶	۰/۵۳	۰/۲۹	۱/۱۴
	Tur _c	۱/۳۶	۰/۴۸	۰/۴۰	۰/۳۳	۱/۷۶		Tur _c	۰/۹۷	۰/۴۸	۰/۴۰	۰/۳۳	۱/۲۴
	Mk	۱/۸۸	۰/۳۹	۰/۰۸	۰/۴۴	۲/۳۷		Mk	۰/۲۲	۰/۳۹	۰/۰۸	۰/۴۴	۱/۵۴
	D	۱/۰۰	۰/۷۹	۰/۶۷	۰/۲۴	۱/۳۱		D	۰/۷۴	۰/۷۹	۰/۶۷	۰/۲۴	۰/۹۶
	HR	۰/۹۵	۰/۷۷	۰/۶۸	۰/۲۶	۱/۱۷		HR	۰/۲۲	۰/۷۷	۰/۶۸	۰/۲۶	۱/۴۹
	PT	۱/۰۹	۰/۷۷	۰/۵۵	۰/۳۰	۱/۳۹		PT	۰/۹۶	۰/۷۷	۰/۵۵	۰/۳۰	۱/۲۵
بهباد	Tur _c	۱/۲۴	۰/۸۴	۰/۴۲	۰/۳۴	۱/۵۸	میبد	Tur _c	۰/۲۲	۰/۸۴	۰/۴۲	۰/۳۴	۱/۶۱
	Mk	۱/۵۳	۰/۷۹	۰/۱۴	۰/۴۲	۱/۹۲		Mk	۰/۳۸	۰/۷۹	۰/۱۴	۰/۴۲	۱/۷۸
	D	۰/۷۰	۰/۹۱	۰/۸۲	۰/۱۹	۰/۸۷		D	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۸۲	۰/۱۹	۱/۲۰
	HR	۱/۳۲	۰/۷۴	۰/۳۵	۰/۳۷	۱/۵۸		HR	۰/۰۷	۰/۷۴	۰/۳۵	۰/۳۷	۱/۰۸
	PT	۰/۹۳	۰/۷۱	۰/۶۳	۰/۲۸	۱/۱۸		PT	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۶۳	۰/۲۸	۳/۱۹
	Tur _c	۱/۰۲	۰/۸۳	۰/۵۵	۰/۳۱	۱/۳۰		Tur _c	۰/۱۵	۰/۸۳	۰/۵۵	۰/۳۱	۱/۳۹
رباط پشت بادام	Tur _c	۱/۰۲	۰/۸۳	۰/۵۵	۰/۳۱	۱/۳۰	هرات	۰/۱۵	۰/۸۳	۰/۵۵	۰/۳۱	۱/۳۹	

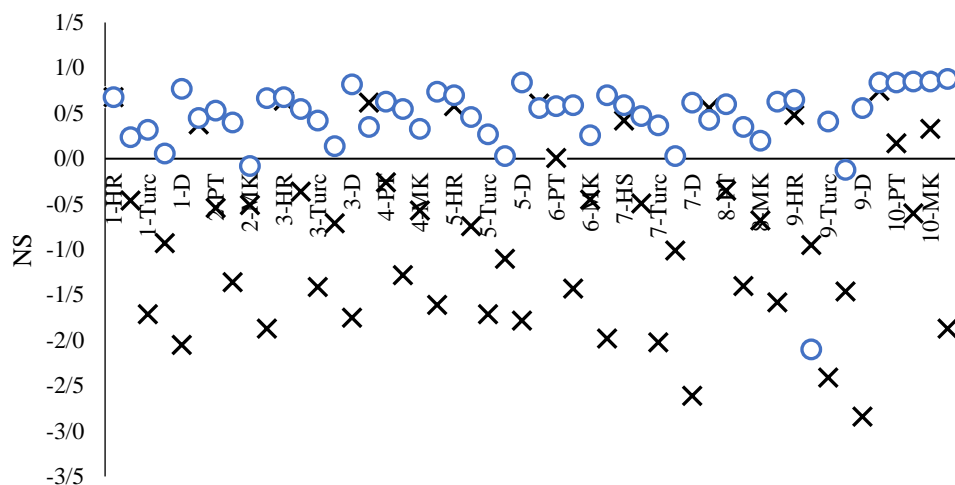
۱/۹۲	۳۸	۱۲	۷۴	۵۵	Mk		۱/۶۰	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۷۳	۱/۲۶	Mk	
	۱									
۱/۲۰	۲۴	۵۶	۶۸	۹۹	D		۰/۹۹	۰/۲۳	۰/۷۴	۰/۹۲	۰/۸۳	D	
									
