Archive of SID
DOI: 10.30467/NIVAR.2020.215572.1147

نیوار، دوره ۴۴، شماره ۱۱۱-۱۱۰، پائیز و زمستان ۱۳۹۹ (دو فصلنامه)

مقایسه و ارزیابی روش‌های تخمین تبخیرتعرق گیاه مرجع در سه دسته کلی مبتنی بر دما، تابش و انتقال جرم (مطالعه موردی: استان لرستان)

شکور طافی*[۱]، آرش بلادی[۲]، امیر سلطانی محمدی[۳]، خشایار پیغان[۴]

۱، ۲ و ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۱۵)

چکیده

تخمین میزان دقیق مقدار تبخیرتعرق گیاه مرجع نه تنها در برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین دور آبیاری، بلکه در مطالعات مربوط به مدل‌سازی بیلان آب از اهمیت فراوانی برخوردار است. هدف از این پژوهش، مقایسه و ارزیابی نه روش مختلف تخمین تبخیرتعرق گیاه مرجع در سه دسته کلی مبتنی بر دما، تابش و انتقال جرم در نه ایستگاه مطالعاتی از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ در استان لرستان می‌باشد. نتایج این روش‌ها با نتایج حاصل از روش مرجع، فائو پنمن مانتیث، مقایسه گردید. ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف با آماره‌های R^2 ، RMSE و CRM صورت گرفت. نتایج نشان داد که در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی، در بین روش‌های مبتنی بر دما، روش هارگریوز سامانی، در بین روش‌های مبتنی بر تابش خورشید، روش مک کینگ و نیز در بین روش‌های مبتنی بر انتقال جرم، روش WMO بهترین عملکرد را با ثبت بیش‌ترین R^2 و کم‌ترین RMSE ارائه دادند. هم‌چنین با استفاده از نرم افزار ArcGIS نیز پهنه‌بندی مکانی انجام شد و نقشه هر دسته ارائه گردید.

کلمات کلیدی: انتقال جرم، تابش، تبخیرتعرق، دما، FAO-56.

مقدمه

در بسیاری از مناطق ایران از جمله در مناطق مدرن شهری، کمبود آب آشامیدنی سالم محسوس می‌باشد. با توجه به اهمیت کشاورزی در فعالیت‌های اقتصادی ایران و نیز کمبود منابع آب کافی و با کیفیت، مدیریت منابع آب دارای ارزش حیاتی است (پاشاخواه و همکاران، ۱۳۹۳). بر همین اساس، تعیین نیاز آبی گیاهان به عنوان یکی از عوامل چرخه هیدرولوژی از ضروریات اساسی در طرح‌های آبیاری و زهکشی می‌باشد (خوشحال و همکاران، ۱۳۹۴). تبخیرتعرق گیاه مرجع یکی از مولفه‌های مهم چرخه هیدرولوژی است که تخمین آن برای مدیریت بهینه منابع آب لازم است. تخمین میزان دقیق تبخیرتعرق گیاه مرجع، نه تنها در برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین دورآبیاری، بلکه در مطالعات مربوط به مدل‌سازی بیلان آب در هر ناحیه از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد (بابامیری و دین‌پژوه، ۱۳۹۵). تبخیرتعرق مرجع به عنوان تبخیر تعرق پتانسیل در مطالعات غیر کشاورزی شناخته شده است (Paredes and Pereira., 2019). تبخیرتعرق مرجع برای یک پوشش گیاهی که معمولا چمن یا یونجه ایست با پوشش کامل، یکنواخت و وسیع از درختچه‌های سبز و تازه، با ارتفاع ۸-۱۵ سانتی‌متر برای چمن و ۲۰ سانتی‌متر برای یونجه، محاسبه می‌شود (Ahmadipour et al., 2019). چندین روش اصلی یا اصلاح شده برای محاسبه تبخیرتعرق مرجع پیشنهاد گردیده است که بسیاری از آن‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها را می‌توان با توجه به داده‌های مورد نیاز طبقه‌بندی کرد: (۱) روش‌های دمایی، (۲)- روش‌های تابشی و (۳) روش‌های ترکیبی. بعضی از این روش‌ها تنها چند ورودی نیاز دارند (Song et al., 2019). دقیق‌ترین روش برآورد میزان تبخیرتعرق مرجع، استفاده از لایسیمتر وزنی است اما با توجه به هزینه زیاد و عدم دسترسی به آمارهای این روش، اغلب روش‌های تجربی برای تخمین تبخیر تعرق مرجع و روش FAO-56 برای مقایسه نتایج استفاده می‌شود (Ahmdipour et al., 2019). روش FAO-56 به عنوان روشی معتبر برای محاسبه تبخیرتعرق مرجع معرفی شده است که می‌توان از این روش برای توسعه یا ارزیابی سایر

* نگارنده رابط: **shakoor73tafi@yahoo.com**

www.SID.ir

Archive of SID

روش‌های تجربی نیز استفاده کرد اما مطالعات زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد این روش تبخیرتعرق مرجع را در برخی شرایط آب و هوایی درست تخمین نمی‌زند (Didari and Ahmadi., 2018). روش FAO-56 به مجموعه داده‌های کامل حداکثر و حداقل دمای هوا، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، تابش خورشیدی و سرعت باد در ارتفاع دو متری نیاز دارد که این داده‌ها اغلب در دسترس نیستند (Paredes and Pereira., 2019). مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی روش‌های مختلف برآورد ET_o، هم در ایران و هم در خارج از کشور انجام شده است. موهوش و تلوزی (۲۰۱۲) در تحقیقی به مقایسه روش‌های هارگریوز و FAO-56 در ۱۲ ایستگاه (خشک و نیمه‌خشک) پرداختند، نتایج حاکی از آن بود که معادله هارگریوز اصلاح‌شده با بالاترین ضریب تعیین، بهترین و مناسب‌ترین روش پس از FAO-56 می‌باشد (Mohawesh and Talozi., 2012). قلی‌زاده الپاوت و امینی‌نیا (۱۳۹۴) طی پژوهشی تبخیرتعرق پتانسیل دوره‌ی ۵۷ ساله را با استفاده از نه روش معتبر در نرم‌افزار REF-ET محاسبه کرده و روش بلانی-کریدل را به عنوان بهترین روش در محدوده مورد مطالعه تشخیص دادند. هم‌چنین جهت آشکار نمودن تغییرات زمانی این شاخص از آزمون من-کندال استفاده گردید که نتایج نشان داد با وجود سیر کاهشی این شاخص تا دهه نود میلادی، در سال‌های اخیر و به تدریج، تبخیرتعرق پتانسیل افزایش یافته است. بیش‌ترین افزایش میزان تبخیرتعرق مرجع در اواسط بهار و پاییز عنوان شد. شاهدی و زارعی (۱۳۹۰) به‌منظور مقایسه و تعیین مناسب‌ترین روش تبخیرتعرق مرجع در استان مازندران با در نظر گرفتن روش FAO-56 به عنوان مرجع، دقت روش‌های مختلف تجربی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشلان داد که روش بلانی-کریدل با کم‌ترین میزان خطای استاندارد و بیش‌ترین میزان همبستگی، دقیق‌ترین روش بوده و نیز از شرق به غرب استان مازندران، میزان تبخیرتعرق پتانسیل کاهش یافته است. نوری و همکاران (۱۳۹۵) نتایج حاصل از شش روش برآورد تبخیرتعرق مرجع را با داده‌های اندازه‌گیری شده در لایسیمتر (گیاه چمن) مقایسه کرده و گزارش کردند که روش FAO-56 با RMSE برابر ۱/۳ بهترین روش محاسباتی بود، درحالی که روش‌های هارگریوز و پنمن اصلاح شده دارای خطای بیش‌تری نسبت به سایر روش‌ها بودند. خوشحال و همکاران (۱۳۹۴) مطالعه‌ای را با هدف یافتن بهترین مدل برآورد تبخیرتعرق مرجع برای حوضه آبریز شرق و جنوب شرقی کشور با تکیه بر روش خوشه‌بندی صورت دادند. میزان تبخیرتعرق مرجع حاصل از تشت تبخیر با نتایج حاصل از ۸ معادله برآورد تبخیرتعرق مرجع مقایسه گردید که روش‌های هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل (فائو۲۴)، تورک و پرستلی-تیلور با توجه به ابعاد زمانی متفاوت، بهترین انطباق را با مقادیر حاصل از روش تشت تبخیر داشتند. فاد و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی عنوان کردند که در روش‌های مبتنی بر تابش، روش پرستلی-تیلور کم‌ترین ضریب همبستگی و بالاترین مقدار خطا را دارد. از سوی دیگر، در میان روش‌هایی که از داده‌های تشت تبخیر استفاده می‌کنند، روش کریستین-سن بالاترین ضریب همبستگی و کم‌ترین مقدار خطا را ثبت کرد و نسبت به روش پرستلی-تیلور، نزدیکی بیش‌تری به روش FAO-56 نشان داد (Phad et al., 2019). ذرتی‌پور و همکاران (۱۳۹۸) ، پایش زمانی و مکانی روش‌های تخمین تبخیرتعرق گیاه مرجع در استان خوزستان را انجام داده و نقشه‌ای از بهترین روش‌ها را در محیط ArcGIS تهیه نمودند. نتایج نشان داد روش‌ها در فصول مختلف عملکرد متفاوتی دارند اما در بیش‌تر روش‌ها نتایج رضایت‌بخش بود که دلیل آن می‌تواند نوع اقلیم یکسان و موقعیت جغرافیایی مشابه باشد. عطارد و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی از روش FAO-56 جهت ارزیابی نتایج سایر روش‌های تجربی در دو گروه مبتنی بر دما و تابش استفاده کردند. در مقیاس روزانه، روش تورک کم‌ترین مقدار خطا و نزدیک‌ترین برآورد به روش استاندارد را نشان داد و در مقیاس ماهانه نیز، در ماه‌های فروردین و نیمه دوم سال روش تورک، در فصل تابستان روش بلانی-کریدل و در ماه‌های اردیبهشت و خرداد روش هارگریوز-سامانی کمترین خطا و بهترین برآورد را ثبت کردند. مهدی‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) میزان تبخیرتعرق مرجع را به‌کمک پنج مدل مختلف رابطه والیانتزاس در هفت ایستگاه واقع در شمال غرب کشور برآورد نمودند. بر اساس شاخص‌های آماری، روش‌های

