

مقاله علمی-پژوهشی

## تحلیل حساسیت تبخیر تعرق مرجع و ارزیابی مجموعه داده‌های هواشناسی ERA5، MERRA2 و CFSv2

رحمان باریده<sup>۱\*</sup> و فرشته نسیمی<sup>۲</sup>

### چکیده

هدف از این پژوهش بررسی حساسیت تبخیر تعرق مرجع نسبت به متغیرهای هواشناسی و معرفی پایگاه داده‌ای با بیشترین دقت در ارائه متغیرهای هواشناسی تأثیرگذار بر تبخیر تعرق مرجع در حوضه دریاچه ارومیه بود. برای این منظور ۲۴ ایستگاه سینوپتیک انتخاب و داده‌های هواشناسی آن‌ها به صورت روزانه در بازه ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ تهیه گردید. سپس با استفاده از رابطه فائو پنمن مانیتث تبخیر تعرق مرجع محاسبه گردید و تأثیر تغییرات متغیرهای هواشناسی به صورت جداگانه در بازه  $\pm 20\%$  درصد بر آن بررسی شد. سپس دقت داده‌های هواشناسی ERA5، CFSv2 و MERRA2 مورد ارزیابی قرار گرفت و دقیق‌ترین آن‌ها معرفی گردید. میانگین ده‌ساله تبخیر تعرق مرجع ایستگاه‌های هواشناسی برابر  $3/1$  میلی‌متر در روز به دست آمد و نتایج نشان داد که بیشینه دما تأثیرگذارترین متغیر هواشناسی بر تغییرات تبخیر تعرق مرجع است. پس از آن به ترتیب سرعت باد و کمینه دما بیشترین تأثیر را داشتند. مقدار ضریب حساسیت برای بیشینه دما، سرعت باد و کمینه دما به ترتیب  $0/4$ ،  $0/2$  و  $0/1$  به دست آمد. بررسی داده‌های هواشناسی ERA5، CFSv2 و MERRA2 نشان دادند که مجموعه داده‌های ERA5 دارای بیشترین دقت هستند. بر اساس نتایج، میانگین ۱۰ ساله تبخیر تعرق مرجع ERA5 برابر  $2/86$  میلی‌متر بر روز به دست آمد. این مقدار بر اساس شاخص CRM دارای ۸ درصد کم برآوردی نسبت به مقدار به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های هواشناسی بود. در نهایت شاخص‌های EF  $(0/92)$  و  $nRMSE$   $(0/17)$  تبخیر تعرق مرجع ERA5 را در رتبه مناسب و قابل اعتماد قرار دادند.

واژگان کلیدی: تحلیل حساسیت، فائو پنمن مانیتث، تبخیر تعرق مرجع، مجموعه داده‌های هواشناسی جهانی

### مقدمه

تبخیر تعرق م صرف می شود (FAO, 2008)؛ بنابراین برآورد دقیق تبخیر تعرق از ملزومات پایداری منابع آب است. همچنین برآورد تبخیر تعرق برای مدیریت آبیاری (Allen et al., 2007)، رشد گیاه (Blatchford et al., 2020)، پایش خشک سالی (Lorenz et al., 2017، Golian et al., 2019)، چرخه آب و مدیریت منابع آب زیرزمینی (Wilcox, 2019) مهم است. معمولاً برای اندازه‌گیری تبخیر تعرق از لایسیمتر و روابط مبتنی بر داده‌های هواشناسی استفاده می‌شود؛ اما با حوادث لایسیمتر و ایستگاه‌های هواشناسی در هر مکانی امکان‌پذیر نیست و هزینه زیادی دارد (Michael and Mbajjorgu, 2020).

کاهش منابع آب در پی کاهش بارندگی‌ها، افزایش تقاضا، رقابت بخش‌های مختلف در استفاده از این منابع و افزایش اراضی فاریاب اهمیت مدیریت و مصرف بهینه این منابع را بیان می‌کند. بر اساس گزارش فائو در کشورهای در حال توسعه بیش از ۹۰ درصد آب‌های استحصال شده در بخش کشاورزی از طریق

<sup>۱</sup> دکتری تخصصی آبیاری و زهکشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، ایران (نویسنده مسئول: rahman.barideh@gmail.com)

<sup>۲</sup> کاندیدای دکتری تخصصی آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷

پلوسی و همکاران در مطالعه‌ای عمل کرد تخمین تبخیر تعرق مرجع را بر اساس داده‌های هواشناسی، به ترتیب توسط دو مجموعه داده باز تحلیل UERRA MESCAN-SURFEX (UMS) و ERA5-Land (E5L) ارزیابی کردند. در این مطالعه که در منطقه کامپانیا در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ انجام شد، دما، سرعت باد، کمبود فشار بخار، تابش خورشیدی و تبخیر تعرق مرجع مشتق شده از مجموعه داده‌های باز تحلیل، با تخمین‌های به دست آمده با داده‌های درون یابی شده توسط شبکه‌ای از ۱۸ ایستگاه هواشناسی خودکار مقایسه شدند. آن‌ها بیان کردند که ERA5-Land هم در داده‌های آب و هوا و هم در برآورد تبخیر تعرق مرجع از UMS بهتر عمل کرده است. nRMSE برای تبخیر تعرق مرجع محاسبه شده با داده‌های E5L برابر ۱۷ درصد و با داده‌های UMS برابر ۲۲ درصد بود (Pelosi et al., 2020).

علاوه بر این، در مطالعات متعددی پایگاه داده‌ها و ماهواره‌های مختلفی در زمینه داده‌های هواشناسی از جمله مدل جفت شده سیستم پیش‌بینی اقلیمی (CFS<sup>2</sup>)، ماهواره TRMM<sup>3</sup>، مدل PERSIANN<sup>4</sup>، پایگاه داده ERA5<sup>5</sup> و GLDAS مورد بررسی قرار گرفته‌اند (تیموری و همکاران ۱۳۹۸، موسی و همکاران ۱۳۹۸، زنگنه و همکاران ۱۳۹۷، Pelosi et al., 2020، Park and Choi, 2015). نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که دقت متغیرهای هواشناسی ارائه شده در هر پایگاه داده برای هر منطقه متفاوت بوده است. لذا انتخاب پایگاه داده مناسب برای هر منطقه مستلزم بررسی و مقایسه دقت متغیرهای آن است. تبخیر تعرق مرجع، پایه برنامه‌ریزی و مصرف آب در بخش کشاورزی بوده و برآورد دقیق آن می‌تواند به حیات منابع آب منجر شود. از طرف دیگر قرار گرفتن ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده شهری و محدودیت احداث این ایستگاه‌ها به تعداد زیاد منجر به برآورد غیرواقعی تبخیر تعرق مرجع می‌شود. همچنین ایجاد لایه‌های هواشناسی با روش‌های زمین‌آمار بخصوص برای بازه‌های زمانی چند ساله و به صورت ساعتی و روزانه بسیار