۰/۹۵	۱۸	۸۴	۸۴	۷۱	HR		۱/۲۵	۰/۲۴	۰/۷۰	۰/۷۴	۰/۹۲	HR	
									
۰/۹۶	۱۹	۸۴	۸۴	۷۴	PT		۱/۶۹	۰/۳۲	۰/۴۶	۰/۷۳	۱/۲۹	PT	
									
۰/۹۴	۱۸	۸۵	۸۵	۷۵	Tur _c	یزد	۱/۹۶	۰/۳۷	۰/۲۷	۰/۸۳	۱/۵۱	Tur _c	عقدا
									
۰/۹۳	۱۸	۸۵	۸۵	۷۳	Mk		۲/۲۶	۰/۴۳	۰/۰۳	۰/۷۶	۱/۷۸	Mk	
									
۰/۸۳	۱۶	۸۸	۸۸	۶۷	D		۰/۹۲	۰/۱۷	۰/۸۴	۰/۸۹	۰/۷۲	D	
									

هادی مدل D مقادیر تبخیر-تعرق را کمتر از FPM-56 محاسبه می‌کرد که باید برای دستیابی به نتایج مطلوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه باید مقادیر محاسبه شده توسط مدل‌ها را با ضرایب جدول ۵ تصحیح نمود برای انجام واسنجی ضریب با استفاده از این ضرایب به- اینصورت بود که $a * ET_{model} + b$ که در آن ضریب a شیب و b عرض از مبدا بود.

جدول ۵ ضرایب واسنجی ۵ مدل منتخب در ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه استان یزد را نشان می‌دهد که می‌توان از این جدول استنباط کرد که کمترین ضرایب مربوط به مدل HS بوده است که در اغلب موارد مقادیر ضریب برای این مدل کمتر از واحد است که بیانگر این است که در حالت عادی (قبل از واسنجی) مدل HS مقادیر را بیشتر از مقادیر FPM-56 نشان می‌داد، همچنین بزرگترین ضرایب مربوط به D بود که یعنی در حالت



(الف)

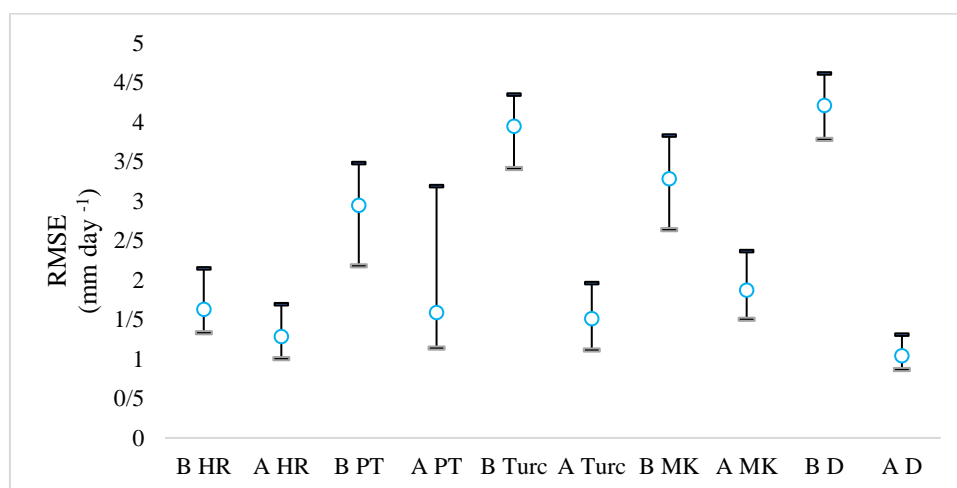


(ب)

شکل ۲- نمودار مقادیر RMSE (الف) و NS (ب) قبل و بعد از واسنجی.