www.SID.ir

Archive of SID

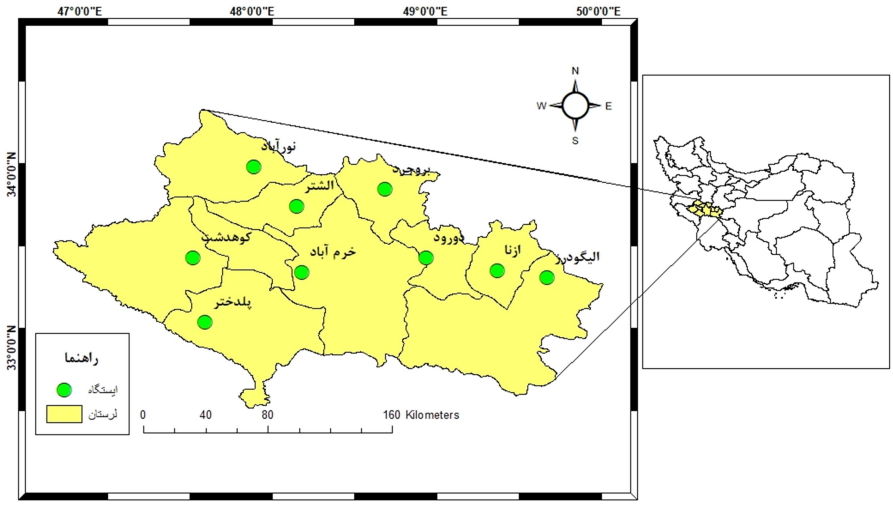
والیانتزاس ۲ و والیانتزاس ۵ به‌ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را داشتند. محمدی و همکاران (۱۳۸۹) با هدف تعیین مناسب‌ترین روش برآورد تبخیرتعرق مرجع در سطح منطقه با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های منطقه مورد نظر (اصفهان، کاشان، شهرضا، خور و بیابانک، گلپایگان و نائین) ، به مقایسه بین روش‌های تورنت وایت، بلانی-کریدل و لاری جانسون با نتایج حاصل از تشت تبخیر پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که از بین روش‌های مذکور، نتایج روش بلانی-کریدل نسبت به سایر روش‌ها، نزدیکی بیش‌تری به نتایج حاصل از تشت تبخیر داشته است. هم‌چنین نتایج پهنه-بندی میزان تبخیرتعرق در سطح استان اصفهان نشان داد که از غرب به شرق و از جنوب به شمال، بر میزان تبخیرتعرق افزوده می‌شود، به‌طوری که در نواحی شمال شرقی استان (ایستگاه خور و بیابانک)، این پدیده به دلایلی هم‌چون نزدیکی به کویر، افزایش گرمای سطح زمین و کم شدن نزولات جوی، به اوج خود می‌رسد.

هر روش تخمین تبخیرتعرق گیاه مرجع در منطقه‌ای خاص و در شرایط آب و هوایی مربوط به آن محل استخراج گردیده است و در نتیجه، لازم است که کارایی هر روش جهت استفاده در مناطق دیگر ارزیابی شود. در این پژوهش، نه روش تخمین تبخیرتعرق مرجع مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصله با روش مرجع FAO-56 مقایسه گردید. هم‌چنین برای هر ایستگاه بهترین روش تخمین تبخیرتعرق مرجع مشخص شد.

سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزاری برای ذخیره، نگه-داری، مدیریت و تجزیه و تحلیل اطلاعات جغرافیایی می‌باشد و جهت کارکردن با داده‌هایی که وابستگی مکانی (جغرافیایی) و توصیفی دارند، طراحی شده است.

مواد و روش‌ها

استان لرستان با مساحت ۲۸۳۰۸ کیلومترمربع و مشخصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی، ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی، در غرب ایران واقع شده است. ارتفاع لرستان از سطح دریا ۱۱۴۷/۸ متر می‌باشد. در این مطالعه از مقادیر ماهانه آمار هواشناسی نه ایستگاه سینوپتیک شامل الشتر، الیگودرز، ازنا، بروجرد، دورود، خرم‌آباد، کوهدشت، نورآباد و پلدختر استفاده گردید. تبخیرتعرق مرجع در این تحقیق، با استفاده از نرم افزار REF-ET محاسبه شد که تبخیرتعرق گیاه چمن و یونجه را محاسبه می‌کند. هم‌چنین با استفاده از نرم افزار ArcGis پهنه بندی مکانی نیز صورت گرفت و نقشه بهترین روش ارائه شد. موقعیت جغرافیایی نه ایستگاه مطالعاتی استان لرستان در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق از نه روش هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل، اسچندل، پرستلی-تیلور، مک‌کینگ، تورک، میر، دالتون و WMO که در سه دسته کلی مبتنی بر دما، تابش و انتقال جرم تقسیم می‌شوند، استفاده گردید (جدول ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مطالعاتی در استان لرستان

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- نه روش انتخاب شده برای تخمین تبخیرتعرق مرجع در ایستگاه‌های مطالعاتی در استان لرستان

دسته	روش	منبع	معادله
دمایی	هارگریوز-سامانی(HG)	(شیری، ۲۰۱۷)	$ET_0 = 0/0023R_a(T_{mean} + 17/8)\sqrt{T_{max} - T_{min}}$
	بلانی-کریدل(BC)	(ذرتی پور و همکاران، ۱۳۹۸)	$ET_0 = a + b[P(0/46T_{mean} + 8/13)]$
	اسچندل(S)	(فرزان‌پور و همکاران، ۲۰۱۸)	$ET_0 = 16\frac{T_{mean}}{RH}$
تابشی	پرستلی-تیلور (PT)	(شیری، ۲۰۱۷)	$ET_0 = \frac{1/26}{\lambda}\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)(R_n - G)$
	مک‌کینگ(MK)	(ذرتی پور و همکاران، ۱۳۹۸)	$ET_0 = 0/61\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)R_s/\lambda - 0/12$
	تورک(T)	(شیری، ۲۰۱۷)	$\begin{cases} ET_0 = 0/013\frac{Tmean}{Tmean+15}(R_s+50) & \text{برای } RH \geq 50 \\ ET_0 = 0/013\frac{Tmean}{Tmean+15}(R_s+50)\left(1+\frac{5-RH}{70}\right) & \text{برای } RH \leq 50 \end{cases}$
انتقال جرم	میر(M)	(فرزان‌پور و همکاران، ۲۰۱۸)	$ET_0 = (0/375 + 0/05026u_2)(e_s - e_a)$
	دالتون(D)	(فرزان‌پور و همکاران، ۲۰۱۸)	$ET_0 = (0/3648 + 0/07223u_2)(e_s - e_a)$
	WMO	(فرزان‌پور و همکاران، ۲۰۱۸)	$ET_0 = (0/1298 + 0/0934u_2)(e_s - e_a)$