تبخیر تعرق به صورت نقطه‌ای و به تعداد محدود اندازه‌گیری می‌گردد و از آنجایی که بیشتر مطالعات در مقیاس منطقه‌ای انجام می‌گیرد، نیاز به تعمیم این اطلاعات از حالت نقطه‌ای به منطقه‌ای است. برای این منظور روش‌های متعددی از جمله روش‌های آمار کلاسیک، میانگین حسابی و رگرسیون وجود دارد؛ اما با توجه به اینکه در این روش‌ها موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی مدنظر قرار نمی‌گیرد لذا نتایج آن‌ها با ابهام مواجه است؛ بنابراین استفاده از روش‌های زمین‌آمار مانند روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ، وزن‌دهی عکس‌فاصله پیشنهاد گردید (Gong et al., 2005، Mardikis et al., 2005، Vanderlinden et al., 2008، Alsamamra et al., 2009، Barideh et al., 2022).

روش‌های درون‌یابی در زمینه‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است، از جمله تبخیر تعرق (Michael and Mbajiorgu, 2020)، هواشناسی (Gómez et al., 2020)، بارندگی (Rata et al., 2020) و آب‌های زیرزمینی (Xiao et al., 2016). علاوه بر این در دهه‌های اخیر با پیشرفت علوم کامپیوتری و افزایش ماهواره‌های سنجنده‌ای، پایگاه داده‌های زیادی به وجود آمده‌اند که اطلاعات هواشناسی را به طور گسترده در سطح جهان و به صورت نقطه‌به‌نقطه ارائه می‌دهند. میری و همکاران (۱۳۹۶) مقایسه‌ای بین داده‌های مدل همسان‌سازی داده‌های زمینی (GLDAS<sup>1</sup>) و داده‌های اندازه‌گیری شده انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که داده‌های این مدل در سطح ایران از دقت بسیار مناسبی برخوردار است و میزان خطای این مدل در برآورد متوسط دمای اندازه‌گیری شده بسیار اندک است.

همچنین پارک و چوی با استفاده از داده‌های ایستگاهی و داده‌های مدل همسان‌سازی جهانی مقدار تبخیر تعرق گیاه مرجع را در سیزده سایت شبه‌جزیره کره برآورد کردند. در نهایت بیان کردند که نتایج حاصل از هر دو روش تغییرات فصلی مشابهی را نشان می‌دهد (Park and Choi, 2015).

<sup>2</sup> Climate Forecast System

<sup>3</sup> Tropical Rainfall Measuring Mission

<sup>4</sup> Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks

<sup>5</sup> Fifth generation ECMWF Atmospheric Reanalysis

<sup>1</sup> Global Land Data Assimilation System

مساحت آن حدود ۵۱۸۰۰ کیلومترمربع است که حدود ۳/۲ درصد مساحت کل کشور را در برمی‌گیرد.

این حوضه در محدوده استان‌های آذربایجان غربی (۴۶ درصد)، آذربایجان شرقی (۴۳ درصد) و کردستان (۱۱ درصد) واقع شده است. ارتفاع آن از ۱۲۰۲ تا ۳۷۵۱ متر از سطح دریا متغیر است و آب‌وهوای آن بر اساس طبقه‌بندی دمارتن به‌عنوان آب‌وهوای سرد و نیمه‌خشک با میانگین دمای سالانه ۱۳ درجه سانتی‌گراد طبقه‌بندی می‌شود (خلیلی و همکاران ۱۴۰۱). میانگین حداکثر و حداقل دمای ماهانه نیز به ترتیب برابر ۳۲ و ۱۳- درجه سانتی‌گراد است. همچنین میانگین بارندگی سالانه در این منطقه از ۱۸۰ تا ۴۴۰ میلی‌متر متغیر است (Barideh and Nasimi, 2022).

### تبخیر تعرق مرجع زمینی

به‌منظور برآورد تبخیر تعرق مرجع روزانه، داده‌های هواشناسی روزانه ۲۴ ایستگاه سینوپتیک با دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸) جمع‌آوری گردید که موقعیت ایستگاه‌های موردبررسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

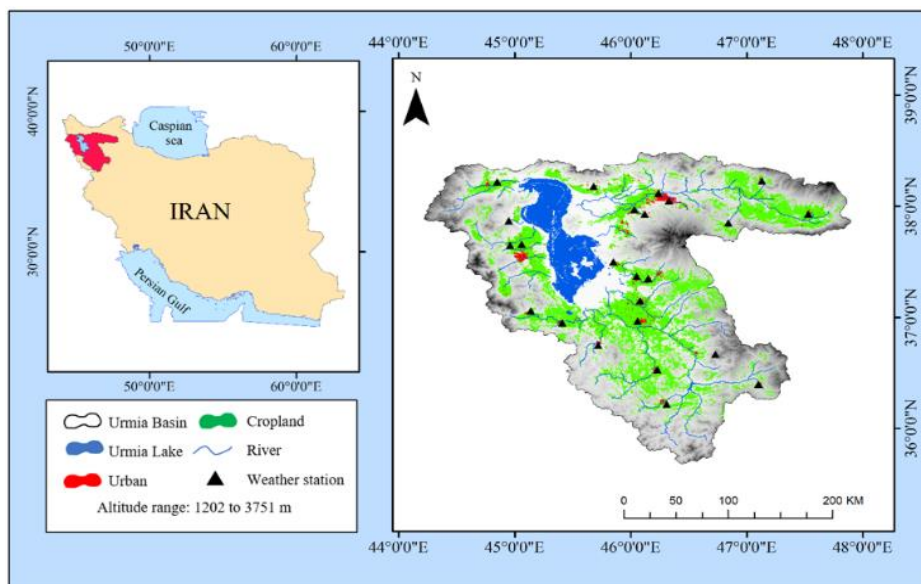
هزینه‌بر و وقت‌گیر است. لذا استفاده از پایگاه داده‌های جهانی می‌تواند در این زمینه مفید باشد.