جدول ۵- ضرایب واسنجی با ۵ روش منتخب در ایستگاه‌های مورد مطالعه. Column

HS	PT	Turc	MK	D	ضرایب	ایستگاه
۰/۹۶	۱/۱۴	۱/۶۷	۱/۰۹	۳/۰۱	a	
۰/۷۷	۱/۳۳	۲/۱۴	۲/۱۲	۱/۴۶	b	ابركوه
۰/۸۰	۱/۳۰	۱/۵۰	۱/۳۷	۲/۸۸	a	
۱/۹۰	۱/۷۹	۲/۳۷	۱/۰۵	۱/۵۴	b	بافق
۰/۹۶	۱/۳۷	۱/۶۶	۱/۱۹	۳/۰۶	a	
۰/۸۶	۱/۳۳	۲/۲۰	۱/۹۳	۱/۴۰	b	بهباد
۱/۱۲	۱/۴۰	۱/۸۸	۱/۲۷	۲/۹۶	a	
۰/۷۳	۱/۴۱	۲/۰۲	۱/۸۹	۱/۶۲	b	رباط پشت بادام
۱/۱۲	۱/۴۵	۱/۸۳	۱/۲۰	۲/۶۶	a	
۰/۷۸	۱/۶۰	۲/۱۲	۲/۳۳	۱/۶۹	b	عقدا
۰/۸۶	۱/۲۲	۱/۶۶	۱/۱۷	۳/۶۶	a	
۰/۹۵	۱/۰۸	۲/۱۶	۱/۵۵	۱/۲۹	b	گاریز
۰/۷۰	۱/۱۰	۱/۳۷	۰/۹۶	۲/۹۵	a	
۱/۴۸	۱/۶۴	۲/۴۲	۲/۱۷	۱/۵۲	b	مروست
۰/۹۶	۱/۴۶	۱/۶۳	۱/۳۵	۲/۹۷	a	
۱/۰۴	۱/۳۰	۲/۰۷	۱/۸۲	۱/۵۳	b	میبد
۰/۹۲	۱/۳۰	۱/۶۳	۱/۰۸	۲/۹۷	a	
۱/۴۸	۱/۸۶	۲/۶۳	۲/۶۳	۱/۷۸	b	هرات
۱/۰۵	۱/۴۰	۱/۷۹	۱/۵۰	۲/۸۴	a	
۰/۵۱	۰/۶۶	۱/۰۲	-۰/۱۲	۱/۴۷	b	یزد



شکل ۳- نمودار باکس و ویسکر آماره RMSE برای روش‌های تخمین تبخیر-تعرق قبل (B) و بعد (A) از واسنجی.

نتیجه‌گیری کلی

D که مدل مبتنی بر انتقال جرم بوده و وابسته به متغیرهای ورودی سرعت با و اختلاف فشار می‌باشد، نتایج مطلوب تری را ارائه دادند. باتوجه‌به اینکه مدل D مدل ساده ای است و نیاز به پارامترهای هواشناسی کمتری دارد می‌توان با واسنجی این مدل و اعمال ضرایب واسنجی در استان یزد برای تخمین تبخیر-تعرق دقیق از این مدل استفاده کرد. همچنین با توجه به اینکه مدل تجربی دما پایه هارگریوز-سامانی هم نیاز به داده ورودی کمتری دارد و از طرفی هم نتایج آماری مورد قبول تری را چه قبل از واسنجی و چه بعد از واسنجی ارائه داده است می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از نتایج این مطالعه در استان یزد برای تخمین تبخیر-تعرق ایستگاه‌های فاقد آمار کافی برای روش FPM-56 و تخمین آب موردنیاز گیاهان کشت شده در این منطقه توصیه می‌شود. مطالعه مشابه برای دیگر استان‌ها کشور قویا توصیه می‌شود.

