

## ارزیابی عملکرد برون‌داد مدل های اقلیمی CMIP6 در برآورد تبخیر - تعرق مرجع در ایران

فهیمة شاکری<sup>۱</sup>، غلامعباس فلاح قاله‌ری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> محقق پسادکتری آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

<sup>۲</sup> استاد اقلیم شناسی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

### چکیده

تبخیر - تعرق مرجع (ET<sub>o</sub>) یکی از مهم ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی است که تخمین صحیح آن در طراحی و مدیریت سیستم های آبیاری، مطالعات زیست محیطی و منابع آب از اهمیت بسزایی برخوردار است. جهت انجام پژوهش های اقلیمی استفاده از داده های شبکه ای و خروجی مدل های اقلیمی مستلزم ارزیابی و صحت سنجی است. از اینرو پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقت جدیدترین مدل های CMIP6 در برآورد تبخیر - تعرق مرجع در پهنه ایران تدوین شده است. بدین منظور داده های تاریخی مربوط به ۱۰ مدل CMIP6 از پایگاه داده USGS استخراج شد و میزان ET<sub>o</sub> در ۴۴ ایستگاه همدیدی ایران برای دوره پایه و دوره تاریخی مدل ها (۱۹۸۵-۲۰۱۴) با استفاده از روش هارگریوز سامانی برآورد شد. جهت صحت سنجی میزان دقت مدل ها و مقادیر مشاهداتی متناظر با آن از سنجه های آماری MSE، RMSE، MAE، MBE و نمودار Taylor بهره گرفته شد. نتایج حاصل از ارزیابی دقت مدل ها در مقیاس های ماهانه، فصلی و سالانه نشان داد که مدل های BCC-CSM2-MR و MRI-ESM2-0 در مقایسه با دیگر مدل ها در پهنه ایران از دقت بالاتری جهت برآورد تبخیر - تعرق برخوردار هستند و مدل MIROC6 با مقدار RMSE(1/91) ضعیف ترین عملکرد را در بین مدل های مورد مطالعه نشان داده است. از نظر منطقه ای به طور کلی خطای مدل BCC-CSM2-MR در پهنه های شمالی و جنوبی کشور نسبت به مدل MRI-ESM2-0 بیشتر است. همچنین مدل MRI-ESM2-0 برای مناطق مرتفع زاگرس خطای بیشتری را نسبت به مدل BCC-CSM2-MR نشان می دهد. میزان خطای این مدل ها در پهنه های اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران به خصوص مناطق شرقی کمتر از سایر نواحی می باشد.

**کلمات کلیدی:** ارزیابی، ایران، تبخیر - تعرق مرجع، مدل های CMIP6، نمودار تیلور، هارگریوز سامانی

تبخیر - تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی هر منطقه و همچنین یکی از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی درست و مناسب آبیاری برای بهبود راندمان آب مصرفی در هر منطقه می‌باشد (گرنجر، ۱۹۹۹). با توجه به میانگین جهانی، ۵۷ درصد بارندگی از طریق تبخیر - تعرق به جو باز می‌گردد و این مقدار ممکن است در مناطق خشک و بیابانی به ۹۰ تا ۱۰۰ درصد هم برسد (حیدرنازاد و همکاران، ۱۳۹۲؛ گوسین و همکاران، ۲۰۲۰). تبخیر - تعرق نقش قابل ملاحظه‌ای در اقلیم جهانی از طریق چرخه هیدرولوژی ایفا می‌کند و بعد از بارش اصلی‌ترین جزء چرخه هیدرولوژی است که از آن می‌توان برای کمی کردن مقدار هدررفت آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری و زهکشی، زمان بندی آبیاری، مطالعات زیست محیطی و ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم بهره گرفت (وو و همکاران، ۲۰۱۹) عوامل اصلی که بر تبخیر - تعرق مؤثرند، به پارامترهای اقلیمی مانند دما، بارش، رطوبت، تابش خورشیدی و غیره بستگی دارد. لذا هر تغییری در پارامترهای اقلیمی بر میزان تبخیر - تعرق و آب مورد نیاز گیاه تأثیر خواهد گذاشت (هوئرو، ۱۹۹۳). در بین عناصر اقلیمی مذکور، دما یکی از کلیدی‌ترین پارامترهای مؤثر در تغییرات اقلیمی است (اوجوانگ و همکاران، ۲۰۱۰) که تغییرات آن به طور چشمگیری بر تبخیر - تعرق و چرخه اکوهیدرولوژیکی تأثیرگذار است (هان و همکاران، ۲۰۱۶؛ لوینو، ۲۰۲۱). دما از متغیرهای قابل دیدبانی و از خروجی‌های مستقیم مدل‌های اقلیمی است اما تبخیر - تعرق اغلب نه قابل دیدبانی است و نه در مدل‌های اقلیمی به طور مستقیم تولید می‌شود. در نتیجه در مطالعات مربوط به تبخیر - تعرق و پیش‌نگری آن، یک روش برآورد تبخیر - تعرق بر اساس متغیرهای هواشناسی حاصل از پیش‌نگری مدل‌های اقلیمی مورد نیاز است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹). روش‌های ترکیبی برآورد تبخیر - تعرق مانند روش فائو

-پنمن - مونتیت به پارامترهای هواشناسی زیادی نیاز دارند که بسیاری از مدل‌ها آن داده‌ها را در اختیار ما قرار نمی‌دهند و در همه ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری نمی‌شود. بنابراین استفاده از روش‌هایی که نیاز به اطلاعات هواشناسی کمتری دارند، یک ضرورت به نظر می‌رسد. برای این منظور پژوهش‌های زیادی وجود دارد که در آن‌ها سعی شده است در مقایسه با نتایج روش فائو - پنمن - مونتیت یک روش ساده با دقت قابل قبول معرفی نمایند (رئوف و عزیز میبصر، ۱۳۹۶). در این میان روش هارگریوز سامانی روش ساده‌ای است که به وسیله فائو در شرایطی که امکان استفاده از روش فائو - پنمن - مونتیت امکان پذیر نیست توصیه شده است (الن و همکاران، ۱۹۹۸؛ سالاریان و همکاران، ۱۳۹۳). فخار و کاویانی (۱۴۰۰) روش هارگریوز سامانی را در مناطق خشک و نیمه خشک، بهترین روش در برآورد تبخیر تعرق دانسته‌اند.

مدل‌های گردش کلی (GCMs) مهم‌ترین مدل‌های جفت شده عددی در بررسی تغییرات اقلیمی هستند (فاولر و همکاران، ۲۰۰۷) که با ارائه متغیرهای اقلیمی در برآورد تبخیر - تعرق به عنوان معتبرترین ابزار جهت پیش‌نگری - های اقلیمی شناخته می‌شوند (لی و همکاران، ۲۰۱۲). به این ترتیب می‌توان با استفاده از آن‌ها، متغیرهای اقلیمی مورد نیاز را پیش‌نگری کرد و بر اساس تغییرات آن‌ها میزان تبخیر - تعرق مرجع در دوره‌های آینده را برآورد کرد. با جدی شدن بحث تغییر اقلیم در دنیا و انتشار مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه‌ای مدل جفت شده (CMIP6)، مطالعه پارامترها و عناصر آب‌وهوایی به صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (مجدی و همکاران، ۲۰۲۲). پروژه CMIP6 از سناریوهای جدیدی به نام مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSP) استفاده می‌کند که با سناریوهای واداشت تابشی (RCP) گزارش پنجم IPCC ترکیب شده است.

سناریوهای جدید اضافه شده در CMIP6 شامل SSP1-1.9، SSP4-3.4، SSP3-7.0 هستند که چهار سناریوی روز شده سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP 8.5 موجود در CMIP5 می باشند (گوپتا و همکاران، ۲۰۲۰؛ شجاع و شمسی پور، ۱۴۰۲).

شبه سازی های تاریخی ابزار مهمی برای ارزیابی دقت مدل ها و حساسیت مدل های اقلیمی نسبت به داده های مشاهداتی می باشند (ایرینگ و همکاران، ۲۰۱۶). در حال حاضر، مطالعات متعددی برای ارزیابی دقت مدل های GCM، همچنین شبه سازی اقلیم گذشته و پیش بینی اقلیم آینده بر اساس مدل های مذکور در سطح ایران و جهان انجام شده است. بوئه و تری (۲۰۰۸) از مدل های متعدد CMIP3 برای تخمین تغییرات ET در اروپا استفاده کردند؛ و به این نتیجه رسیدند که شمال اروپا روند افزایشی را نشان می دهد، در حالی که اروپای جنوبی روند کاهشی را نشان می دهد. سئو و همکاران (۲۰۰۹) از مجموعه داده های مشاهده ای مختلف برای تخمین تبخیر- تعرق جهانی (شامل محیط های زمینی و اقیانوسی) استفاده کردند و آن را با نتایج مجموعه مدل های فاز سوم (CMIP3) مقایسه کردند نتایج تحقیق نشان داد که مدل های فاز سوم، تبخیر- تعرق را در مناطق مختلف بیش از حد برآورد کردند. گوو و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر اکویدرولوژی حوضه رودخانه گیسویی در چین پرداختند. نتایج نشان داد که میزان دما و تبخیر - تعرق در دوره های آینده افزایش می یابد. کوک و همکاران (۲۰۱۴) خشکسالی های جهانی را بر اساس مدل های فاز پنجم CMIP5 پیش بینی کردند. نتایج نشان داد که پتانسیل تبخیر- تعرق به طور قابل توجهی افزایش یافته و ممکن است شرایط خشکسالی منطقه ای را تشدید کند. ماریوتی و همکاران (۲۰۱۵) تغییرات اقلیمی بلند مدت منطقه مدیترانه را در طول سال های ۱۸۶۰ تا ۲۱۰۰ بر اساس داده های CMIP5 مورد

بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نرخ گرمایش و خشک شدن اجباری در دریای مدیترانه در آینده بیشتر از قرن گذشته رخ خواهد داد. سوئد و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل های GCM به پیش نگرایی تغییرات تبخیر- تعرق در کاربرهای اراضی مختلف در منطقه ویلکوپولسکا در لهستان پرداختند و به این نتایج دست یافتند که مدل MPI-M-REMO از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل ها برخوردار است؛ همچنین میانگین منطقه ای افزایش مجموع سالانه تبخیر - تعرق برابر با ۴۵ میلی متر است. تام و همکاران (۲۰۱۹) خشکسالی های کانادا را بر اساس مدل های فاز پنجم CMIP5 پیش بینی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که پتانسیل تبخیر- تعرق به طور قابل توجهی افزایش یافته است؛ این امر تشدید شرایط خشکسالی منطقه را به دنبال خواهد داشت. ریشر و تاکیانگا (۲۰۲۰) به ارزیابی عملکرد مدل های CMIP6 در مناطق حاره ای اطلس پرداختند. نتایج نشان داد این مدل ها ابزار مناسبی برای پیش نگرایی های اقلیمی هستند. وانگ و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی به ارزیابی عملکرد مدل های CMIP6 در برآورد تبخیر - تعرق سطح زمین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عملکرد مجموعه همادی CMIP6 بهتر از یک مدل واحد می باشد و در مجموع مدل های EC-Earth3 و CESM2 عملکرد رضایت بخشی داشتند. کوی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که مدل های CMIP6 می توانند به طور مؤثر روند افزایش گرمایش در فلات تبت را در تمام فصول به تصویر بکشند، اما بزرگی آن ها را دست کم می گیرند. نتایج تحقیقات وانگ و همکاران (۲۰۲۱) در کشور چین نشان داد که مدل های CMIP6 در باز تولید توزیع فضایی دما بهتر از بارش عمل می کنند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی به ارزیابی دقت مدل های CMIP6 در شبیه سازی دما و بارش چین طی دوره آماری ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شبیه سازی دما خطای کمتری نسبت به بارش داشته است. هون سونگ و

همکاران در سال (۲۰۲۲) به بررسی عدم قطعیت در پیش‌نگری تبخیر - تعرق پتانسیل با استفاده از سه روش تورنت وایت، هارگریوز سامانی و پنمن مونتیث و داده‌های CMIP6 در کره جنوبی پرداختند. نتایج به طور کلی، برای دوره‌های آینده افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل را نشان داد؛ همچنین در بین سه روش مورد بررسی، روش پنمن مونتیث بیشترین افزایش را در دوره‌های آینده نشان داد. علاوه بر این، تعداد زیادی از مطالعات (ژو و همکاران، ۲۰۲۰؛ لین و چن، ۲۰۲۰؛ سریواستاوا و همکاران، ۲۰۲۰؛ گوپتا و همکاران، ۲۰۲۰، چن و همکاران، ۲۰۲۱) توانایی مدل‌های CMIP6 را در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی ارزیابی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که مدل‌های فاز ششم (CMIP6) بهتر از فاز پنجم (CMIP5) عمل می‌کنند. گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از روش‌های پرستلی تیلور و هارگریوز سامانی به برآورد میزان تبخیر-تعرق در ارتباط با تغییرات اقلیمی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در ایران پرداختند. نتایج نشان داد میزان تبخیر - تعرق پتانسیل تحت تأثیر افزایش دما در دوره‌های آینده افزایش خواهد یافت.

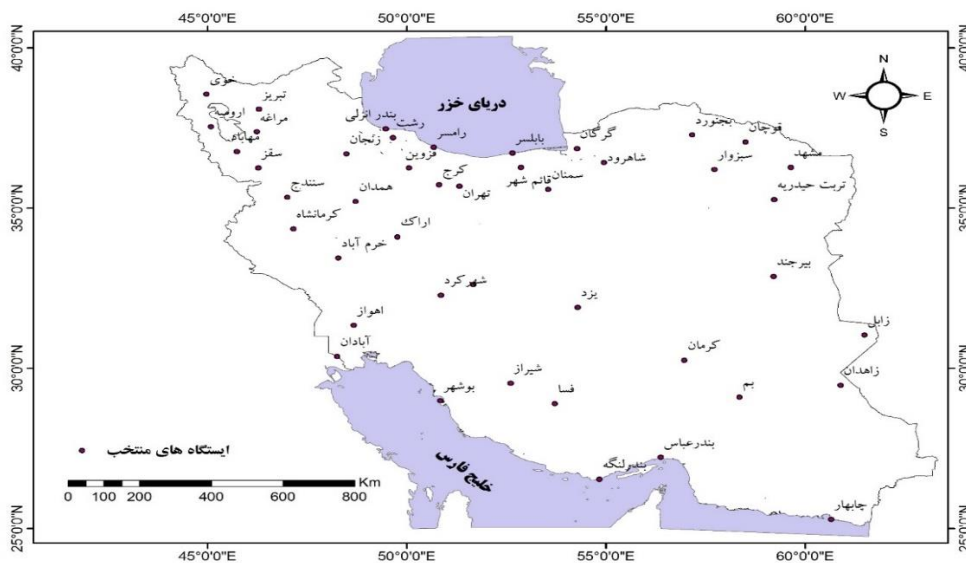
ایران کشوری است که به لحاظ اقلیمی جزو کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب شده، به طوری که متوسط بارندگی سالانه آن حدود یک سوم متوسط بارندگی خشکی‌ها و کمتر از یک سوم متوسط بارندگی کره زمین است و از سوی دیگر میزان تبخیر آن حدود سه برابر تبخیر خشکی‌های زمین می‌باشد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین با توجه به اهمیت تبخیر - تعرق لازم است این پارامتر بر اساس روش‌ها و مدل‌های مختلف برآورد شود. عدم قطعیت مدل‌های CMIP6 منجر به توانایی‌های مختلف شبیه‌سازی یک

مدل برای انواع متغیرها در مناطق مختلف می‌شود. تاکنون کمتر مطالعه‌ای عملکرد این مدل‌ها را بر تبخیر - تعرق مرجع پهنه ایران بررسی کرده است. بنابراین، ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در ایران برای درک صحیح و پرداختن به مشکلات مربوط به تغییرات آب و هوایی، مانند دسترسی به آب، کشاورزی پایدار، ایمنی زیست‌محیطی، پیشگیری و کاهش بلایا، حیاتی است. همچنین تعیین مدل‌های مناسب بر اساس میزان دقت آن‌ها در شبیه‌سازی وضعیت اقلیم دوره تاریخی و ارائه روشی به منظور افزایش دقت نتایج این مدل‌ها در تصویرسازی دوره آتی، می‌تواند در کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های اقلیمی مؤثر باشد. لذا با توجه به اهمیت موضوع، هدف از این پژوهش ارزیابی عملکرد برونداد مدل‌های اقلیمی CMIP6 در برآورد تبخیر - تعرق مرجع در ایران می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 بر تبخیر - تعرق مرجع در سطح کشور از آمار همیدی پارامترهای اقلیمی بیشینه دما، کمینه دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به صورت روزانه برای دوره آماری (۲۰۱۴-۱۹۸۵)، در ۴۴ ایستگاه هواشناسی ایران استفاده شد. آمار مربوطه از سازمان هواشناسی کشور تهیه و جمع‌آوری شد. موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل (۱). موقعیت جغرافیایی ایستگاه های هواشناسی مورد مطالعه

$$E_{to} = 0.0023 R_a (T_{mean} + 17.8)(TD^{0.5}) \quad (1)$$

در این روش TD: تفاوت بیشینه و کمینه دما بر حسب درجه سلسیوس،  $T_{mean}$ : میانگین دما،  $R_a$ : تابش برون جوی (تابش رسیده به سطح افقی در لبه جو بر حسب میلی متر بر روز) و  $E_{to}$ : تبخیر- تعرق گیاه مرجع بر حسب میلی متر بر روز است. نحوه محاسبه تابش برون جوی ( $R_a$ ) در رابطه های ۲ تا ۵ ارائه شده است.  $d_f$ : ضریب تصحیح فاصله زمین تا خورشید،  $\omega_s$ : زاویه ساعتی،  $\delta$ : زاویه میل خورشید می باشد. جزئیات بیشتر در پژوهش (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) ارائه شده است.

$$R_a = 37.6 d_f (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (2)$$

$$d_f = 1 + 0.033 \cos \left( \frac{2\pi}{365} \right) \quad (3)$$

$$\omega_s = \text{Arccos} (-\tan \phi \tan \delta) \quad (4)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) \quad (5)$$

روش FAO Penman-Monteith (FAO-PM) این مدل ترکیبی توسط آلن و همکاران (۱۹۹۸) به شکل زیر ارائه گردید:

الف) روش های برآورد تبخیر- تعرق

در تحقیق حاضر به منظور برآورد تبخیر- تعرق مرجع در ایستگاه های مورد مطالعه، از روش هارگریوز- سامانی (رابطه ۱) استفاده شد که علت انتخاب این روش همخوانی آن با اقلیم ایران و همبستگی بالای بین روش هارگریوز- سامانی و روش فائو- پنمن- مونتیث بوده است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۳؛ دین پاشو، ۲۰۰۶، فخار و کاویانی، ۱۴۰۰؛ مولستی و همکاران، ۲۰۱۳). جهت ارزیابی دقت روش مورد استفاده در برآورد تبخیر- تعرق مرجع، روش فائو پنمن مانتیث (رابطه ۲) به عنوان مرجع در نظر گرفته شد و میزان همبستگی روش مورد استفاده با روش مرجع محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد که در ادامه به تشریح بیشتر آن ها پرداخته خواهد شد.

روش هارگریوز- سامانی (H-S)

روش هارگریوز- سامانی یکی از روش های عمده در برآورد تبخیر- تعرق مرجع بر اساس مقادیر اندازه گیری شده توسط لایسیمتر وزنی است که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود (هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۵؛ هارگریوز و همکاران، ۲۰۰۳؛ مولستی و همکاران، ۲۰۱۳).