این پژوهش باهدف تعیین تأثیرگذارترین داده‌های هواشناسی در برآورد تبخیر تعرق مرجع و معرفی پایگاه داده‌ای با بیشترین دقت در ارائه داده‌های هواشناسی انجام شد. برای این منظور، ابتدا تحلیل حساسیت تبخیر تعرق مرجع نسبت به تغییر متغیرهای هواشناسی صورت گرفت و تأثیرگذارترین متغیرها تعیین شدند. در مرحله بعد پایگاه داده‌های مختلف موردبررسی قرار گرفت و دقیق‌ترین پایگاه داده‌ای ارائه‌دهنده این متغیرها معرفی گردید. در نهایت سری زمانی تبخیر تعرق مرجع پایگاه داده منتخب با استفاده از مقادیر ایستگاه‌های هواشناسی ارزیابی گردید.

### مواد و روش‌ها

#### محدوده مطالعاتی

این پژوهش در حوضه دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران صورت گرفت (شکل ۱). این حوضه بین ۴۴ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است.



شکل ۱- محدوده مطالعاتی و محل ایستگاه‌های هواشناسی در سطح حوضه دریاچه ارومیه

نظر برای تحلیل حساسیت قبل از اعمال تغییر است. در این مطالعه مقدار متغیر هواشناسی یا  $V$  در دامنه  $\pm 20\%$  درصد با گام-های ۵ درصد تغییر داده شد و مقدار تغییر در  $ET_0$  و در نتیجه ضریب حساسیت  $SC$  محاسبه گردید.

### مجموعه داده CFSv2

سیستم پیش‌بینی آب و هوا (CFS) مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) یک مدل کاملاً جفت شده است که نشان‌دهنده تعامل بین جو زمین، اقیانوس‌ها، خشکی و یخ دریا است. CFS در مرکز مدل سازی محیطی (EMC) در NCEP توسعه داده شد و در ۳۰ مارس ۲۰۱۱ به نسخه ۲ (CFSv2) ارتقا یافت. پیش‌بینی‌های این پایگاه داده چهار بار در روز با فواصل شش ساعته مقارن اولیه می‌شوند. تفکیک مکانی این داده‌ها  $0.25^\circ$  درجه است.<sup>۱</sup>

### مجموعه داده ERA5

ERA5 نسل پنجم از محصول باز تحلیل پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوی اروپا (ECMWF) برای آب و هوای جهانی در ۴ تا ۷ دهه گذشته است و تخمین‌های ساعتی را برای متغیرهای اتمسفری، امواج اقیانوس و کمیت‌های سطح زمین ارائه می‌دهد. داده‌های ERA5 به صورت روزانه و با تأخیر ۵ روزه به روزرسانی می‌شوند و در صورت بروز خطاهای بارز در این داده‌ها، نسخه اصلاح‌شده نهایی ۲ تا ۳ ماه بعد منتشر شده و مراتب به کاربران اطلاع‌رسانی می‌شود. داده‌های باز تحلیل ERA5 تفکیک مکانی  $0.25^\circ$  درجه و تفکیک زمانی یک ساعته دارند.<sup>۲</sup>

### مجموعه داده MEERA2

مدل MERRA2 نسخه دوم پایگاه MERRA است که توسط مرکز مدل‌سازی و داده‌گذاری سازمان فضایی و هوانوردی

برای برآورد تبخیر تعرق مرجع از رابطه فائو پینمن مانیت (رابطه ۱) استفاده گردید و تبخیر تعرق مرجع به صورت روزانه برای هر ایستگاه هواشناسی محاسبه شد.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

که در آن،  $ET_0$  تبخیر تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار نسبت به درجه حرارت (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد)،  $R_n$  تابش خالص (مگا ژول بر مترمربع بر روز)،  $G$  شار گرما به داخل خاک،  $\gamma$  ضریب رطوبتی (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد)،  $T$  متوسط دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)،  $e_a$  و  $e_s$  به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی آب (میلی بار)،  $u_2$  سرعت باد در روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه) است.

### تحلیل حساسیت

برای بررسی حساسیت تبخیر تعرق مرجع به تغییر متغیرهای هواشناسی از روش ژانگ و همکاران استفاده گردید (Zhang et al., 2010) (رابطه ۲).

$$SC' = (\Delta ET_0 / \Delta V) \quad (2)$$

که در آن  $SC'$  ضریب حساسیت،  $\Delta V$  میزان تغییر در یک متغیر هواشناسی مشخص و  $\Delta ET_0$  میزان تغییر در  $ET_0$  ناشی از تغییر متغیر هواشناسی مورد نظر است. چون مقیاس متغیرهای هواشناسی یکسان نیست بنابراین، می‌توان استنباط کرد که مقدار  $SC'$  حساس به نوع متغیرهای هواشناسی و یا  $ET_0$  خواهد بود، لذا برای حل آن از شاخص بی‌بعد  $SC$  به شرح زیر استفاده گردید (رابطه ۳).

$$SC = (\Delta ET_0 / ET_0) / (\Delta V / V) \quad (3)$$

که در آن  $SC$  ضریب بی‌بعد حساسیت است. در این رابطه  $ET_0$  و  $V$  به ترتیب مقادیر پایه  $ET_0$  و متغیر هواشناسی مورد

<sup>1</sup>www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00877

<sup>2</sup>cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form

بیان‌کننده تفاوت میان مقدار مدل و مقدار واقعی است. مقدار CRM نشان‌دهنده بیش برآوردی و کم برآوردی است و اگر برابر صفر باشد نشان‌دهنده تطابق کامل بین مقادیر اندازه‌گیری و مقادیر پایگاه داده است. مقادیر مثبت و منفی به ترتیب بیش برآوردی و کم برآوردی را نشان می‌دهند. مقدار کارایی مدل (EF) بین منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و بهترین عملکرد را زمانی نشان می‌دهد که مقدار آن برابر یک باشد. مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) بیان‌کننده وضعیت متغیرهای پایگاه داده است. مقدار کمتر از ۱۰ درصد وضعیت ایده‌آل، بازه ۱۰ تا ۲۰ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب نشانگر وضعیت مناسب و متوسط مدل در برآورد و بیشتر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده عدم اطمینان به مدل است.