در جدول ۱، ET_0 تبخیرتعرق گیاه مرجع بر حسب (mm/day)، T_{mean}، T_{max} و T_{min} به ترتیب دمای میانگین ماهانه، میانگین ماهانه دمای حداکثر و دمای حداقل (°C)، R_a تابش برون زمینی ($MJ/m^2/day$)، RH میانگین رطوبت نسبی (٪)، a و b معادلات تجربی، P ضریب روشنایی مربوط به طول روز در ماه مشخص از سال، λ گرمای نهان تبخیر $\left(MJkg^{-1}\right)$، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی $\left(MJm^{-2}day^{-1}\right)$، G جریان حرارتی خاک $\left(MJm^{-2}day^{-1}\right)$، γ ثابت سایکرومتری $\left(Kpa°C^{-1}\right)$، Δ شیب منحنی فشار بخار $\left(Kpa°C^{-1}\right)$، R_s تابش خالص رسیده به سطح زمین (mm/day)، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s) و $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار در در ارتفاع ۲ متری (KPa) می‌باشند.

شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی روش‌های تخمین تبخیرتعرق مرجع، روش FAO-56 به عنوان روش استاندارد در نظر گرفته شد و مقادیر تخمین زده شده توسط این روش با نتایج سایر روش‌ها مقایسه شد. برای تحلیل نتایج، از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)[1]، ضریب تعیین (R^2)[2] و ضریب جرم باقیمانده (CRM)[3] استفاده گردید. آماره RMSE نشان می‌دهد که برآورد بیش از حد و یا کم‌تر از حد روش مورد نظر در مقایسه با روش استاندارد چقدر است. آماره R^2 نسبت پراکندگی بین مقادیر برآورد شده توسط روش مورد نظر و روش استاندارد را

1- Root Mean Square Error
2 -Determination of Coefficient
3 -Coefficient of Residual Mass

www.SID.ir

Archive of SID

نشان می‌دهد. آماره CRM نیز نشان‌دهنده تمایل روش مورد نظر برای تخمین بیش از حد و یا کم‌تر از حد در مقایسه با روش استاندارد است. مقادیر مثبت آماره CRM نشان‌دهنده تخمین کم‌تر از حد و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده تخمین بیش از حد می‌باشد. چنان‌چه تمام مقادیر برآورد شده توسط روش مورد نظر و روش استاندارد با هم برابر شوند، مقدار عددی R^2 برابر یک و CRM و RMSE نیز برابر صفر خواهد شد (Hassanli et al., 2016).

نتایج و بحث

تمام ایستگاه‌های مطالعاتی استان لرستان از نظر اقلیمی، بر اساس تقسیم بندی دومارتن در دسته اقلیم خشک قرار دارند.

مجموع مقادیر سالیانه تبخیرتعرق مرجع به دست آمده با روش‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود در ایستگاه ازنا کم‌ترین مقدار و در ایستگاه پلدختر بیش‌ترین مقدار تبخیر تعرق مرجع با توجه به روش مرجع FAO-56 به‌دست آمده است. مجموع مقادیر تبخیرتعرق مرجع سالانه روش‌های میر (M)، دالتون (D) و اسچندل (S) در ایستگاه پلدختر به ترتیب ۳۲/۶۳، ۱۶/۰۶ و ۹/۰۶ درصد بیش‌تر و روش‌های پریستلی-تیلور (PT)، مک‌کینگ (MK) و بلانی-کریدل (BC) به ترتیب ۴۶، ۴۳/۸ و ۲۲/۵ درصد کم‌تر نسبت به روش مرجع FAO-56 به دست آمد.

جدول ۲- مجموع مقادیر تبخیرتعرق مرجع سالانه محاسبه شده با روش‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	BC	S	HG	D	WMO	M	T	MK	PT	FAO-56
	(mm)									
الشتر	۷۹۷/۱	۱۵۸۹/۰	۱۲۸۰/۰	۱۲۷۰/۹	۱۶۰۵/۵	۱۵۵۸/۱	۷۸۴/۳	۷۴۶/۰	۷۷۵/۴	۱۱۳۲/۱
الیگودرز	۹۴۶/۷	۸۹۶/۳	۱۱۳۹/۹	۱۲۳۳/۶	۱۱۰۱/۹	۱۲۵۵/۹	۸۴۶/۳	۷۷۰/۸	۷۸۵/۲	۱۵۲۰/۲
ازنا	۱۰۰۵/۶	۹۵۸/۸	۱۱۶۸/۷	۱۰۷۴/۷	۸۵۴/۴	۱۰۱۲/۷	۸۱۹/۶	۷۷۹/۳	۷۹۷/۲	۱۱۲۲/۳
بروجرد	۹۴۳/۰	۱۰۴۰/۱	۱۲۰۴/۵	۱۱۸۲/۷	۹۸۳/۲	۱۲۱۵/۱	۹۴۳/۳	۷۷۵/۶	۷۷۸/۲	۱۳۹۲/۱
دورود	۹۷۷/۵	۱۱۳۱/۰	۱۱۶۵/۷	۱۳۰۲/۹	۱۱۰۰/۴	۱۳۶۲/۲	۹۷۷/۴	۷۷۵/۳	۷۶۴/۵	۱۳۴۸/۳
خرم آباد	۹۷۴/۴	۱۱۳۳/۲	۱۳۷۵/۶	۱۱۶۷/۵	۹۱۰/۳	۱۲۳۳/۳	۱۰۰۴/۱	۷۷۵/۹	۷۷۱/۸	۱۳۸۵/۴
کوهدشت	۹۲۱/۹	۹۶۰/۷	۱۳۸۶/۸	۹۷۷/۶	۷۴۰/۹	۹۷۹/۳	۹۵۹/۰	۸۰۸/۷	۸۱۸/۲	۱۲۰۹/۲
نورآباد	۷۸۸/۲	۷۶۶/۴	۱۰۹۳/۸	۹۳۸/۶	۷۹۹/۸	۹۰۲/۲	۷۶۰/۵	۶۸۹/۷	۷۱۵/۲	۱۱۵۴/۱
پلدختر	۱۲۴۰/۱	۱۷۴۴/۶	۱۴۷۸/۵	۱۸۵۶/۶	۱۴۶۲/۳	۲۱۲۱/۷	۱۲۸۰/۲	۸۹۹/۵	۸۶۳/۳	۱۵۹۹/۷

در ایستگاه ازنا روش هارگریوز- سامانی (HG) ۴/۱ درصد بیش‌تر و روش‌های مک‌کینگ، پریستلی- تیلور و تورک (T) به ترتیب ۳۰/۶، ۲۹ و ۲۷ درصد کم‌تر نسبت به روش FAO-56 تبخیرتعرق مرجع را برآورد کردند.

نتایج به دست‌آمده از مقایسه روش‌های مبتنی بر دما

نتایج به دست‌آمده از مقایسه روش‌های مختلف تخمین تبخیر تعرق مرجع مبتنی بر دما با روش FAO-56 در ایستگاه‌های استان لرستان در شکل‌های ۲ و ۳ و ۴ نشان داده شده است.