مقایسه با فازهای گذشته در بازتولید الگوهای بزرگ مقیاس متغیرهای آب و هوایی قوی تر دانسته اند. بدین منظور در تحقیق پیش رو؛ داده های ۱۰ مدل مربوط به گزارش ششم IPCC برای دوره تاریخی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) که تا زمان نگارش این مقاله داده هایشان بر روی سایت در دسترس قرار داده شده است، از پایگاه برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>) به صورت ماهانه استخراج شد. مشخصات مدل های مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

اطلاعات مربوط به مدل های CMIP6 شامل دو بخش اصلی اطلاعات تاریخی و اطلاعات مربوط به دوره آینده می باشند. اطلاعات تاریخی ارائه شده بر اساس این مدل ها را می توان به عنوان مبنایی جهت ارزیابی دقت آن ها مورد استفاده قرار داد. بر این اساس ابتدا با استفاده از داده های مشاهداتی و اطلاعات مربوط به خروجی مدل های مذکور مقدار تبخیر - تعرق در دوره تاریخی و مشاهداتی با استفاده از روش هارگریوز سامانی محاسبه شد. سپس مقادیر تبخیر - تعرق در دوره تاریخی تمامی مدل ها با داده های مبنا در دوره مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت تا بر اساس آن میزان دقت هر کدام از مدل ها مشخص شده و در نهایت بتوان از یک مدل واحد یا ترکیبی از این مدل ها جهت پیش بینی تبخیر - تعرق مرجع در دوره آینده در مطالعات آتی استفاده نمود. مبنای برآورد دقت این مدل ها نیز مقایسه خروجی آن ها در دوره تاریخی با داده های ایستگاهی منظور شد.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (6)$$

$ET_0$ : تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن ( $mm/d$ ) که به عنوان تبخیر- تعرق از گیاه مرجع با ارتفاع فرضی ۱۲/۰ متر و یک مقاومت سطحی ثابت  $70 s/m$  و آلییدو  $0.23$  تعریف شده است؛  $R_n$ : تابش خالص در سطح محصول  $(Mj/m^2.d)$ ؛  $G$ : شار حرارتی خاک  $(Mj/m^2.d)$ ؛  $\bar{T}$ : متوسط درجه حرارت هوا؛  $e_s(c)$ : فشار بخار اشباع  $(kpa)$ ؛  $e_a$ : فشار بخار واقعی  $(kpa)$ ؛  $(e_s - e_a)$ : کمبود فشار بخار اشباع  $(kpa)$ ؛  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار در مقابل درجه حرارت  $(kpa/c)$ ؛  $\gamma$ : ثابت سایکرومتریک  $(kpa/c)$ ؛  $U_2$ : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر حسب  $(m/s)$  است. در ادامه مقادیر روزانه تبخیر- تعرق مرجع برای ایستگاه های مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شدند و مبنای انجام بررسی های بعدی قرار گرفتند.

ب) مدل اقلیمی مطالعات قبلی از جمله وانگ و همکاران، (۲۰۲۰) و ژای و همکاران (۲۰۲۰) مدل های (CMIP6) را در

جدول(۱). مشخصات مدل های CMIP6 مورد استفاده در تحقیق

Variant label	دقت مکانی مدل	کشور/ توسعه دهنده	نام مدل	ردیف
r11ilp1f1	$1.875^\circ \times 1.241^\circ$	CSIRO/Australian	ACCESS-ESM1-5	۱
r11ilp1f1	$1.125^\circ \times 1.125^\circ$	BCC/China	BCC-CSM2-MR	۲
r11ilp1f1	$2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$	CCMA/Canada	CanESM5	۳
r11ilp1f1	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$	CMCC/Europe	CMCC-ESM2	۴
r11ilp1f2	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$	CNRM/France	CNRM-CM6-1	۵

r1i1p1f2	1.41°×1.41°	CNRM-CERFACS/ France	CNRM-ESM2-1	۶
r1i1p1f1	2.5°×1.26°	IPSL/ France	IPSL-CM6A-LR	۷
r1i1p1f1	1.41°×1.41°	MIROC/Japan	MIROC6	۸
r1i1p1f1	1.12°×1.12°	MRI/ Japan	MRI-ESM2-0	۹
r1i1p1f1	1.25°×1.00°	GFDL/NOAA	GFDL-ESM4	۱۰

کار می رود (بنیان و هوگنوم، ۲۰۰۸؛ لین و همکاران، ۲۰۰۶). مقدار این شاخص از رابطه (۸) محاسبه می-شود.

(۸)

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z^*(X_i) - Z(X_i))^2}$$

میانگین مربعات خطا (MSE)

میانگین مربعات خطا یکی از آماره‌هایی است که معمولاً از آن برای ارزیابی دقت پیش‌بینی یک مدل در برابر مشاهده‌ها استفاده می‌شود که می‌تواند از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت تغییر کند (کارآموز و همکاران، ۱۳۸۵).

(۹)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2$$

میانگین خطای اریب (MBE)

میانگین خطای اریب اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی است و بیانگر انحراف از میانگین می‌باشد. این مقدار (MBE) می‌تواند مثبت یا منفی باشد که نشان‌دهنده برآورد کمتر و بیشتر از میانگین داده‌ها می‌باشد. این معیار هر چقدر به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده اختلاف کمتر مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد. در شرایطی که MBE برابر صفر باشد مدل، درونیایی متغیر مورد نظر را به طور دقیق برآورد می‌کند. مقدار این شاخص از رابطه (۱۰) محاسبه

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها

برای سنجش میزان دقت مدل‌های مورد مطالعه و مقادیر مشاهداتی متناظر با آن از سنجه‌های آماری خطای مطلق میانگین (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، میانگین خطای اریب (MBE) و نمودار تیلور بهره گرفته شد. این معیارها بیشترین کاربرد را در تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای دارند. پس از انتخاب مدل‌های بهینه با استفاده از سنجه‌های مذکور؛ ارزیابی دقت مدل‌ها به صورت پهنه بندی در محیط GIS ارائه شد. در ادامه به توضیح مختصر راجع به آن‌ها پرداخته می‌شود.

خطای مطلق میانگین (MAE)

این معیار برای مقایسه خطای نسبی مقادیر شبیه سازی شده با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده به کار می‌رود. مقدار این شاخص از رابطه (۷) محاسبه می‌شود (هو و همکاران، ۲۰۰۱).

(۷)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(X_i) - Z(X_i)|$$

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

مجذور میانگین مربع خطا یکی از آماره‌هایی است که معمولاً از آن برای ارزیابی دقت پیش‌بینی یک مدل در برابر مشاهده‌ها استفاده می‌شود. هرچقدر این معیار به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر خطای کمتری در پیش‌بینی‌ها می‌باشد. این معیار به عنوان مرسوم ترین شاخص خطا به

می‌شود.

(۱۰)

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(X_i) - z(X_i))$$

در روابط فوق،  $Z^*(X_i)$ ؛ مقدار برآورد شده و  $Z(X_i)$  مقدار مشاهده‌ای متغیر و  $n$  تعداد نقاط مشاهداتی است. هرچه میزان این شاخص‌ها کمتر باشد مدل از دقت بیشتری برخوردار است (ویلموت و همکاران، ۲۰۰۵؛ توچایی، ۲۰۱۵).

نمودار تیلور

استفاده از نمودار تیلور یکی از روش‌هایی است که می‌توان به صوت بصری کارایی مدل‌های اقلیمی را سنجش کرده و با یکدیگر مقایسه نمود. نمودار تیلور (تیلور، ۲۰۰۱) بر مبنای ارتباط هندسی بین ضریب همبستگی ( $R$ )، انحراف معیار سری‌های زمانی و RMSD استوار است. نمودار تیلور ابزاری مناسب برای ارزیابی روش‌های متنوع است و اخیراً در مطالعات مربوط به هواشناسی استفاده می‌شود (واینر، ۲۰۱۳؛ لوکونتی و همکاران، ۲۰۱۴). در این نمودار مقادیر ضریب همبستگی به صورت شعاع دایره روی قوس آن، مقادیر انحراف استاندارد به صورت دوائر متحدالمرکز نسبت به مرکز دایره و مقادیر RMSD به صورت دوائر متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع ترسیم می‌شود. روش ارزیابی در این نمودار به این صورت است که موقعیت