### محاسبات

در ابتدا با جمع‌آوری داده‌های روزانه هواشناسی ۲۴ ایستگاه داخل حوضه دریاچه ارومیه مقدار تبخیر تعرق مرجع روزانه برای هر ایستگاه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید. سپس با تغییر مقادیر متغیرهای هواشناسی در بازه  $\pm 20\%$  در صد با گام‌های ۵ درصدی تحلیل حساسیت انجام شد و تأثیر هر یک از متغیرهای هواشناسی بر تغییر مقدار تبخیر تعرق مرجع مشخص گردید. در مرحله بعد سری زمانی مقادیر متغیرهایی که بیشترین حساسیت را در تبخیر تعرق مرجع ایجاد کردند از پایگاه داده‌های موردبررسی به صورت NetCDF در بازه زمانی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ اخذ گردید. سپس با مقادیر ایستگاه‌های هواشناسی مقایسه و ارزیابی شدند. در این پژوهش برای انجام محاسبات و پردازش داده‌ها از نرم‌افزار مایکروسافت اکسل و پایتون نسخه ۳ استفاده گردید.

### نتایج و بحث

#### تبخیر تعرق مرجع

در شکل (۲) تغییرات تبخیر تعرق مرجع به صورت روزانه برای حوضه دریاچه ارومیه از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ نشان داده شده

ملی آمریکا (NASA) ارائه شده است. مجموعه داده‌های MERRA2 شامل داده‌های بازتحلیل است. پایگاه داده MERRA از نسخه ۵ سامانه مشاهدات زمین Goddard (GEOS-5) که یک مدل گردش عمومی جو است و سامانه داده‌گذاری داده‌ها (DAS) استفاده می‌کند. MERRA روی تجزیه و تحلیل بلند مدت شرایط آب و هوایی تمرکز دارد و با به‌کارگیری مشاهدات نامنظم مکانی و زمانی، مجموعه داده‌های شبکه‌بندی شده را با دقت قابل قبول ارائه می‌دهد. تفکیک مکانی داده‌های MERRA2 برابر  $0.625 \times 0.1/5$  درجه بوده و این داده‌ها به صورت روزانه قابل دسترسی هستند<sup>۱</sup>.

### شاخص‌های ارزیابی

برای مقایسه و ارزیابی متغیرهای هواشناسی پایگاه داده‌های موردبررسی با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی از شاخص‌های زیر استفاده گردید.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (6)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (7)$$

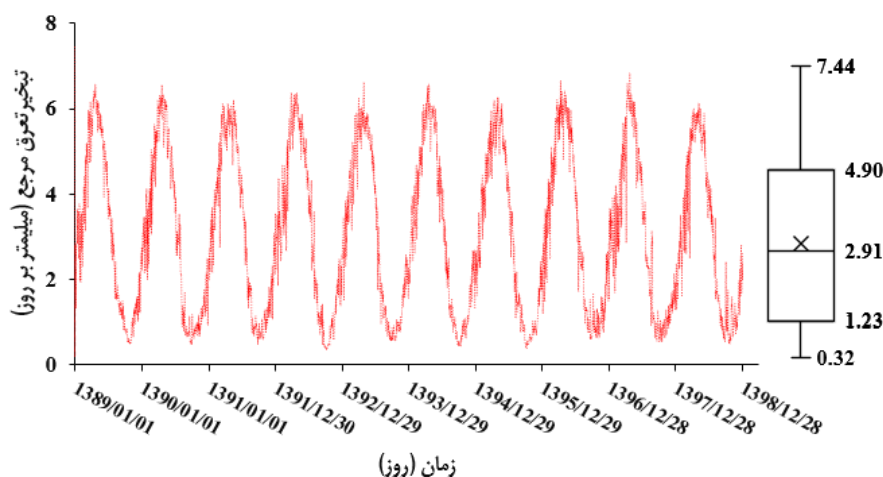
$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیان‌کننده روند داده‌ها است و هر چه به عدد یک نزدیک‌تر باشد بیان می‌کند که روند متغیرهای پایگاه داده دقیق‌تر است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

<sup>1</sup>gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/#:~:text=MERRA%2D2%20is%20the%20first,(say)%20Greenland%20and%20Antarctica

تغرق مرجع روزانه به ترتیب برابر ۰/۳۲ و ۷/۴۴ میلی‌متر در روز به دست آمد. میانگین ده‌ساله تبخیر تعرق مرجع حوضه دریاچه ارومیه برابر ۳/۱ میلی‌متر در روز محاسبه گردید.

این شکل با استفاده از میانگین‌گیری از تبخیر تعرق مرجع روزانه ۲۴ ایستگاه هواشناسی مورد بررسی به دست آمده است. همچنین مقادیر کمینه، چارک اول، میانه، میانگین، چارک سوم و بیشینه نشان داده شده است. کم‌ترین و بیشترین مقدار تبخیر



شکل ۲- میانگین روزانه تبخیر تعرق مرجع ۲۴ ایستگاه هواشناسی حوضه دریاچه ارومیه

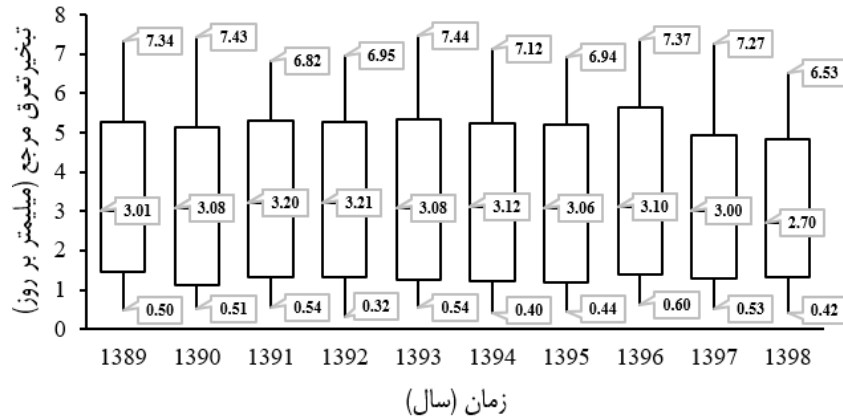
تغرق مرجع داشته است و با تغییر  $\pm 20\%$  در صد آن تبخیر تعرق مرجع در بازه  $\pm 8\%$  درصد تغییر کرده است. در مرحله بعد تغییرات سرعت باد بیشترین تأثیر را داشته است و تغییرات  $\pm 20\%$  درصد آن باعث نوسان تبخیر تعرق مرجع در بازه  $\pm 4\%$  درصد شده است و در رتبه بعد تغییرات دمای کمینه قرار گرفته است که تبخیر تعرق مرجع را به میزان  $\pm 2\%$  درصد تغییر داده است؛ اما تغییرات کمینه و بیشینه رطوبت تأثیر اندکی بر تبخیر تعرق مرجع داشته است. همچنین شکل (۴) بیان می‌کند که متغیرهای بیشینه و کمینه دما و سرعت باد رابطه مستقیم با کاهش یا افزایش تبخیر تعرق مرجع دارند اما تغییرات کمینه و بیشینه رطوبت نسبی رابطه معکوس دارد. به طوری که با افزایش رطوبت نسبی مقدار تبخیر تعرق مرجع کاهش پیدا می‌کند و بلعکس. مروج الاحکامی و همکاران (۱۴۰۱) در بررسی حساسیت تبخیر تعرق مرجع نسبت به متغیرهای هواشناسی در استان یزد و در مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه بیان کردند که سرعت باد و دمای بیشینه بیشترین تأثیر را در تغییر تبخیر تعرق مرجع داشته‌اند. همچنین دین پژوه و