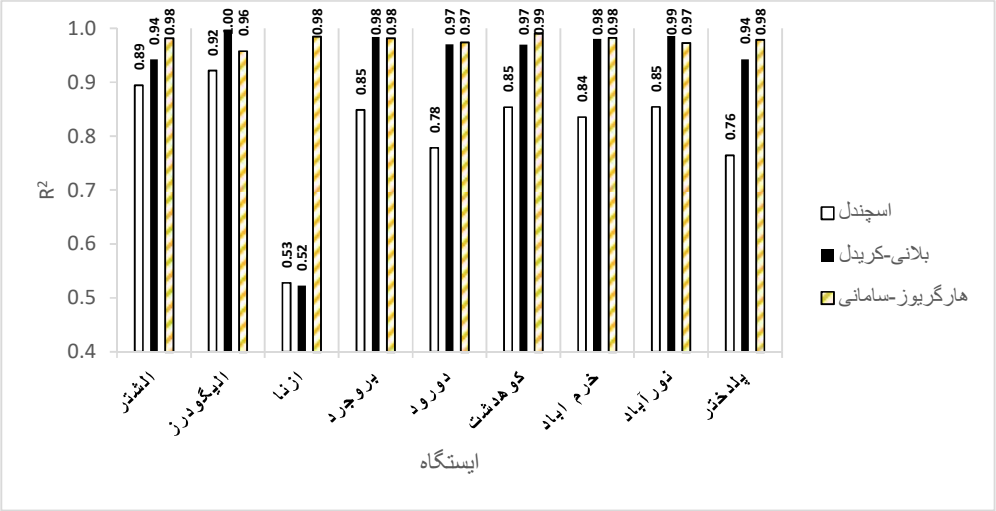
www.SID.ir

Archive of SID

نتایج نشان داد روش هارگریوز- سامانی برای ایستگاه‌های الشتر، ازنا، دورود، کوهدشت و خرم‌آباد با R2، RMSE و CRM به ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۴۳و ۰/۱۱ میلی‌متر بر روز، ۰/۹۸، ۰/۶۰و ۰/۰۴ میلی‌متر بر روز، ۰/۹۷، ۰/۷۴، ۰/۱۵- میلی‌متر بر روز، ۰/۹۹، ۰/۴۳، ۰/۱۳ میلی‌متر بر روز، ۰/۹۸، ۰/۴۸، صفر میلی‌متر بر روز بهترین عملکرد را دارند. روش بلانی-کریدل برای ایستگاه‌های الیگودرز، بروجرد، نورآباد و پلدختر با R2، RMSE و CRM به ترتیب برابر ۱، ۲/۶۳، ۰/۲۱- میلی‌متر بر روز، ۰/۹۸، ۰/۴۸، ۰/۱۰- میلی‌متر بر روز ، ۰/۹۹، ۰/۵۴، ۰/۱۰- میلی‌متر بر روز، ۰/۹۴، ۰/۶۷، ۰/۰۸ میلی-متر بر روز بهترین نتایج را نشان داد. لازم به ذکر است که در ایستگاه‌های الیگودرز و نورآباد، بین تمام روش‌های مبتنی بر دما رتبه‌های یکسان حاصل شد که ملاک انتخاب روش مناسب‌تر، شاخص آماری R2 بود. بر اساس شاخص CRM روش اسچندل در ایستگاه‌های الشتر و الیگودرز کم‌برآوردی و در سایر ایستگاه‌ها بیش‌برآوردی داشت. هم‌چنین روش بلانی-کریدل در ایستگاه‌های الیگودرز، بروجرد، دورود، خرم آباد و نورآباد دارای کم برآوردی و در سایر ایستگاه‌ها نیز دارای بیش‌برآوردی بود. روش هارگریوز-سامانی نیز در ایستگاه‌های الیگودرز، بروجرد، دورود، نورآباد و پلدختر کم‌برآوردی و در سایر ایستگاه‌ها بیش‌برآوردی نشان داد. بهترین روش با کم‌ترین رتبه برای هر ایستگاه مطالعاتی انتخاب و در جدول ۳ ارائه گردید.

جدول ۳- بهترین روش تخمین تبخیرتعرق مرجع سالانه با روش‌های مبتنی بر دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه

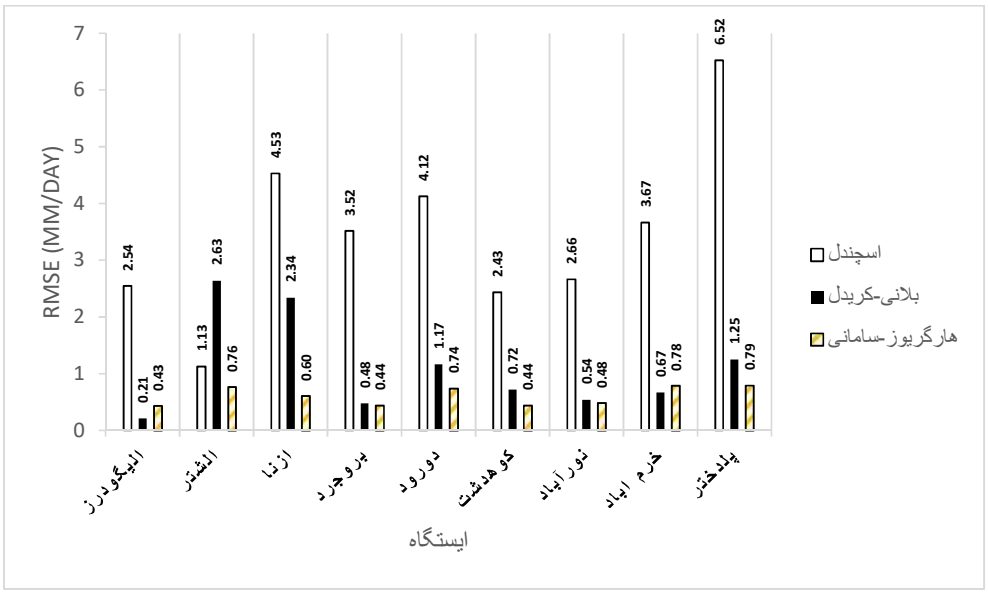
ایستگاه	پلدختر	نورآباد	خرم آباد	کوهدشت	دورود	بروجرد	ازنا	الیگودرز	الشتر
بهترین روش	**BL**	**BL**	**HG**	**HG**	**HG**	**BL**	**HG**	**BL**	HG
رتبه	۴	۵	۳	۴	۴	۴	۳	۶	۵



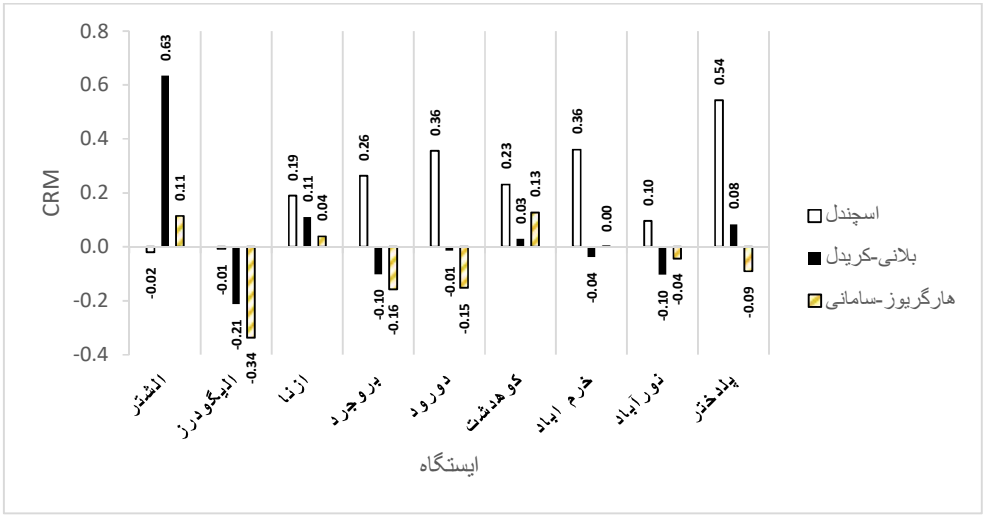
شکل ۲- مقادیرR2 تخمین تبخیرتعرق مرجع با روش‌های مبتنی بر دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳- مقادیر RMSE تخمین تبخیرتعرق مرجع با روش‌های مبتنی بر دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه



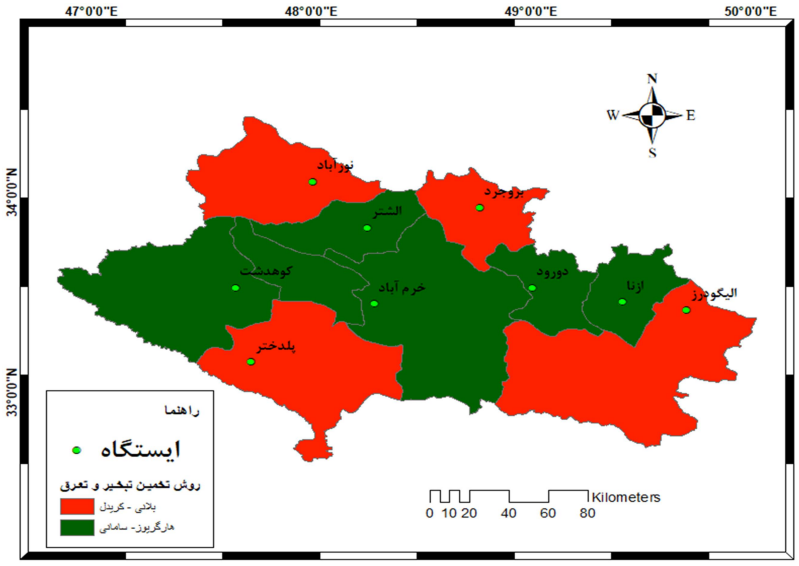
شکل ۴- مقادیر CRM تخمین تبخیرتعرق مرجع با روش‌های مبتنی بر دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ذرتی‌پور و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند که از روش‌های مبتنی بر دما، روش بلانی-کریدل در ایستگاه‌های استان خوزستان بالاترین دقت را دارد. بابامیری و دین پژوه (۱۳۹۵) در نتیجه تحقیقی که در حوضه آبریز ارومیه صورت گرفت، گزارش کردند که از بین روش‌های مبتنی بر دمای هوا، روش هارگریوز–سامانی بهترین عملکرد را داشته است. قلی‌زاده الپاوت و امینی نیا (۱۳۹۴) ضمن برآورد تبخیرتعرق پتانسیل به کمک داده‌های ایستگاه تبریز، روش بلانی-کریدل را بهترین روش برای محاسبه این پارامتر در حوضه مورد مطالعه معرفی نمودند. در مطالعات جهانبخش و همکاران (۱۳۹۱) روش بلانی-کریدل برای حوضه جنوبی رود ارس توصیه شده است. در مطالعات روشن و همکاران (۱۳۹۰) نتایج واسنجی چهار روش تورنت‌وایت، بلانی-کریدل، جنسن-هیز و هارگریوز-سامانی برای اقلیم ایران ارائه شده است که روش بلانی-کریدل هم‌خوانی بهتری با شرایط محیطی نشان داده است.

www.SID.ir

Archive of SID

شاهدی و زارعی (۱۳۹۰) در پژوهشی، ضمن بررسی تغییرات زمانی تبخیرتعرق پتانسیل در تبریز به این نتیجه رسیدند که روش بلانی-کریدل بهترین روش برای استان تبریز است. بر اساس نتایج ارزیابی مکانی روش‌های مبتنی بر دما، نقشه بهترین روش محاسبه تبخیرتعرق مرجع در هر ایستگاه در محیط GIS تهیه گردید (شکل ۵). در پنج ایستگاه الشتر، کوهدشت، خرم آباد، دورود و ازنا، روش هارگریوز-سامانی دارای بالاترین دقت بود. در چهار ایستگاه نورآباد، بروجرد، پلدختر و الیگودرز نیز روش بلانی-کریدل دقیق‌ترین روش بود. همچنین روش اسچندل به عنوان ضعیف‌ترین روش در دسته‌ی مبتنی بر دما انتخاب شد.



شکل ۵- بهترین روش‌های تخمین تبخیرتعرق مرجع از میان روش‌های مبتنی بر دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه

نتایج به دست‌آمده از مقایسه روش‌های مبتنی بر تابش

نتایج به دست‌آمده از مقایسه روش‌های مختلف تخمین تبخیر تعرق مرجع مبتنی بر تابش با روش FAO-56 در ایستگاه‌های استان لرستان در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان داد روش مک‌کینگ برای ایستگاه‌های الشتر، ازنا، بروجرد، دورود، خرم‌آباد، نورآباد، پلدختر با R^2، RMSE و CRM به ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۲۲ و ۰/۵۲- میلی‌متر بر روز، ۰/۹۹، ۰/۱۳ و ۰/۴۴- میلی‌متر بر روز، ۰/۹۸، ۰/۲۷ و ۰/۷۹- میلی‌متر بر روز، ۰/۹۷، ۰/۴۱ و ۰/۷۵- میلی‌متر بر روز، ۰/۹۹، ۰/۲۶ و ۰/۷۷- میلی‌متر بر روز، ۰/۹۹، ۰/۲۴ و ۰/۶۷- میلی‌متر بر روز، ۰/۹۶، ۰/۲۴ و ۰/۷۸- میلی‌متر بر روز بهترین نتایج را دارد. روش پرستلی- تیلور نیز برای ایستگاه کوهدشت با R^2، RMSE و CRM به ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۴۹ و ۰/۴۸- میلی‌متر بر روز و روش تورک برای ایستگاه الیگودرز با R^2، RMSE و CRM به ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۶۳ و ۰/۷۹- میلی‌متر بر روز بهترین عملکرد را داشتند. براساس شاخص CRM تمام روش‌های تخمین تبخیر تعرق مرجع مبتنی بر تابش در ایستگاه‌های مطالعاتی استان لرستان کم‌تر از روش مرجع FAO-56 برآورد کردند. لانگ و همکاران (۲۰۱۷) دریافتند روش مک کینگ بهترین عملکرد را در بین روش‌های مطالعه شده در جنوب غرب چین دارد (Lang et al., 2017). در مطالعات قمرنیا و یوسف‌وند (۱۳۹۷) برای ایستگاه آبعلی نیز روش مک‌کینگ در بین تمام روش‌ها به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تبخیرتعرق روزانه برای این ایستگاه انتخاب شد. زو و سینگ (۲۰۰۰) کارایی هشت روش تخمین تبخیرتعرق مرجع مبتنی بر تابش را در ایستگاه چنگینز در سوئیس بررسی کرده و روش مک‌کینگ را به عنوان بهترین روش معرفی نمودند که در تایید یافته‌های تحقیق حاضر می‌باشد (Xu and Singh., 2000).