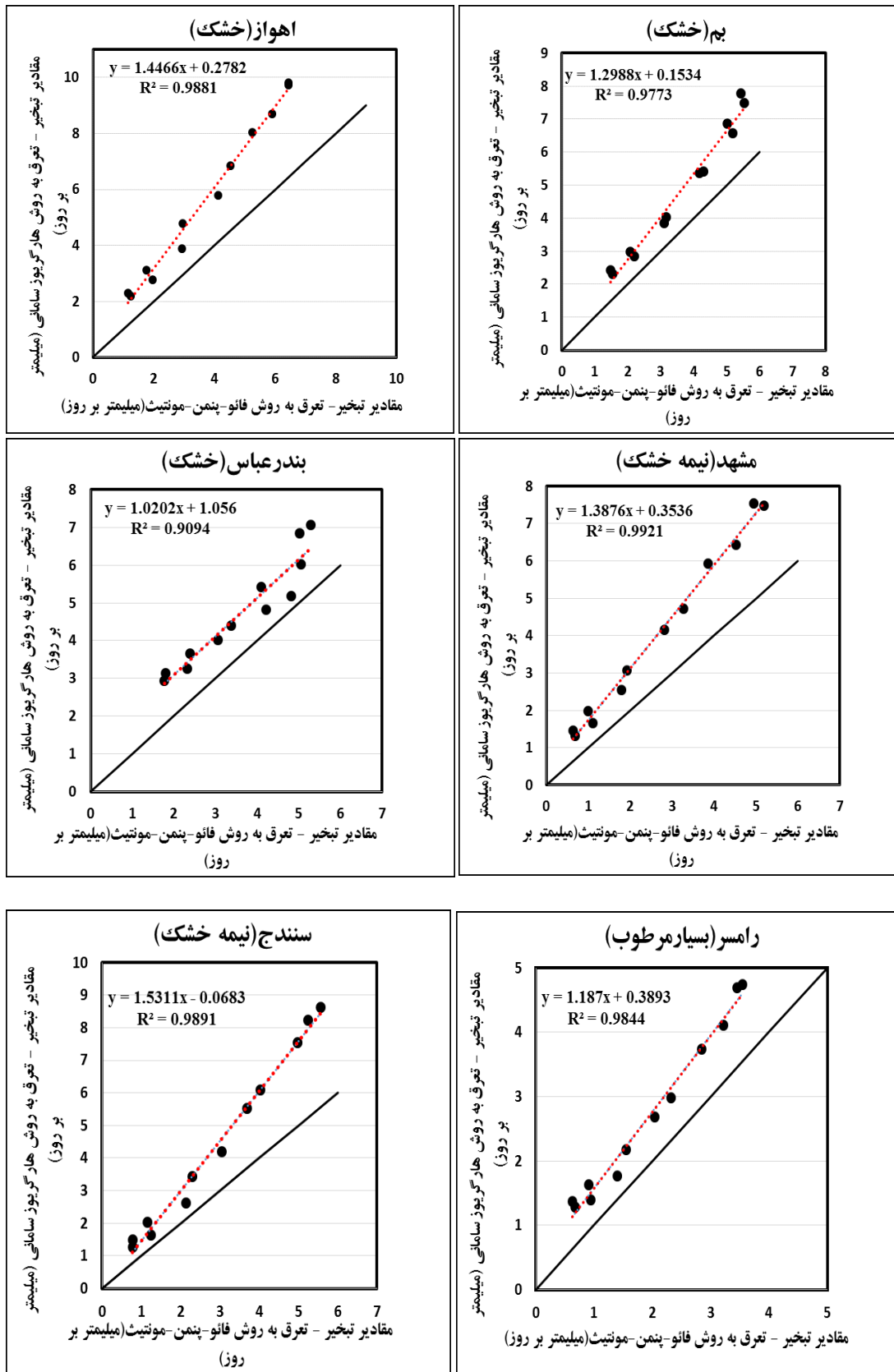
داده‌های مورد بررسی بر اساس RMSD، ضریب همبستگی آن با ایستگاه زمینی و انحراف معیار سری زمانی روی نمودار ترسیم می‌شود و هر داده‌ای که موقعیت مکانی آن روی نمودار به نقطه مرجع نزدیک تر باشد با دقت بیشتری متغیر مورد نظر را برآورد می‌کند و مناسب تر خواهد بود (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۵). لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر نمودار تیلور از طریق کد نویسی در محیط نرم افزار R ترسیم شده است.

### بحث و نتایج

ارزیابی مدل‌های تبخیر-تعرق

در تحقیق حاضر به منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاه‌های مورد مطالعه، روش فائو-پنمن-مونیت (FP-M) به عنوان مرجع در نظر گرفته شد و تبخیر-تعرق محاسبه شده به روش هارگریوز-سامانی (H-S) که پارامتر اقلیمی کمتری نیاز دارد؛ با نتایج حاصل از محاسبه تبخیر-تعرق به روش فائو-پنمن-مونیت (مرجع) مقایسه شد. شکل ۲ میزان همبستگی روش هارگریوز را در ایستگاه‌های مختلف (که نماینده اقلیم‌های متفاوت می‌باشند) با روش فائو نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که معادله هارگریوز سامانی دارای همبستگی بیش از ۹۰ درصد با روش فائو (مرجع) می‌باشد. بنابراین روش هارگریوز را می‌توان به عنوان بهترین شاخص برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع در مناطق مورد مطالعه در نظر گرفت.

<sup>1</sup> Root Mean Square Difference



شکل (۲). ارزیابی همبستگی روش هارگریوز - سامانی (H-S) با روش فائو-پنمن-مانتیت (FP-M) در ایستگاه های منتخب

ارزیابی مدل‌های اقلیمی

در این تحقیق همانطور که بیان شد جهت تعیین وضعیت خروجی ۱۰ مدل مربوط به گزارش ششم IPCC (CMIP6) برای دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی تبخیر-تعرق مرجع از سنجه‌های آماری خطای مطلق میانگین (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، میانگین خطای اریب (MBE) و نمودار تیلور بهره‌گرفته شد. برای تعیین دقت هر یک از مدل‌های CMIP6، نتایج شبیه‌سازی تبخیر-تعرق در دوره تاریخی با مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده توسط معادله هارگریوز سامانی در دوره مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج ارزیابی مدل‌ها به صورت ماهانه؛ فصلی و سالانه بر اساس نمودار تیلور و سایر سنجه‌های آماری در شکل‌های ۳ تا ۵ و جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دقت مدل‌های مورد بررسی در نواحی مختلف ایران متفاوت است. در بررسی‌های ماهانه، فصلی و سالانه ارزیابی مقادیر تبخیر-تعرق، نمره مهارتی تیلور بیشترین کارایی را به مدل‌های IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2-0 و کمترین کارایی را به مدل MIROC6، MRI-ESM2-0، BCC-CSM2-MR، و GFDL-ESM4، و CMCC-ESM2 اختصاص داده است. نتایج تحقیق خالدی و همکاران (۱۴۰۱) یافته‌های فوق را تأیید می‌کند.

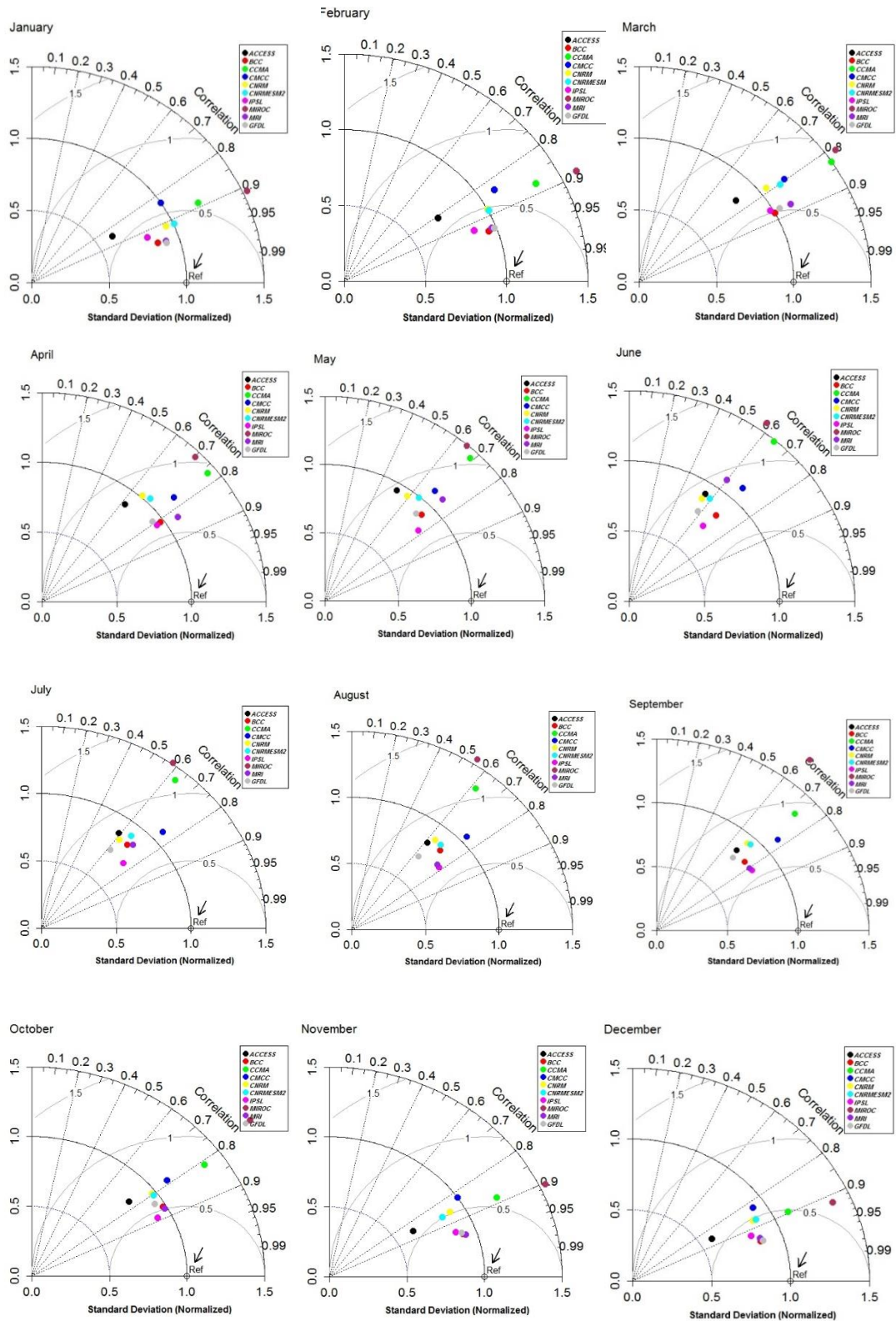
به طور کلی همبستگی بدست آمده بین مدل‌های منتخب و مقادیر مشاهداتی بین ۰/۶ تا ۰/۹۵ برای متوسط

پهنه‌ای ایران در تغییر است. نتایج ارزیابی مدل‌ها گویای آن است که در فصل سرد سال طی ماه‌های سپتامبر، اکتبر، نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه (خصوصاً فصل زمستان)؛ مدل‌های منتخب بیشترین همبستگی را نسبت به مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهند و کمترین همبستگی‌ها در فصل تابستان (ژوئن، جولای، آگوست) مشاهده می‌شود. شاخص‌های ارزیابی MAE، MSE، RMSE و MBE نیز نتایج بسیار نزدیکی با نمودار تیلور دارند.