در شکل (۳) نمودار جعبه‌ای تبخیر تعرق مرجع روزانه هر سال به صورت جداگانه نشان داده شده است. کمینه تبخیر تعرق مرجع روزانه در سال ۱۳۹۲ با مقدار ۰/۳۲ میلی‌متر در روز ثبت شده است. همچنین بیشینه تبخیر تعرق مرجع روزانه با مقدار ۷/۴۴ میلی‌متر در سال ۱۳۹۳ رخ داده است. بر اساس شکل مشاهده می‌شود که در سال ۱۳۹۸ کمترین میانگین تبخیر تعرق مرجع در دوره آماری با مقدار ۲/۷ میلی‌متر در روز ثبت شده است.

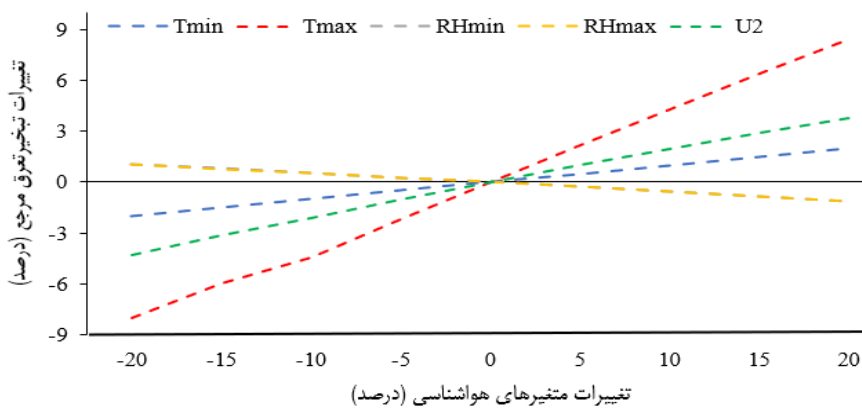
### تحلیل حساسیت

در شکل (۴) تأثیر تغییر متغیرهای هواشناسی بر تبخیر تعرق مرجع نشان داده شده است. برای این منظور داده‌های هواشناسی به صورت جداگانه در بازه  $\pm 20\%$  درصد و با گام‌های ۵ درصد تغییر داده شدند و تأثیر مرحله به مرحله آن ثبت گردید. شکل (۴) از میانگین‌گیری نتایج ۲۴ ایستگاه هواشناسی مورد بررسی حاصل شده است. بر اساس شکل (۴) مشاهده می‌شود که تغییر دمای بیشینه بیشترین تأثیر را بر تبخیر

همکاران (۱۳۹۷) در بررسی حساسیت تبخیر تعرق مرجع نسبت به متغیرهای هواشناسی در شمال و شمال غرب ایران و در مقیاس سالانه و ماهانه به این نتیجه رسیدند که بیشینه و کمینه دما بیشترین تأثیر را در نوسانات تبخیر تعرق مرجع داشته است.



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای تبخیر تعرق مرجع روزانه سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ بر حسب میلی‌متر در روز



شکل ۴- تأثیر تغییر متغیرهای هواشناسی بر تغییر تبخیر تعرق مرجع

جدول ۱- ضریب حساسیت تبخیر تعرق مرجع نسبت به متغیرهای هواشناسی

	Tmax	U <sub>2</sub>	Tmin	RHmax	RHmin
SC	۰/۴	۰/۲	۰/۱	-۰/۰۹	-۰/۱

و مقادیر در جدول (۲) نشان داده شده است. همچنین برای تعیین بهترین پایگاه داده از رتبه‌بندی شاخص‌های ارزیابی استفاده گردید. در بررسی بیشینه دما، بیشترین مقدار  $R^2$  با مقدار ۰/۹۶ مربوط به ERA5 بود. همچنین مقدار  $R^2$  برای CFSv2 و

### ارزیابی پایگاه داده‌ها

در بخش قبل متغیرهای هواشناسی تأثیرگذار بر تبخیر تعرق مرجع مشخص گردید. در این بخش مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای این متغیرها در سه پایگاه داده موردنظر، محاسبه شد

نشان داد که همه پایگاه داده ها دارای خطای زیادی هستند و مقدار nRMSE آن‌ها بیشتر از ۰/۴۸ است. همچنین ERA5 و CFSv2 کم برآورد و MERRA2 بیش برآورد تشخیص داده شدند. در جدول (۲) جمع رتبه‌های شاخص‌های ارزیابی برای هر متغیر هواشناسی نشان داده شده است. مجموع رتبه‌های ERA5، CFSv2 و MERRA2 در سه متغیر هواشناسی به ترتیب برابر ۱۹، ۲۵ و ۳۷ به دست آمد. بر این اساس داده‌های ERA5 به‌عنوان داده‌های برتر انتخاب گردید. محمدی قلعه‌نی و شرفی (۱۴۰۱) در بررسی دقت داده‌های میانگین دمای روزانه پایگاه داده‌های ERA5 و CRU TS4.05 در سطح ایران به این نتیجه رسیدند که دقت ERA5 بیشتر است و nRMSE آن کمتر از ۰/۲ است.