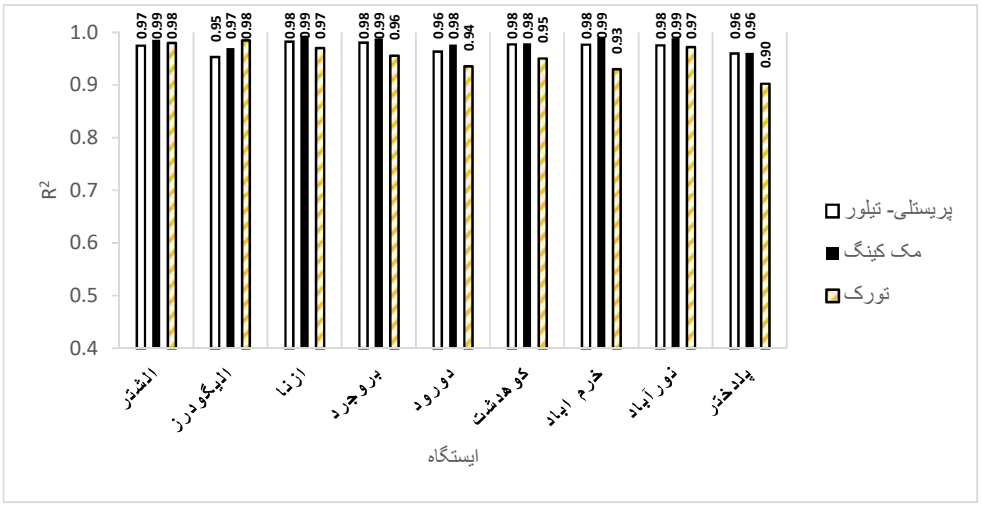
www.SID.ir

Archive of SID

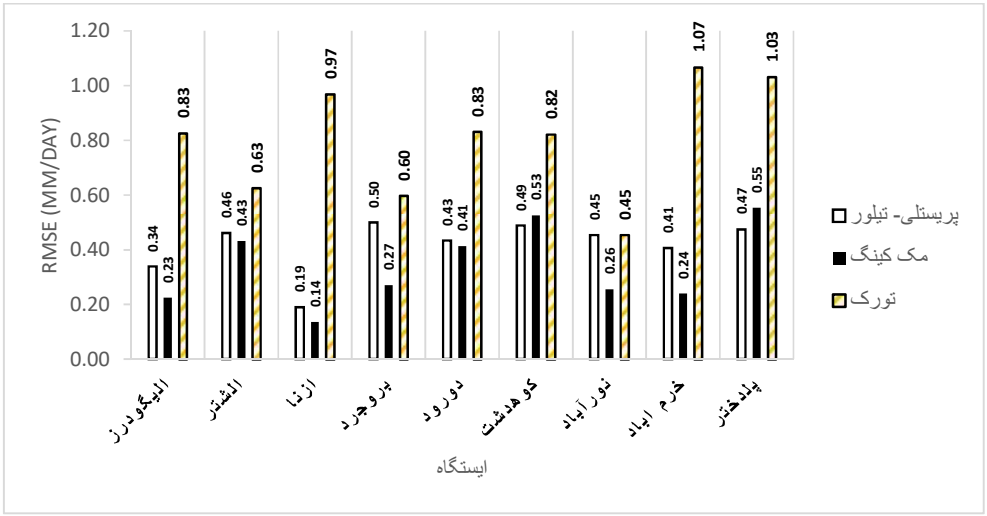
بر اساس نتایج روش‌های مبتنی بر تابش، نقشه بهترین روش محاسبه تبخیرتعرق مرجع در هر ایستگاه در محیط **GIS** تهیه گردید (شکل ۹). در هفت مورد از نه ایستگاه مطالعاتی، روش مک‌کینگ و در ایستگاه الیگودرز، روش تورک و در ایستگاه کوهدشت، روش پرستلی–تیلور دقت بالاتری داشتند. با توجه به آن‌که در بیش‌تر ایستگاه‌ها، روش مک‌کینگ از دقت بالاتری برخوردار بود به عنوان بهترین روش از میان روش‌های مبتنی بر تابش در استان پیشنهاد می‌گردد.

جدول ۴- بهترین روش تخمین تبخیرتعرق مرجع سالانه در میان روش‌های مبتنی بر تابش در استان لرستان

ایستگاه	پلدختر	نورآباد	خرم آباد	کوهدشت	دورود	بروجرد	ازنا	الیگودرز	الشتر
بهترین روش	MK	MK	MK	PT	MK	MK	MK	T	MK
رتبه	۴	۵	۴	۵	۴	۵	۵	۵	۵



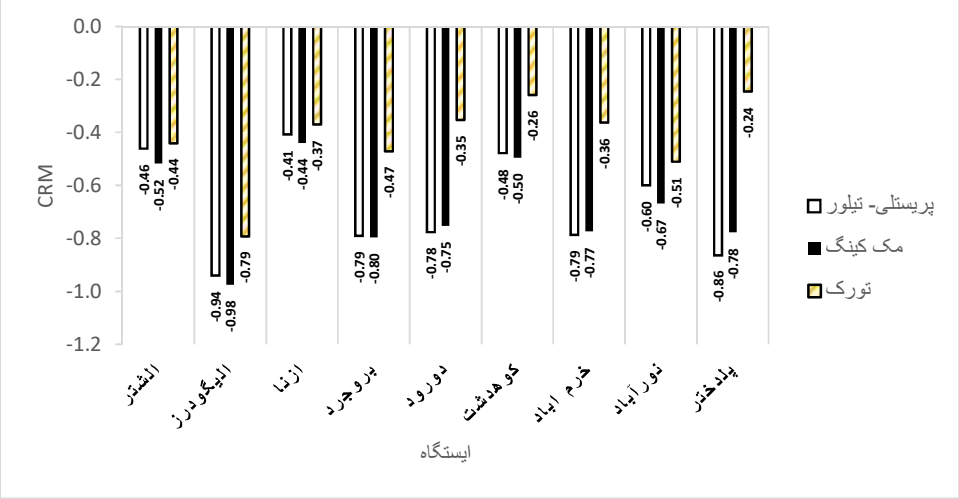
شکل ۶- مقادیر R2 تخمین تبخیرتعرق مرجع با روش‌های مبتنی بر تابش در ایستگاه‌های مورد مطالعه



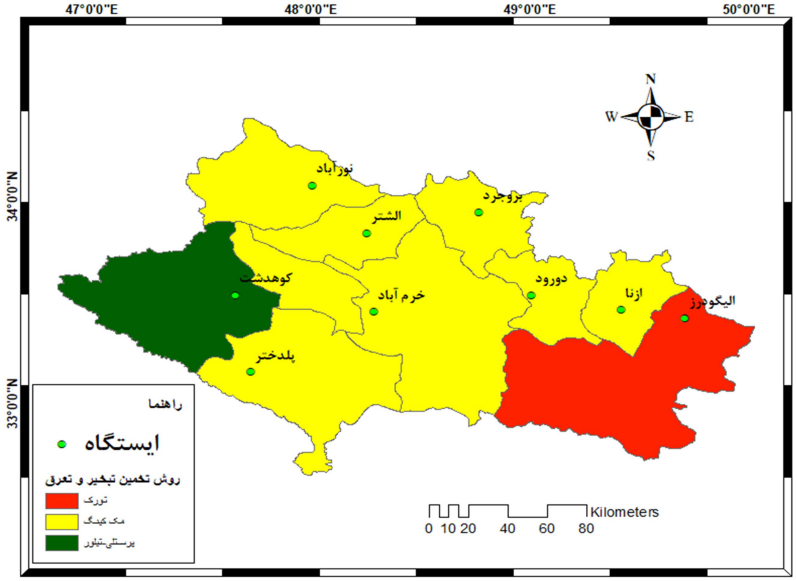
شکل ۷- مقادیر RMSE تخمین تبخیرتعرق مرجع با روش‌های مبتنی بر تابش در ایستگاه‌های مورد مطالعه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸- مقادیر CRM تخمین تبخیرتعرق مرجع با روش‌های مبتنی بر تابش در ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل ۹- بهترین روش های تخمین تبخیرتعرق مرجع از میان روش‌های مبتنی بر تابش در ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۵ - بهترین روش تخمین تبخیرتعرق مرجع سالانه مبتنی بر انتقال جرم در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	پلدختر	نورآباد	خرم آباد	کوهدشت	دورود	بروجرد	ازنا	الیگودرز	الشتر
بهترین روش	WMO	WMO	WMO	WMO	WMO	WMO	WMO	M	WMO
رتبه	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۵

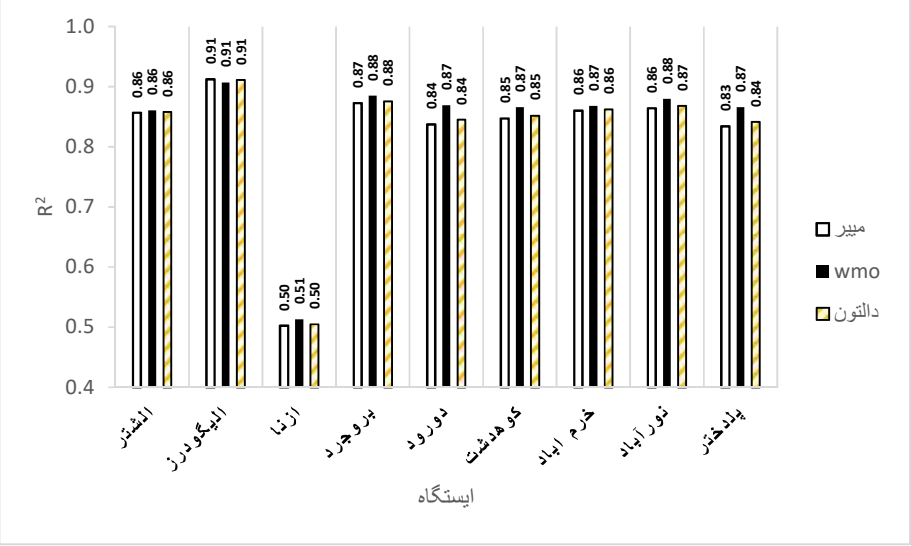
نتایج به دست‌آمده از مقایسه روش‌های مبتنی بر انتقال جرم

نتایج به دست‌آمده از مقایسه روش‌های مختلف تخمین تبخیرتعرق مرجع مبتنی بر انتقال جرم با روش FAO-56 در ایستگاه‌های استان لرستان در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که روش WMO برای ایستگاه-های الشتر، ازنا، بروجرد، دورود، کوهدشت، خرم آباد، نور آباد و پلدختر با R^2، RMSE و CRM به ترتیب برابر ۰/۸۶،