برای تخمین مقدار دقیق آب موردنیاز گیاهان در استان یزد، یکی از مهم‌ترین مشکلات تخمین تبخیر - تعرق، فقدان داده‌های کامل برای روش استاندارد تخمین تبخیر-تعرق و یا عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده لایسیمتر می‌باشد که اغلب احداث و استفاده از داده‌های لایسیمتر زمانبر بوده و هزینه بر است. همچنین تعداد کافی ایستگاه‌ها با داده کامل در تمام نواحی استان یزد وجود ندارد. برای رفع این مشکل، مطالعه حاضر به منظور یافتن روش ساده و دقیق تخمین تبخیر-تعرق مرجع، پنج روش HS,PT,MK,Turc,D را با معیاره های آماری $RMSE, NS, SI, MAE, R^2$ در دو حالت قبل و بعد از واسنجی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که قبل از واسنجی مدل مبتنی بر دما HS که وابسته به متغیرهای ورودی دما است و بعد از واسنجی مدل

منابع مورد استفاده

- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guide lines for computing crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56, Rome, Italy.
- Allen RG, Jensen JL, Wright JL and Burman RD, 1989. Operational estimate of evapotranspiration. Agronomy Journal 81:650-662.

- Dalton J, 1802. Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam of vapour from waters and other liquids in different temperatures, both in a torricellian vacuum and in air on evaporation and on the expansion of gases by heat. *Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester* 5:535-602
- Dehghani AA, Ghabaei Sough M, Sharifan H and Dehghani N, 2011. Calibration of empirical equations to estimate the daily reference evapotranspiration and comparison with ANNs models under the lack of meteorological data. *Journal of Water and Irrigation Management* 1: 41-45. (in Persian with English abstract)
- Landeras G, Ortiz-Barredo A and Lopez JJ, 2008. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). *Agricultural Water Management* 95: 553-565.
- Makkink GF, 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers* 11(3):277-288.
- Priestley CHB and Taylor RJ, 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2):81-92.
- Rahimi Khoob A, Behbahani M, Nazarifar M, 2006. Evaluation of using minimum meteorological data for penman montieth equation- case study Khuzestan province. *Journal of Agricultural Sciences* 3: 591-599. (In Persian with English abstract)
- Rosenberry DO, Stannard DO, Winter TC and Martinez ML, 2004. Comparison of 13 equations for determining evapotranspiration from a prairie wetland, cottonwood lake area north Dakota, USA. *Wetlands* 24 (3): 483-497.
- Sentelhas P, Gillespie T and Santos EA, 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.
- Sharifan H, Ghahreman B, Alizade A and Mir-latifi SM, 2006. Comparison of the different method of estimated references evapotranspiration (compound and temperature) with standard method and analysis of aridity effects. *Journal of Agriculture Science and Natural Resources* 13: 1-16
- Singh VP and Xu C_Y, 1997. Evaluation and generalization of 13 mass transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes* 11: 311-323.
- Tao H, Diop L, Bodian A, Djaman K, Ndiaye PM and Mundher Yaseen Z, 2018. Reference evapotranspiration prediction using hybridized fuzzy model with firefly algorithm: Regional case study in Burkina Faso. *Agricultural Water Management* 208: 140-151.
- Turc L, 1961. E' valuation des besoins en eau d'irrigation, e'vapotranspiration potentielle. *Annals of Agronomy* 12 (1):13-49.
- Xu C-Y and Singh VP, 2000. Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes* 14: 339-349.
- Zhai L, Feng Q, Li Q and Xu C-Y, 2010. Comparison and modification of equations for calculating evapotranspiration (ET) with data from Gansu province, northwest China. *Irrigation and Drainage* 59: 477-490.