MERRA2 به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۹۴ به دست آمد. مقدار nRMSE و EF پایگاه داده‌های ERA5 و CFSv2 مساوی هم و به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۹۲ به دست آمد. رتبه بندی شاخص‌های ارزیابی نشان داد که دقت داده‌های بی‌شینه دمای ERA5 و CFSv2 یکسان است و بی‌شینه دما MERRA2 در رتبه بعدی قرار می‌گیرد. همچنین بر اساس شاخص CRM دو پایگاه داده CFSv2 و ERA5 کم برآورد تشخیص داده شدند. در بررسی کمینه دما، مقدار همه شاخص‌های ارزیابی برای داده‌های ERA5 در رتبه نخست قرار گرفت و داده‌های CFSv2 و MERRA2 به ترتیب در رتبه دوم و سوم قرار گرفتند. شاخص CRM نشان داد که هر سه پایگاه داده دارای کم برآوردی هستند. بررسی شاخص‌های ارزیابی برای داده‌های سرعت باد

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای متغیرهای هواشناسی ERA5، CFSv2 و MERRA2

	بیشینه دما			کمینه دما			سرعت باد ۲ متری			
	ERA5	CFSv2	MERRA2	ERA5	CFSv2	MERRA2	ERA5	CFSv2	MERRA2	
R <sup>2</sup>	۰/۹۶ (۱)	۰/۹۵ (۲)	۰/۹۴ (۳)	۰/۹۴ (۱)	۰/۹۴ (۱)	۰/۹۴ (۳)	۰/۲۲ (۲)	۰/۱۹ (۳)	۰/۲۶ (۱)	
RMSE	۲/۸۹ (۱)	۲/۸۹ (۱)	۳/۱۸ (۲)	۲/۴۸ (۱)	۳/۳۷ (۲)	۴/۵۷ (۳)	۰/۷۵ (۱)	۰/۷۷ (۲)	۲/۵۶ (۳)	
nRMSE	۰/۱۵ (۱)	۰/۱۵ (۱)	۰/۱۶ (۲)	۰/۳۹ (۱)	۰/۵۴ (۲)	۰/۷۳ (۳)	۰/۴۸ (۱)	۰/۵۰ (۲)	۱/۶۶ (۳)	
EF	۰/۹۲ (۱)	۰/۹۲ (۱)	۰/۹۱ (۲)	۰/۹۰ (۱)	۰/۸۳ (۲)	۰/۶۹ (۳)	-۲/۲۷ (۱)	-۵/۴۸ (۲)	-۷/۸۵ (۳)	
CRM	-۰/۱۰ (۲)	-۰/۰۸ (۱)	-۰/۰۸ (۱)	-۰/۱۹ (۱)	-۰/۴۳ (۲)	-۰/۶۱ (۳)	-۰/۲۹ (۲)	-۰/۱۸ (۱)	۱/۴۸ (۳)	
رتبه	۶	۶	۱۰	۵	۹	۱۴	۷	۱۰	۱۳	

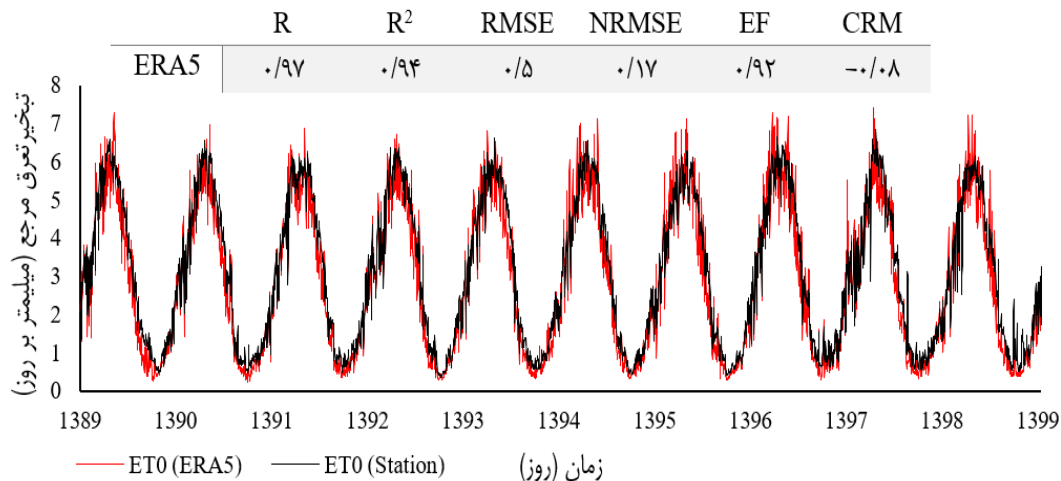
### مقایسه تبخیر تعرق مرجع

برای حوضه دریاچه ارومیه و همچنین مقادیر شاخص‌های آماری نشان داده شده است. بر اساس شکل روند مشابهی بین تبخیر تعرق مرجع محاسبه شده از ERA5 و ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود. مقدار R برابر ۰/۹۷ به دست آمد که بیانگر همبستگی بالای این دو متغیر است. مقدار RMSE نیز برابر ۰/۵ میلی‌متر در روز محاسبه گردید. مقدار EF برابر ۰/۹۲ به دست آمد که بیانگر کارایی بالای داده‌های استخراج شده از ERA5 بوده و در نهایت مقدار CRM برابر ۰/۰۸- محاسبه شد که کم برآوردی تبخیر تعرق مرجع را نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر شاخص‌های آماری می‌توان نتیجه گرفت که تبخیر تعرق مرجع به دست آمده از

با توجه به نتایج مرحله قبل داده‌های هواشناسی ERA5 دارای بیشترین همخوانی با داده‌های زمینی بود؛ بنابراین متغیرهای هواشناسی و تابشی مورد نیاز برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع با استفاده از رابطه فائو پمنن مانیت از ERA5 دانلود گردید. این اطلاعات با فرمت NETCDF به صورت ساعتی برای سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ تهیه گردید. سپس این اطلاعات برای هر ایستگاه هواشناسی به صورت روزانه استخراج شد و تبخیر تعرق مرجع محاسبه گردید. در شکل (۵) سری زمانی میانگین تبخیر تعرق مرجع روزانه ۲۴ ایستگاه هواشناسی موردبررسی و ERA5

می‌کنند در حالی که ERA5 میانگین اطلاعات هواشناسی را در مساحتی به اندازه 900 کیلومتر مربع بیان می‌کند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های ERA5 می‌توانند با اطمینان بالایی مورد استفاده قرار گیرند.