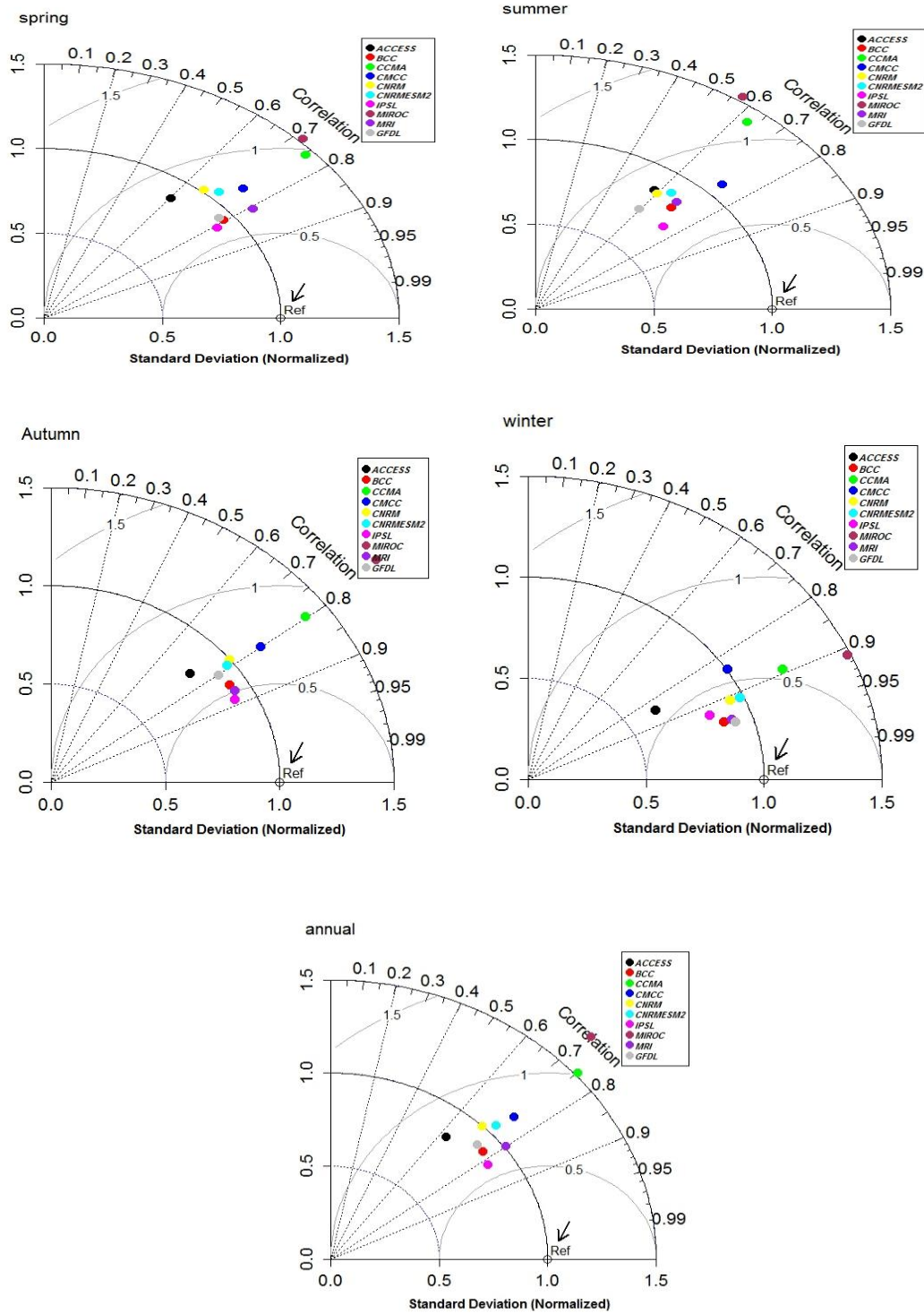
نگاهی دقیق‌تر به نتایج ارزیابی‌ها (اشکال ۳ تا ۵ و جدول ۲) نشان می‌دهد که از میان مدل‌های منتخب، به ترتیب مدل‌های BCC-CSM2-MR و MRI-ESM2-0 در مقایسه با دیگر مدل‌ها در مجموع کارایی بهتری را نشان داده‌اند.

به طور کلی دو مدل منتخب بالاترین همبستگی را نسبت به سایر مدل‌ها نشان می‌دهند. مقایسه انحراف معیار خروجی‌ها با داده‌های مشاهداتی نیز، نشان دهنده عملکرد این دو مدل در برآورد مطلوب انحراف معیار تبخیر-تعرق می‌باشد.

با توجه به سنجه‌های آماری مختلف در جدول ۲ مشاهده می‌شود که مدل‌های BCC-CSM2-MR با مقدار MAE (۰/۴۰)، MSE (۰/۳۳) و RMSE (۰/۴۸) و MBE (۰/۱۱) و MRI-ESM2-0 با مقدار MAE (۰/۵۲)، MSE (۰/۳۷) و RMSE (۰/۶۱) و MBE (۰/۴۰) نسبت به سایر مدل‌ها کمترین خطاهای آماری را به خود اختصاص داده‌اند.

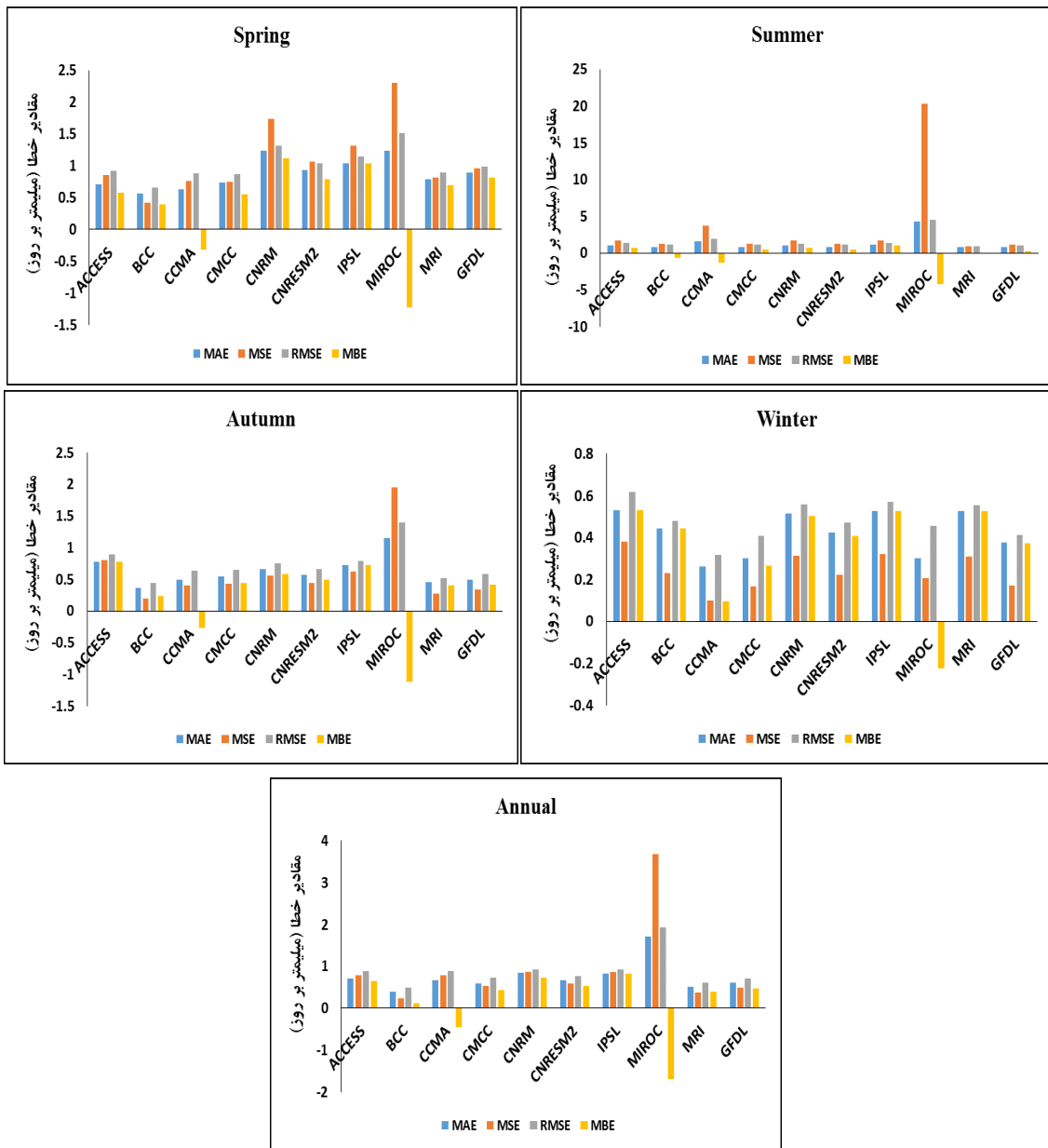


شکل (۳). عملکرد ماهانه مدل‌های CMIP6 بر اساس نمودار تیلور در برآورد تبخیر و تعرق مرجع در ایران طی دوره آماری (۲۰۱۴-۱۹۸۵)



شکل (۴). عملکرد فصلی و سالیانه مدل‌های CMIP6 بر اساس نمودار تیلور در برآورد تبخیر و تعرق مرجع در ایران طی دوره آماری

(۱۹۸۵-۲۰۱۴)



شکل (۵). عملکرد فصلی و سالیانه مدل‌های CMIP6 بر اساس سنجه‌های آماری مختلف در برآورد تبخیر و تعرق مرجع در ایران طی دوره آماری (۱۹۸۵-۲۰۱۴)

جدول (۲). مقادیر ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در برآورد تبخیر و تعرق مرجع در ایران بر اساس شاخص‌های مختلف آماری (میلیمتر بر روز). طی دوره آماری (۱۹۸۵-۲۰۱۴)

ستون	مدل	MAE	MSE	RMSE	MBE
۱	ACCESS-ESM1-5	۰/۷۱	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۶۵۱۵

۲	BCC-CSM2-MR	۰/۴۰	۰/۲۳	۰/۴۸	۰/۱۱
۳	CanESM5	۰/۶۷	۰/۷۸	۰/۸۸	-۰/۴۶
۴	CMCC-ESM2	۰/۶۰	۰/۵۳	۰/۷۳	۰/۴۴
۵	CNRM-CM6-1	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۷۳
۶	CNRM-ESM2-1	۰/۶۷	۰/۵۹	۰/۷۷	۰/۵۴
۷	IPSL-CM6A-LR	۰/۸۳	۰/۸۶	۰/۹۲	۰/۸۲
۸	MIROC6	۱/۷۲	۳/۶۸	۱/۹۲	-۱/۶۹
۹	MRI-ESM2-0	۰/۵۲	۰/۳۷	۰/۶۱	۰/۳۹
۱۰	GFDL-ESM4	۰/۶۰	۰/۴۹	۰/۷۰	۰/۴۷

مدل‌ها در مناطق غربی و فلات داخلی و بخش‌هایی از شرق کشور و کمترین خطای مدل در نواحی سواحل شمالی و جنوبی و شرق ایران می‌باشد.