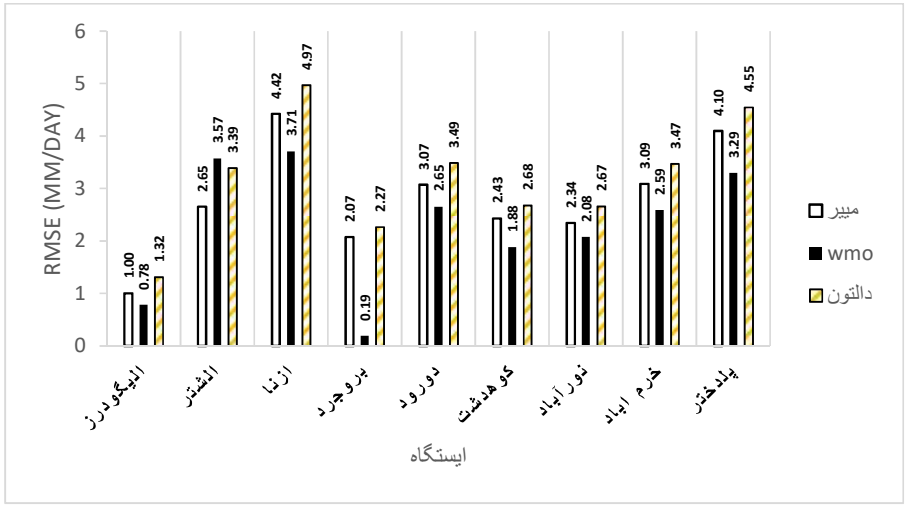
www.SID.ir

Archive of SID

۰/۷۸ و ۰/۶۰ میلی‌متر بر روز، ۰/۵۰، ۳/۷۰ و ۰/۰۳ میلی‌متر بر روز، ۰/۸۸، ۰/۱۹ و ۰/۱۱ میلی‌متر بر روز، ۰/۸۷، ۲/۶۵، ۰/۲۲ میلی‌متر بر روز، ۰/۸۶، ۱/۸۸ و ۰/۰۹- میلی‌متر بر روز، ۰/۸۷، ۲/۰۷ و ۰/۰۹ میلی‌متر بر روز، ۰/۸۸، ۱/۴۶ و ۰/۰۴ میلی‌متر بر روز، ۰/۸۶، ۲/۵۸ و ۰/۳۸ میلی‌متر بر روز و روش میر برای ایستگاه الیگودرز با R^2، RMSE و CRM به ترتیب برابر ۰/۹۱، ۲/۶۵، ۰/۱۴ میلی‌متر بر روز بهترین عملکرد را دارند. بر اساس شاخص CRM روش‌های میر و دالتون در تمام ایستگاه‌ها بیش برآورد و روش WMO در ایستگاه کوهدشت کم برآورد و در سایر ایستگاه‌ها بیش برآورد داشتند. نتایج تحقیق ذرتی پور و همکاران (۱۳۹۸) حاکی از برتری روش WMO در مقایسه با سایر روش‌های مبتنی بر انتقال جرم در ایستگاه‌های استان خوزستان بود.



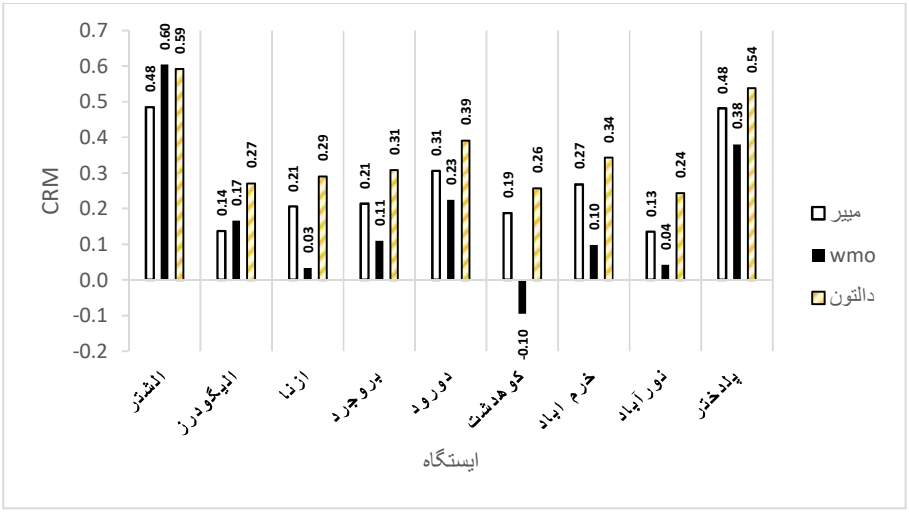
شکل ۱۰- مقادیر R2 تخمین تبخیرتعرق مرجع با روش‌های مبتنی بر انتقال جرم در ایستگاه‌های مورد مطالعه



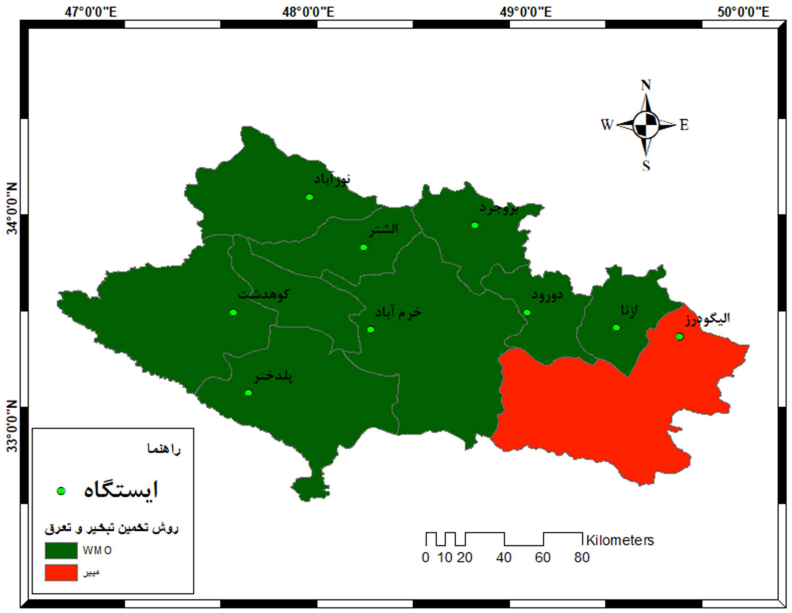
شکل ۱۱- مقادیر RMSE تخمین تبخیرتعرق مرجع با روش‌های مبتنی انتقال جرم در ایستگاه‌های مورد مطالعه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲- مقادیر CRM تخمین تبخیرتعرق مرجع با روش‌های مبتنی بر انتقال جرم در ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل ۱۳- بهترین روش های تخمین تبخیرتعرق مرجع از میان روش‌های مبتنی بر انتقال جرم در ایستگاه‌های مورد مطالعه

بر اساس نتایج ارزیابی مکانی روش‌های مبتنی بر انتقال جرم، نقشه بهترین روش محاسبه تبخیرتعرق مرجع در هر ایستگاه در محیط GIS تهیه گردید (شکل ۱۳). این شکل نشان می‌دهد که در هشت ایستگاه از نه ایستگاه مطالعاتی، روش WMO و در ایستگاه الیگودرز روش میر دقت بالاتری داشتند. روش WMO در ایستگاه‌های نورآباد، کوهدشت، پلدختر، خرم آباد، ازنا، الشتر، بروجرد و دورود بهترین نتیجه را ارائه کرد که نشان از برتری و دقت بالای این روش در استان لرستان دارد. روش دالتون نیز به عنوان ضعیف‌ترین روش نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر انتقال جرم در این استان مشخص شد.