ERA5 دارای دقت مناسبی است و کم برآوردی آن و یا مقدار nRMSE برابر ۰/۱۷ می‌تواند به دلیل سایز پیکسل‌های داده‌های ERA5 باشد؛ زیرا اکثر ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده شهری قرار دارند و اطلاعات هواشناسی یک نقطه را اندازه‌گیری



شکل ۵- میانگین تبخیر تعرق مرجع روزانه ۲۴ ایستگاه هواشناسی مورد بررسی و ERA5

در رتبه‌های بعد به ترتیب سرعت باد و کمینه دما قرار گرفتند. تغییر  $\pm 10\%$  درصد سرعت باد مقدار تبخیر تعرق مرجع را به اندازه  $\pm 2\%$  درصد و تغییر  $\pm 10\%$  درصد کمینه دما مقدار تبخیر تعرق مرجع را به اندازه  $\pm 1\%$  درصد تغییر می‌دهد. متغیرهای کمینه و بیشینه رطوبت تأثیر معکوس و اندکی بر تغییرات تبخیر تعرق مرجع داشتند.

بررسی مجموعه داده‌های ERA5، CFSv2 و MERRA2 نشان داده که ERA5 دقیق‌ترین داده‌های هواشناسی مورد بررسی را ارائه می‌دهد و در رتبه‌های بعد به ترتیب CFSv2 و MERRA2 قرار گرفتند. مقدار شاخص آماری EF مجموعه داده‌های ERA5 در متغیرهای بیشینه دما، کمینه دما و سرعت باد به ترتیب برابر ۰/۹۲، ۰/۹ و ۰/۹۲- بود و بر اساس شاخص CRM در هر سه مورد دارای کم برآوردی بود. در نهایت با مجموعه داده‌های ERA5 تبخیر تعرق مرجع روزانه در بازه ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ برای ۲۴ ایستگاه مورد بررسی محاسبه گردید و میانگین آن‌ها با مقادیر به دست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی مقایسه گردید. بر اساس نتایج، میانگین ۱۰ ساله تبخیر تعرق

## نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی حساسیت تبخیر تعرق مرجع نسبت به متغیرهای هواشناسی، یافتن تأثیر گذارترین متغیرهای هواشناسی بر افزایش یا کاهش تبخیر تعرق مرجع و در نهایت، بررسی و معرفی پایگاه داده‌ای که این متغیرها را با بالاترین دقت در حوضه دریاچه ارومیه ارائه دهد، انجام گردید.

در بررسی تغییرات تبخیر تعرق مرجع، نتایج نشان داد که میانگین ده ساله تبخیر تعرق مرجع حاصل از ۲۴ ایستگاه هواشناسی داخل حوضه دریاچه ارومیه برابر ۳/۱ میلی‌متر در روز بوده است. کمترین مقدار روزانه تبخیر تعرق مرجع در سال ۱۳۹۲ با مقدار ۰/۳۲ میلی‌متر در روز ثبت شده است و بیشترین مقدار آن ۷/۴۴ میلی‌متر در روز در سال ۱۳۹۳ رخ داده است.

تحلیل حساسیت نشان داد که بیشینه دما تأثیر گذارترین متغیر هواشناسی بر تغییر تبخیر تعرق مرجع است به طوری که با تغییر  $\pm 10\%$  درصد آن مقدار تبخیر تعرق مرجع به اندازه  $\pm 4\%$  درصد تغییر می‌کند و رابطه‌ی خطی و مستقیمی بین آن‌ها وجود دارد.

پیش‌بینی گروهی بارش مدل CFSv2 با رویکرد مدیریت منابع آب (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد دز). تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۴): ۹۲-۱۰۶.

میری، م.، عزیزی، ق.، محمدی، ح. و پورهاشمی، م. ۱۳۹۶. معرفی و ارزیابی مدل جهانی همسان‌سازی داده‌های زمینی با داده‌های مشاهده‌ای در ایران. اطلاعات جغرافیایی. ۲۶(۱۰۴): ۵-۱۷.

Allen, R.G., Tasumi, M. and Trezza, R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133(4): 380–394.

Alsamamra, H., Ruiz-Arias, J.A., Pozo-Vázquez, D. and Tovar-Pescador, J. 2009. A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149(8): 1343–1357.

Barideh, R. and Nasimi, F. 2022. Investigating the changes in agricultural land use and actual evapotranspiration of the Urmia Lake basin based on FAO's WaPOR database. *Agricultural Water Management*. 264.

Barideh, R., Veysi, S., Ebrahimipak, N. and Davatgar, N. 2022. The challenge of reference evapotranspiration between the WaPOR data set and geostatistical methods. *Irrigation and Drainage*. 71(5): 1268-1279.

Blatchford, M.L., Mannaerts, C.M., Njuki, S.M., Nouri, H., Zeng, Y., Pelgrum, H., Wonink, S. and Karimi, P. 2020. Evaluation of WaPOR V2 evapotranspiration products across Africa. *Hydrological Processes*. 34: 3200–3221.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2008. *Aquastat database from water report*. URL [www.fao.org](http://www.fao.org).

Golian, S., Javadian, M. and Behrangi, A. 2019. On the use of satellite, gauge, and reanalysis precipitation products for drought studies. *Environmental Research Letters*. 14(7).

Gómez, J.L., Pastoriza, F.T., Álvarez, E.G. and Oller, P.E. 2020. Comparison between Geostatistical Interpolation and Numerical Weather Model Predictions for Meteorological Conditions Mapping. *Infrastructures*. 5(15):1-22.

مرجع ERA5 برابر ۲/۸۶ میلی‌متر در روز به دست آمد. این مقدار بر اساس شاخص CRM دارای ۸ درصد کم برآوردی نسبت به مقدار به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های هواشناسی بود. در نهایت مقادیر شاخص‌های EF برابر ۰/۹۲ و nRMSE برابر ۰/۱۷، تبخیر تعرق مرجع ERA5 را در رتبه مناسب و قابل‌اعتماد قرار دادند.

## منابع

تیموری، م.، خورانی، ا. و بختیاری کیا، م. ۱۳۹۸. مقایسه داده‌های بارش ماهواره‌ای و ایستگاه‌های هواشناسی در شبیه‌سازی رواناب ماهانه رودخانه کلم با استفاده از مدل SWAT. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۱۱(۳): ۵۷۴-۵۶۲.

خلی‌لمی، ع.، بذرافشان، ج. و چراغعلی‌زاده، م. ۱۴۰۱. بررسی تطبیقی نقشه‌های اقلیمی ایران در طبقه‌بندی دمارتن گسترش داده شده و کاربردش برای پهنه‌بندی اقلیم جهان. *هواشناسی کشاورزی*. ۱۰(۱): ۱۶-۳.