بررسی آماره MSE برای مدل BCC-CSM2-MR نشان دهنده کمترین خطای مدل در کل پهنه ایران به جز سواحل شمالی و جنوبی کشور می‌باشد. در مقابل کمترین خطای مدل MRI-ESM2-0 در کل پهنه ایران به جز مناطق مرتفع غربی و سواحل دریای عمان می‌باشد. بررسی آماره RMSE برای مدل BCC-CSM2-MR نشان دهنده کمترین خطای مدل در کل پهنه ایران به جز نوار ساحلی کشور (دریای خزر و عمان) می‌باشد. در مقابل کمترین خطای مدل MRI-ESM2-0 مربوط به نواحی شرقی، ضلع جنوب غربی ایران و بخش‌هایی از سواحل شمالی و فلات داخلی ایران می‌باشد و در مجموع بیشترین خطای مدل مربوط به بخش اعظمی از کل پهنه ایران می‌باشد.

بررسی ارتباط بین داده‌های مشاهداتی (ایستگاه) و دوره تاریخی دو مدل منتخب نشان داد که در مجموع

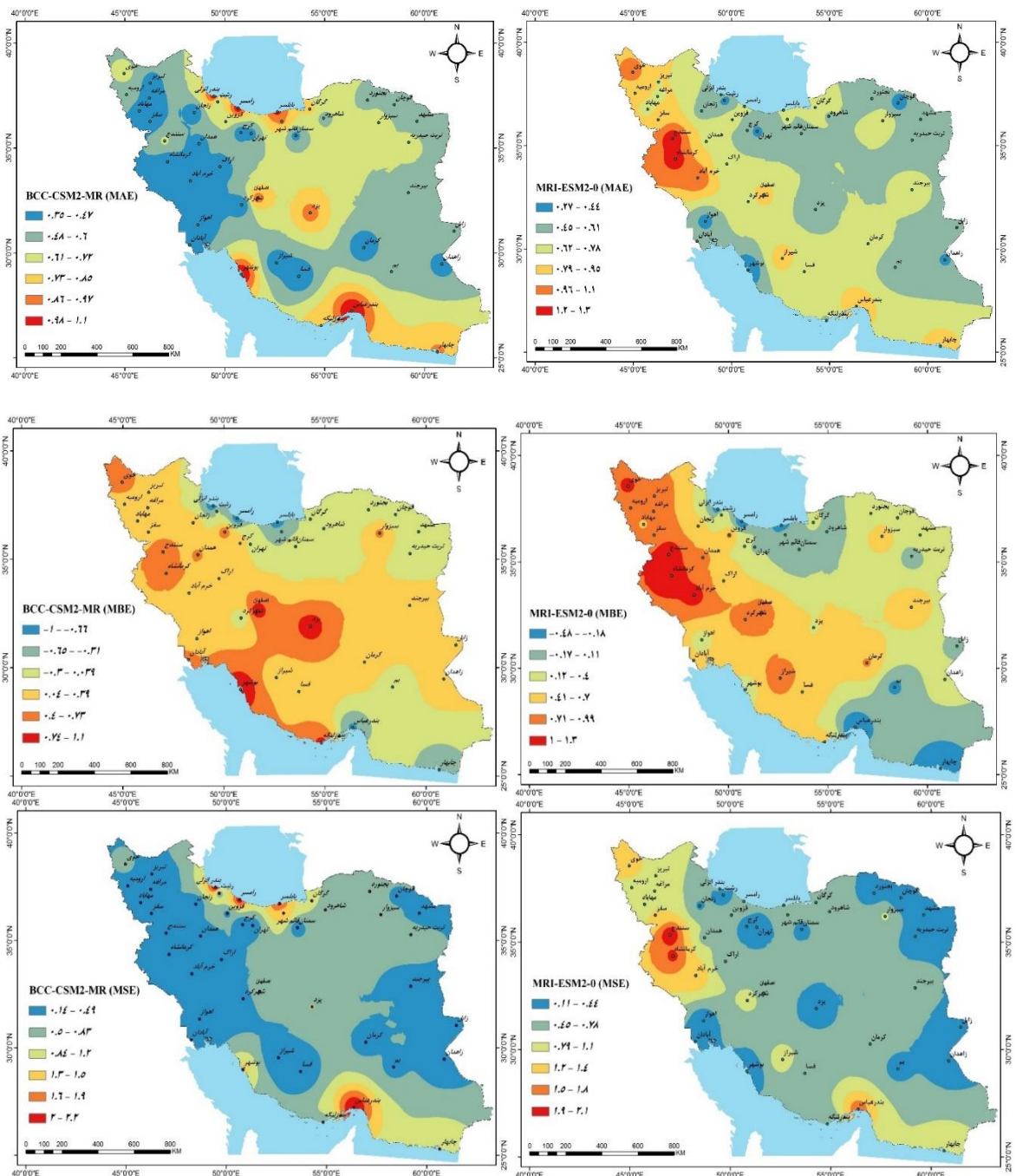
شکل (۶) بررسی ارتباط بین مقادیر تبخیر - تعرق حاصل از داده‌های مشاهداتی (ایستگاه) و دوره تاریخی دو مدل BCC-CSM2-MR و MRI-ESM2-0 را بر اساس سنجه‌های آماری MAE، MSE، RMSE و MBE نشان می‌دهد.

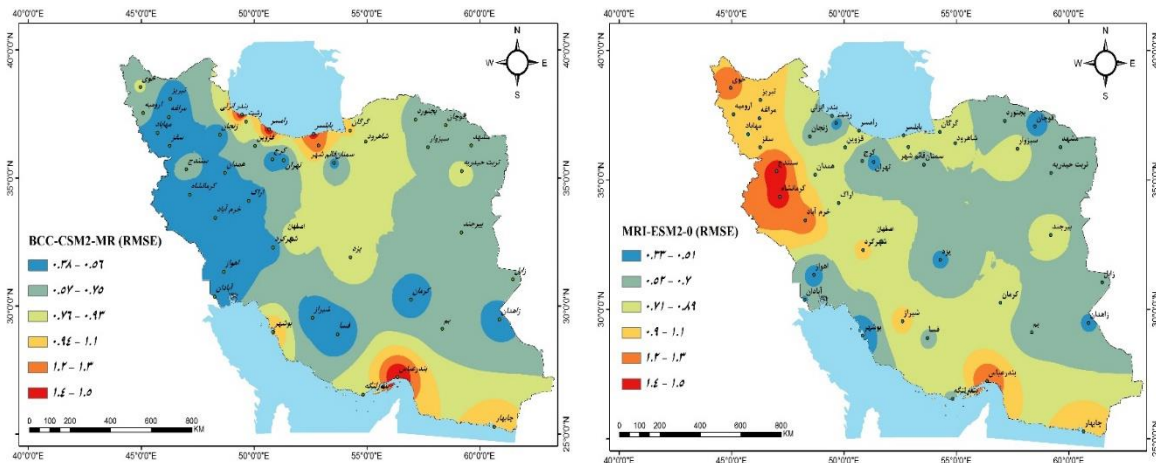
همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، بررسی آماره MAE برای مدل BCC-CSM2-MR نشان دهنده کمترین خطای مدل در مناطق مرتفع غربی، فلات داخلی و شرقی کشور می‌باشد. نواحی ساحلی کشور (دریای خزر و عمان) بیشترین مقدار MAE را در این مدل نشان می‌دهند. در مقابل مدل MRI-ESM2-0 عملکرد بهتری در نواحی سواحل شمالی و جنوبی ایران و بخش اعظمی از فلات داخلی ایران داشته است. این در حالی است که در مناطق مرتفع غربی خصوصاً ایستگاه‌های خوی، کرمانشاه و سنندج؛ بیشترین مقدار MAE مشاهده می‌شود.

بررسی آماره MBE برای مدل‌های BCC-CSM2-MR و MRI-ESM2-0 نشان دهنده بیشترین خطای

MR نشان می‌دهد. به گفته احمدی و همکاران (۱۳۹۸)؛ برف‌های انباشته شده در ارتفاعات بالاتر از ۵۰۰۰ متر به وسیله سپیدایی بالا و ظرفیت حرارتی بالا شناخته می‌شوند و نسبت به مناطق کم ارتفاع، پاسخ قابل توجهی از گرمایش جهانی را نشان نمی‌دهند. نتیجه تحقیق پیش رو یافته‌های فوق را تأیید می‌کند. از نظر منطقه‌ای پهنه‌های اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران به خصوص مناطق شرقی در هر دو مدل از دقت بالایی برخوردار بوده است.