نتیجه‌گیری

علی‌رغم اهمیت بسیار بالای پدیده تبخیرتعرق در برنامه‌ریزی منابع آب، به‌ویژه در کشاورزی، تاکنون تحقیقی کامل در زمینه بررسی و مقایسه روش‌های محاسبه تبخیرتعرق مرجع در استان لرستان صورت نگرفته است. در تحقیق حاضر به محاسبه

www.SID.ir

Archive of SID

تبخیرتعرق گیاه مرجع چمن با مدل‌هایی بر پایه دما، تابش و انتقال جرم برای نه ایستگاه سینوپتیک استان لرستان پرداخته شد. به دلیل عدم وجود داده‌های لایسیمتری در کل کشور، روش FAO-56 به عنوان روش مرجع در نظر گرفته شد. تبخیرتعرق برآورد شده از مدل ها با نتایج حاصل از روش FAO-56 مقایسه شده و بهترین مدل محاسبه تبخیرتعرق مرجع برای ایستگاه مورد مطالعه مشخص گردید.

در این پژوهش با استفاده از داده‌های هواشناسی نه ایستگاه استان لرستان، تبخیرتعرق مرجع به‌کمک سه دسته روش‌های مبتنی بر دما، تابش و انتقال جرم محاسبه گردید. نتایج نشان از برتری روش هارگریوز-سامانی و دقت پایین روش اسچندل در دسته روش‌های مبتنی بر دما، برتری روش مک‌کینگ و دقت پایین روش تورک در دسته روش‌های مبتنی بر تابش و برتری روش WMO و دقت پایین روش دالتون در دسته روش‌های مبتنی بر انتقال جرم داشت. به پژوهش‌گران توصیه می‌شود که در صورت عدم دسترسی به اطلاعات کافی برای محاسبه تبخیرتعرق با روش مرجع FAO-56، از روش‌های یاد شده که بهترین نتایج را در ایستگاه‌های مطالعاتی در استان لرستان داشتند، استفاده نمایند.

منابع

۱. بابامیری، ا و ی. دین پژوه، ۱۳۹۵، مقایسه و ارزیابی بیست روش تخمین تبخیرتعرق گیاه مرجع مبتنی بر سه دسته کلی دمای هوا، تابش خورشید و انتقال جرم در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال ۲۰، شماره ۷، صفحات ۱۴۵ تا ۱۶۱.

۲. پاشاخواه، پ.، ن. پیرمرادیان.، ن. خزدور.، ح. نشاگر و م، مشفق، ۱۳۹۳، واسنجی و ارزیابی سه روش تجربی برآورد تبخیرتعرق مرجع در برخی از شهرهای ایران، مجله علمی و فنی نیوار، شماره ۸۶-۸۷، صفحات ۳۹ تا ۵۳.

۳. جهانبخش، س.، م. رضایی بنفشه.، م. اسمعیل‌پور و م. تدینی، ۱۳۹۱، ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیرتعرق پتانسیل و توزیع مکانی سالانه آن در حوضه جنوبی رود ارس، نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی(دانشگاه تبریز)، سال ۱۶، شماره ۴۰، صفحات ۲۵ تا ۴۶.

۴. خوشحال، ج.، ح. زارع ابیانه و ع. جوشنی، ۱۳۹۴، ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیرتعرق مرجع با روش تشت تبخیر فائو در حوضه آبریز شرق و جنوب شرق کشور، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال ۸، شماره ۲۸، صفحات ۱ تا ۱۶.

۵. ذرتی‌پور، ا.، ا، سلطانی محمدی و ا، ذرتی‌پور، ۱۳۹۸، پایش زمانی و مکانی روش‌های تخمین تبخیرتعرق گیاه مرجع (مطالعه موردی: استان خوزستان)، شماره ۲، صفحات ۴۶۵ تا ۴۷۸.

۶. روشن، غ.، ف. خوش‌اخلاق و م. کرمپور، ۱۳۹۰، ارزیابی و اصلاح مدل مناسب تبخیرتعرق بالقوه برای ایران، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۸، صفحات ۴۹ تا ۶۸.

۷. شاهدی،ک.، م. زارعی، ۱۳۹۰، ارزیابی روش‌های برآورد تبخیرتعرق پتانسیل در استان مازندران، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال اول، شماره ۳، صفحات ۱۲ تا ۲۱.

۸. عطارد، پ.، س، معین صادقی.، ا، فتحی‌زاده.، م، مطهری.، س، راهبری سی‌سخت.، م، احمدی و و، بایرام‌زاده، ۱۳۹۴، مقایسه روش‌های دمایی و تشعشعی برآورد تبخیرتعرق مرجع با روش استاندارد **FAO Penman-Monteith** در گرگان، شماره ۲، صفحات ۳۵۹ تا ۳۶۹.

۹. قلی‌زاده الپاوت، ح و ک. امینی نیا، ۱۳۹۴، بررسی تغییرات زمانی تبخیرتعرق پتانسیل در تبریز، فصلنامه فضای جغرافیایی، سال ۱۵، شماره ۴۹، صفحات ۱۹ تا ۳۵.

www.SID.ir

Archive of SID

۱۰. قمرنیا، ه و م. یوسفوند، ۱۳۹۷، مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیرتعرق مرجع بر اساس روش‌های تابش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران، شماره ۸، صفحات ۲۳۷ تا ۲۵۱.

۱۱. محمدی، ح.، ع. حنفی و م. سلطانی، ۱۳۸۹، برآورد میزان تبخیرتعرق پتانسیل در ایستگاه‌های استان اصفهان، مجله چشم‌انداز جغرافیایی، سال پنجم، شماره ۱۲، صفحات ۱۵۳ تا ۱۶۷.

۱۲. مهدی‌زاده، س.، ف، خشائی.، ج، بهمنش و ر، دلیرحسن‌نیا، ۱۳۹۷، تحلیل مقایسه‌ای دقت پنج مدل مختلف رابطه والیانتزاس در برآورد تبخیرتعرق مرجع، علوم و مهندسی آبیاری، شماره ۳، صفحات ۱۱۹ تا ۱۳۲.

۱۳. نوری، ح.، ع. بادیه‌نشین و ا. محمدی محمدآبادی، ۱۳۹۵، ارزیابی روش‌های محاسباتی تبخیرتعرق گیاه مرجع و تعیین تبخیرتعرق گیاه پسته در رفسنجان، شماره ۴، صفحات ۷۷ تا ۸۱.

14. Ahmadipour, A., Shaibani, P. and Mostafavi, S.A., 2019. Assessment of empirical methods for estimating potential evapotranspiration in Zabol Synoptic Station by REF-ET model. Medbiotech Journal, 3(01), pp.1-4..

15. Didari, S. and Ahmadi, S.H., 2018. Calibration and evaluation of the FAO56-Penman-Monteith, FAO24-radiation, and Priestly-Taylor reference evapotranspiration models using the spatially measured solar radiation across a large arid and semi-arid area in southern Iran. Theoretical and Applied Climatology, 136(1-2), pp.441-455.

16. Farzanpour, H., Shiri, J., Sadraddini, A.A. and Trajkovic, S., 2018. Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. Hydrology Research, 50(1), pp.282-300.

17. Hassanli, M., Ebrahimian, H., Mohammadi, E., Rahimi, A. and Shokouhi, A., 2016. Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMED, and SWAP models. Agricultural water management, 176, pp.91-99.

18. Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X. and Zhang, M., 2017. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in southwestern China. Water, 9(10), p.734.

19. Mohawesh, O.E. and Talozi, S.A., 2012. Comparison of Hargreaves and FAO56 equations for estimating monthly evapotranspiration for semi-arid and arid environments. Archives of Agronomy and Soil Science, 58(3), pp.321-334.

20. Paredes, P. and Pereira, L.S., 2019. Computing FAO56 reference grass evapotranspiration PM-ETo from temperature with focus on solar radiation. Agricultural water management, 215, pp.86-102.

21. Phad, S.V., Dakhore, K.K. and Sayyad, R.S., 2019. Comparison of different methods for estimation of reference evapotranspiration at Parbhani, Maharashtra. Journal of Agrometeorology, 21(2), pp.236-238.

22. Shiri, J., 2017. Evaluation of FAO56-PM, empirical, semi-empirical and gene expression programming approaches for estimating daily reference evapotranspiration in hyper-arid regions of Iran. Agricultural water management, 188, pp.101-114.

23. Song, X., Lu, F., Xiao, W., Zhu, K., Zhou, Y. and Xie, Z., 2019. Performance of 12 reference evapotranspiration estimation methods compared with the Penman–Monteith method and the potential influences in northeast China. Meteorological Applications, 26(1), pp.83-96

24. Xu, C.Y. and Singh, V.P., 2000. Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. Hydrological processes, 14(2), pp.339-349.

www.SID.ir