دین‌پژوه، ی.، جهانبخش، س. و فروغی، م. ۱۳۹۷. تحلیل حساسیت تبخیر-تعرق به تغییر پارامترهای هواشناسی در شمال غرب و غرب ایران. *نشریه حفاظت منابع آب و خاک*. ۱۴(۲): ۱-۱۴.

زنگنه، م.، قهرمان، ب. و فریدحسینی، ع. ۱۳۹۷. مقایسه مقادیر مشاهداتی بارش و اطلاعات بارش ماهواره‌ای PERSIANN و CMORPH-روش‌های درونیابی در مقیاس ساعتی و روزانه (مطالعه موردی: حوضه آبریز شاپور). *تحقیقات منابع آب ایران*. ۱۴(۴): ۱۳-۱.

محمدی قلعه‌نی، م. و شرفی، س. ۱۴۰۱. ارزیابی دقت پایگاه داده‌های ERA5 و CRU TS4.05 برای متغیرهای بارش، دما و تبخیر تعرق پتانسیل در اقلیم‌های مختلف ایران. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۶(۵): ۸۷۹-۸۹۰.

مروج‌الاحکامی، ب.، ابراهیمی‌پاک، ن.، تافته، آ. و حسینی، ن. ۱۴۰۱. تحلیل حساسیت تبخیر-تعرق مرجع به پارامترهای هواشناسی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های سینوپتیک استان یزد). *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۲(۵۳): ۲۸۷-۳۰۳.

موسوی، س.، آخوندعلی، ع. و شهبازی، ع. ۱۳۹۸. تحلیل

- Gong, L., Xu, C.-Y. and Chen, D. 2005. Spatial interpolation and analyses of reference evapotranspiration and its temporal trends in Changjiang (Yangtze River) Catchment. China. Geophysical Research Abstracts. 7.
- Lorenz, D.J., Otkin, J.A., Svoboda, M., Hain, C.R., Anderson, M.C. and Zhong, Y. 2017. Predicting U.S. drought monitor states using precipitation, soil moisture, and evapotranspiration anomalies. Part I: development of a nondiscrete USDM index. *Journal of Hydrometeorology*. 18(7): 1943–1962.
- Mardikis, M.G., Kalivas, D.P. and Kollias, V.J. 2005. Comparison of interpolation methods for the prediction of reference evapotranspiration - an application in Greece. *Water Resources Management*. 19(19): 251–278.
- Michael, O. and Mbajorgu, C. 2020. Spatial distribution of rainfall and reference evapotranspiration in Southeast Nigeria. *Agricultural Engineering International. CIGR J*. 22(1): 1–8.
- Park, J. and Choi, M., 2015. Estimation of evapotranspiration from ground-based meteorological data and global land data assimilation system (GLDAS). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 29: 1963-1992.
- Pelosi, A., Terribile, F., D'Urso, G. and Chirico, G.B. 2020. Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX Reanalysis Data with Spatially Interpolated Weather Observations for the Regional Assessment of Reference Evapotranspiration. *Water*. 12(6):1669.
- Rata, M., Douaoui, A., Larid, M. and Douaik, A. 2020. Comparison of geostatistical interpolation methods to map annual rainfall in the Chélif watershed, Algeria. *Theoretical and Applied Climatology*. 141(141): 1009–1024.
- Vanderlinden, K., Giráldez, J.V. and Meirvenne, M.Van. 2008. Spatial estimation of reference evapotranspiration in Andalusia, Spain. *Journal of Hydrometeorol*. 9: 242–255.
- Wilcox, J.D. 2019. Total solar eclipse effects on evapotranspiration captured by groundwater fluctuations in a Southern Appalachian fen. *Hydrological Processes*. 33: 1538–1541.
- Xiao, Y., Gu, X., Yin, S., Shao, J., Cui, Y., Zhang, Q. and Niu, Y. 2016. Geostatistical interpolation model selection based on ArcGIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, northwest China. *SpringerPlus*. 5(5): 1–15.
- Zhang, X., Kang, S., Zhang, L. and Liu, J. 2010. Spatial variation of climatology monthly crop reference evapotranspiration and sensitivity coefficients in Shiyang River Basin of Northwest China. *Agricultural Water Management*. 97: 1506–1516

## Sensitivity Analysis of Reference Evapotranspiration and Evaluation of ERA5, CFSv2 and MERRA2 meteorological Datasets

R. Barideh<sup>1\*</sup> and F. Nasimi<sup>2</sup>

### Abstract

The purpose of this research was to investigate the sensitivity of reference evapotranspiration to meteorological variables and to introduce the most accurate database in providing these variables in the Urmia Lake basin. For this purpose, 24 synoptic stations were selected and their meteorological data was prepared on a daily basis between 2010 and 2019. Then, the reference evapotranspiration was calculated using the FAO-Penman-Monteith equation, and the effect of changes in meteorological variables on ET<sub>0</sub> was investigated individually in the range of  $\pm 20\%$ . In the next step, the accuracy of ERA5, CFSv2 and MERRA2 meteorological data was evaluated and the most accurate one was introduced. The ten-year average of reference evapotranspiration of the meteorological stations was obtained  $3.1 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ , and the results showed that the maximum temperature is the most influential meteorological variable on reference evapotranspiration changes. After that, wind speed and minimum temperature had the greatest effect, respectively. The value of sensitivity coefficient for maximum temperature, wind speed and minimum temperature was obtained 0.4, 0.2 and 0.1 respectively. In the review of meteorological data of ERA5, CFSv2 and MERRA2, statistical indicators showed that the ERA5 dataset has the most accuracy. Based on the results, the 10-year average of reference evapotranspiration of the ERA5 was obtained  $2.86 \text{ mm d}^{-1}$  and according to the CRM index, this value was 8% underestimated compared to the value obtained from meteorological stations. Finally, the values of EF indices equal to 0.92 and nRMSE equal to 0.17 put the reference evapotranspiration of the ERA5 in a suitable and reliable rank.

**Key words:** Global meteorological dataset, FAO Penman Monteith, Reference evapotranspiration, Sensitivity analysis

<sup>1</sup> Ph. D in Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran (\* Corresponding Author Email: rahman.barideh@gmail.com)

<sup>2</sup> Ph. D Candidate of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 3 Jan 2023

Accepted: 16 Apr 2023