مدل BCC-CSM2-MR در مناطق کوهستانی زاگرس، مناطق خشک و نیمه خشک داخلی و شرقی از دقت بالایی برخوردار است. سواحل شمالی و جنوبی کشور در این مدل بیشترین خطا را نشان می‌دهند. در مدل MRI-ESM2-0 کمترین خطا مربوط به مناطق شمالی، شرقی و جنوب غربی است. با این وجود مدل MRI-ESM2-0 برای مناطق مرتفع زاگرس خطای بیشتری را نسبت به مدل BCC-CSM2-





شکل (۶). صحت سنجی مدل های BCC-CSM2-MR و MRI-ESM2-0 بر اساس سنجه های آماری MAE، MSE، RMSE و MBE در ایران طی دوره آماری (۲۰۱۴-۱۹۸۵)

### نتیجه گیری و جمع بندی

یافته های فوق را تأیید می کند. بررسی ارتباط بین مقادیر مشاهداتی (ایستگاه) و دوره تاریخی دو مدل منتخب نشان داد که مدل BCC-CSM2-MR در مناطق کوهستانی زاگرس، مناطق خشک و نیمه خشک داخلی و شرقی از دقت بالایی برخوردار است. در حالی که سواحل شمالی و جنوبی کشور در این مدل بیشترین خطا را نشان می دهند. در مدل MRI-ESM2-0 کمترین خطا مربوط به مناطق شمالی، شرقی و جنوب غربی است. در مقابل نواحی غربی، ارتفاعات زاگرس و ایستگاه های ساحلی چابهار و بندرعباس با بیشترین خطا مواجه هستند. به طور کلی خطای مدل BCC-CSM2-MR در پهنه های شمالی و جنوبی کشور نسبت به مدل MRI-ESM2-0 بیشتر است. در مقابل مدل MRI-ESM2-0 برای مناطق مرتفع زاگرس خطای بیشتری را نسبت به مدل BCC-CSM2-MR نشان می دهد. علت اصلی خطا، ضریب همبستگی پایین، بالابودن مقدار اریبی در سواحل جنوبی دریای خزر ناشی از شرایط خاص جغرافیایی، تقابل بین خشکی و دریا و تفکیک افقی پایین در این نواحی می باشد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۰). می توان اذعان داشت از نظر منطقه ای پهنه های

جهت انجام پژوهش های اقلیمی استفاده از داده های شبکه ای و خروجی مدل های اقلیمی مستلزم ارزیابی و صحت سنجی است. بدین منظور در این پژوهش، به ارزیابی عملکرد دقت داده های ۱۰ مدل فاز ششم (CMIP6) به منظور مدل سازی تغییرات تبخیر- تعرق در قالب مدل تجربی هارگریوزسامانی در پهنه ایران پرداخته شد. این صحت سنجی برای داده های تاریخی مدل ها با ارزیابی دقت آن در مقابل مقادیر تبخیر- تعرق دوره مشاهداتی با استفاده از سنجه های آماری میانگین مربعات خطا (MSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای مطلق میانگین (MAE)، میانگین خطای اریب (MBE) و نمودار تیلور انجام پذیرفت. به طور کلی نتایج ارزیابی ها در مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه نشان می دهد که دقت مدل های CMIP6 در نواحی مختلف ایران متفاوت است. از میان مدل های مورد بررسی، مدل های BCC-CSM2-MR و MRI-ESM2-0 در مقایسه با دیگر مدل ها کارایی بهتری را در برآورد مقادیر تبخیر- تعرق مرجع نشان داده اند. کمترین کارایی نیز مربوط به مدل های MIROC6، CCMA(CanESM5) و CMCC-ESM2 می باشد. نتایج تحقیق خالدی و همکاران (۱۴۰۱)

- در ارزیابی ناهنجاری فصلی دمای ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی. فیزیک زمین و فضا، ۴۵ (۳)، ۶۴۴-۶۲۵.
۲. حیدر نژاد، مریم؛ زارع ارنانی، محمد؛ و پاک پرور، مجتبی (۱۳۹۲). تعیین دقت مدل SEBS در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه یزد کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی، (۱)، ۱-۱۶.
۳. خواجه امیری خالدی، چکاوک؛ خسروی، محمود؛ طاووسی، تقی؛ حمیدیان پور، محسن؛ و کیانی مقدم، منصور (۱۴۰۱). صحت سنجی عملکرد برون‌داد مدل اقلیمی CMIP6 با داده های مشاهداتی کرانه های مکران. هواشناسی و علوم جو، (۱)، ۴۱-۲۲.
۴. رثوف، مجید؛ عزیزی مبصر، جوانشیر (۱۳۹۶). ارزیابی هجده مدل تبخیر- تعرق مرجع در شرایط آب و هوایی دشت اردبیل. پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۴ (۶)، ۲۴۱-۲۲۷.
۵. زارعیان، محمد جواد؛ دهقان، حسین؛ و گوهری، علیرضا (۱۴۰۱). ارزیابی دقت مدل های CMIP6 در برآورد دما و بارش ایران بر اساس تحلیل شبکه ای. نشریه مدیریت آب و آبیاری. ۱۲ (۴)، ۷۸۳-۷۹۷.
۶. زرین، آذر، و داداشی رودباری، عباسعلی (۱۳۹۹). پیش نگری چشم انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل های جفت شده فاز ششم (CMIP6). فیزیک زمین و فضا، ۴۶ (۳)، ۶۰۲-۵۸۳.
۷. زرین، آذر، و داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۰ الف). پیش نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) بر اساس رویکرد همادی چندمدلی CMIP6. پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۵۳ (۱)، ۹۰-۷۵.
۸. سالاریان، محمد؛ نجفی، معصومه؛ داوری، کامران؛ اسلامیان، سید سعید؛ و حیدری، محمد (۱۳۹۳). مناسب ترین روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در شرایط کمبود داده هواشناسی در ماه های گرم و سرد سال (مطالعه موردی شهرستان اصفهان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، (۱)، ۷۳-۶۲.
۹. شجاع، فائزه؛ و شمسی پور، علی اکبر (۱۴۰۲). پیش نمایی تغییرات بارش های آبی حوضه های آبخیز تامین کننده آب شهر تهران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲ (۴)، ۱۸۰-۱۵۱. DOI: 10.22111/jneh.2022.42622.1908
۱۰. علی زاده، امین؛ کمالی، غلامعلی؛ خانجانی، محمد جواد؛ و محمدرضا، رهنورد (۱۳۸۳). ارزیابی روش های برآورد تبخیر - تعرق در مناطق خشک ایران. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۱۹ (۲)، ۹۷-۱۰۵.
۱۱. فخار، محدثه السادات؛ کاویانی، عباس (۱۴۰۰). مقایسه مفاهیم تبخیر-تعرق پتانسیل و مرجع با استفاده از داده های لایسیمی

اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران (مناطق شرقی) در هر دو مدل از دقت بالایی برخوردار بوده است. نتایج ارزیابی مدل ها گویای آن است که در فصل سرد سال مدل های منتخب بیشترین همبستگی را نسبت به مقادیر مشاهداتی نشان می دهند و کمترین همبستگی ها در فصل تابستان مشاهده می شود. در همین راستا زارعیان و همکاران (۱۴۰۱) دریافتند که خطای مدل های مختلف فاز ششم (CMIP6) در برآورد دما در ماه های گرم سال بیشتر از ماه های سرد سال بوده است. نتیجه تحقیق پیش رو یافته های فوق را تأیید می کند. یافته های این مطالعه اطلاعات مفیدی را برای مدیران منابع آب فراهم می کند تا اقدامات خاصی را برای کاهش رویدادهای شدید در مناطقی که بیشتر تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی قرار دارند، توسعه دهند. با این حال، این نتایج بر اساس مدل های منفرد GCM است. استفاده از مجموعه های همادی (با در دسترس قرار گرفتن داده ها) و محرک های کلیدی احتمالی در مناطق مختلف ممکن است اطلاعات بیشتری در مورد تبخیر- تعرق در ایران ارائه دهد. بنابر نتایج به دست آمده در این پژوهش باید به این نکته توجه داشت که در نواحی مختلف کشور برای برآورد تبخیر - تعرق مرجع، باید از مدل های CMIP6 مناسب آن ناحیه استفاده نمود. تحقیقات بیشتر با ارزیابی چگونگی تأثیر مقادیر تبخیر - تعرق برآورد شده (با استفاده از مدل های CMIP6) بر منابع آب، پوشش زمین، رطوبت خاک و رواناب در مقیاس منطقه ای می تواند دنبال شود.

## تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره "۴۰۰۲۱۶۱" انجام شده است.

## منابع

۱. احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ اکبری ازیرانی، طیبه؛ و کریمی، جمال (۱۳۹۸). کارایی مدل HadGEM2-ES

25. Granger, R.J. (1999). Satellite-derived estimation of evapotranspiration in Gediz basin, *Journal of Hydrology*, 229, 70-76.
26. Guo, B., Zhang, J., Gong, H., Cheng, X. 2014. Future climate change impacts on the ecohydrology of Guishui River Basin China, *Ecohydrology & Hydrobiology*, 14(1), 55-67.
27. Gupta, V., Singh, V., Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1- 1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *Journal of Hydrology*, 590, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125422.
28. Gupta, V.; Singh, V.; Jain, M.K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *J. Hydrol.*, 590, 125422.
29. Gusain, A.; Ghosh, S.; Karmakar, S. (2020). Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmos. Res.* 232, 104680.
30. Han, S., Tang, Q., Zhang, X., Xu, D., and Kou, L. (2016). Surface wind observations affected by agricultural development over Northwest China. *Environmental Research Letters*, 11(5).
31. Hoon Song, Y., Chung, E. S., Shahid, Sh. (2022). Uncertainties in evapotranspiration projections associated with estimation methods and CMIP6 GCMs for South Korea, *Science of The Total Environmen*, 825, 153953
32. Houerou, H.N.Le. And Le Houerou, H.N. (1993). Climatic changes and desertification. *Secheresse*. 4 (2), 95-111.
33. Hu, T.S., Lam, K.C., Ng, S.T. 2001. River flow time series prediction with a range dependent neural network. *Hydrological Science Journal*, Vole 46: pp 729-745.
34. Karamoz, Mohammad, Ramezani, Farid, Razavi, Saman. (2006). Long-term prediction Precipitation Using Meteorological Signals: Application of Artificial Neural Networks, 7th International Congress on Civil Engineering, Tehran, Page 11.
35. Li, Z., Zhengb, F., Liub, W., (2012). Spatiotemporal Characteristics of Reference Evapotranspiration during 1961–2009 and its Projected Changes during 2011–2099 on the Loess Plateau of China, *Agricultural and Forest Meteorology*, 154– 155.
36. Lin, J.Y., Cheng, C.T., Chau, K.W. (2006). Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Science Journal*, Vol 51: pp 599-612.
37. Lin, W.; Chen, H. (2020). Assessment of model performance of precipitation extremes over the mid-high latitude areas of Northern Hemisphere: From CMIP5 to CMIP6. *Atmos. Ocean. Sci. Lett.*, 13, 598–603.
38. Lovino, M.A.; Pierrestegui, M.J.; Müller, O.V.; Berbery, E.H.; Müller, G.V.; Pasten, M. (2021). Evaluation of historical CMIP6 model simulations and future projections of temperature and precipitation in Paraguay. *Clim. Change*, 164, 1–24.
- در استان قزوین. محیط زیست و مهندسی آب، ۷ (۴)، ۶۸۲–۶۶۸.
۱۲. گودرزی مسعود، صلاحی برومند، و حسینی، سید اسعد (۱۳۹۷). برآورد میزان تبخیر و تعرق در ارتباط با تغییرات اقلیمی در حوزه ی آبخیز دریاچه ارومیه. *مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران*. ۱۲(۴۱):۶۰–۵۳.
۱۳. معصوم پور سماکوش، جعفر؛ میری، مرتضی؛ و پورکمر، فاطمه (۱۳۹۶). ارزیابی داده های مدل های اقلیمی CMIP5 در مقابل داده های مشاهده ای ایران. *ژئوفیزیک ایران*، ۱۱(۴)، ۴۰–۵۳.
14. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper* 56. Rome, Italy, 300 p.
15. Bannayan M., and Hoogenboom G. (2008). Daily weather sequence prediction realization using the non-parametric nearest-neighbor re-sampling technique. *International Journal of Climatology*. 28 (10), 1357-1368.
16. Boé J, Terray L (2008) Uncertainties in summer evapotranspiration changes over Europe and implications for regional climate change. *Geophysical Research Letters*. VOL. 35. <https://doi.org/10.1029/2007GL032417>
17. Chen, C.; Hsu, H.; Liang, H. (2021). Evaluation and comparison of CMIP6 and CMIP5 model performance in simulating the seasonal extreme precipitation in the Western North Pacific and East Asia. *Weather. Clim. Extrem.* 31, 100303.
18. Cook BI, Smerdon JE, Seager R CS (2014) Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*. 43(9):2607–2627. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2075-y>
19. Cui, T.; Li, C.; Tian, F. (2021). Evaluation of Temperature and Precipitation Simulations in CMIP6 Models over the Tibetan Plateau. *Earth Space Sci*, 8, e2020EA001620.
20. Dinpashoh, Y., (2006). Study of Reference Crop Evapotranspiration in I.R. of Iran, *Agricultural Water Management* 84, 123-129.
21. Eyring, V.; Bony, S.; Meehl, G.A.; Senior, C.A.; Stevens, B.; Stouffer, R.J.; Taylor, K.E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9, 1937–1958.
22. Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F. and Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3), 1539-1562.
23. Fowler, H J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. *International Journal of Climatology*, 27, 1547-1578.
24. Goudarzi, M., Salahi, B., Hosseini, S. A. (2018). Estimation of Evapotranspiration Rate Due to Climate Change in the Urmia Lake Basin, *jwmseir*, 12 (41):1-12.

- and temperature for China from CMIP5 models. *Journal of Hydrometeorology*, 19(3), 609-623.
53. Yang, X.; Zhou, B.; Xu, Y.; Han, Z. (2021). CMIP6 Evaluation and Projection of Temperature and Precipitation over China. *Adv. Atmos. Sci*, 38, 817–830.
  54. Yang, Y., Roderick, M. L., Zhang, S., McVicar, T.R., and Donohue, R.J. (2019). Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO<sub>2</sub> in climate projections. *Nature Climate Change* 9(1): 44-48.
  55. Zhang, X a, Hua L a, Jiang D. (2022). Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang, China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. Volume 15, Issue 2, <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100128>
  56. Zhu, H.; Jiang, Z.; Li, J.; Li, W.; Sun, C.; Laurent, L.I. (2020). Does CMIP6 Inspire More Confidence in Simulating Climate Extremes over China? *Adv. Atmos. Sci*. 37, 1119–1132.
  39. Lu, A., Kang, S., Li, Z. and Theakstone, W. H., (2010), Altitude effects of climatic variation on Tibetan Plateau and its vicinities, *Journal of Earth Science*, 21(2), 189-198.
  40. Majdi, F., Hosseini, S.A., Karbalaee, A., Kaseri, M., Marjanian, S. (2022). Future projection of precipitation and temperature changes in the Middle East and North Africa (MENA) region based on CMIP6. *Theor Appl Climatol*, 147, 1249–1262
  41. Mariotti, A., Pan, Y., Zeng, N. et al. (2015). Long-term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability. *Clim Dyn* .44, 1437–1456. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2487-3>.
  42. Ojwang, O. G., Agatsiva, J. and Situma, C. (2010). Analysis of climate change and variability risks in the smallholder sector. *Environment and Natural Resources Management working .paper*.70P.
  43. Pathak, R.; Sahany, S.; Mishra, S. K. and Dash, S. K. (2019). Precipitation Biases in CMIP5 Models over the South Asian Region, *Scientific reports*, 9 (1): 1-13.
  44. Richter, I., Tokinaga, H. (2020). An overview of the performance of CMIP6 models in the tropical Atlantic: mean state, variability, and remote impacts. *Clim Dyn*. 55, 2579–2601
  45. Seo K, Waliser DE, Tian B, Famiglietti JS, Syed TH (2009) Evaluation of global land-to-ocean freshwater discharge and evapotranspiration using space-based observations. *Journal of Hydrology* 373:508–515. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.05.014>
  46. Shi, Y., Gao, X., Zhang, D. and Giorgi, F., (2011), Climate change over the Yarlung Zangbo–Brahmaputra River Basin in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model, *Quaternary international*, 244(2), 159-168.
  47. Srivastava, A.; Grotjahn, R.; Ullrich, P.A. (2020). Evaluation of historical CMIP6 model simulations of extreme precipitation over contiguous US regions. *Weather. Clim. Extrem.* 29, 100268
  48. Szwed, M. (2017). Projections of changes of areal evapotranspiration for different land-use units in the Wielkopolska Region (Poland). *Theor Appl Climatol*, 130, 291–304.
  49. TamBY, Szeto K, Bonsal B, Flato G, Cannon AJ, Rong R (2019) CMIP5 drought projections in Canada based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Canadian Water Resources Journal*. 44(1): 90–107. <https://doi.org/10.1080/07011784.2018.1537812>
  50. Wang, Z. Zhan, Ch . Ning. L. Guo, H. (2021). Evaluation of global terrestrial evapotranspiration in CMIP6 models. *Theoretical and Applied Climatology* .143(11):1-11 DOI: 10.1007/s00704-020-03437-4.
  51. Wu, H., Wang, X., Wang, Y., Xu, Y., and Han, X. (2019). Temporal variations in reference evapotranspiration in Hubei Province, China, from 1960 to 2014. *Theoretical and Applied Climatology* .135(1-2), 433-448.
  52. Yang, X., Wood, E. F., Sheffield, J., Ren, L., Zhang, M. and Wang, Y., (2018), Bias correction of historical and future simulations of precipitation

## Validation of the output performance of CMIP6 climate models in estimating the Reference evapotranspiration of Iran

Fahimeh Shakeri<sup>1</sup>, Gholamabbas Fallah Ghalhari<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Postdoctoral Researcher of Climatology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

<sup>2</sup> Professor of Climatology, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran

\*Corresponding Author Email: [ab\\_fa789@yahoo.com](mailto:ab_fa789@yahoo.com)

Received: 10 December 2023, Accepted: 16 March 2024

### ABSTRACT

Reference Evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) is one of the most important components of the hydrological cycle, and its correct estimation is very important in the design and management of irrigation systems, environmental studies and water resources. In order to carry out climate research, the use of network data and the output of climate models requires evaluation and validation. Therefore, the present study has been compiled with the aim of evaluating the accuracy of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) in estimating potential evapotranspiration in Iran. For this purpose, the historical outputs of 10 CMIP6 models were extracted from the United States Geological Survey (USGS) database, and the amount of ETP in 44 stations of Iran for the base period and the historical period of the models (1985-2014) were estimated using the Hargreaves Samani method. Mean Square Error (MSE), Root Mean Square Error (RMSE), Maximum Absolute Error (MAE), Mean Bias Error (MBE) and Taylor's diagram were used to verify the accuracy of the models and the corresponding observed values. The results of evaluating the accuracy of the models in monthly, seasonal and annual scales showed that the BCC-CSM2-MR and MRI-ESM2-0 models are more accurate compared to other models in Iran, and the MIROC6 model with the value of RMSE (1.91 mm) has shown the weakest performance among the studied models. Regionally, in general, the error of the BCC-CSM2-MR model is higher in the northern and southern regions of the country than the MRI-ESM2-0 model. However, the MRI-ESM2-0 model shows more error than the BCC-CSM2-MR model for the Zagros highlands. The error rate of these models in arid and semi-arid climatic zones of Iran, especially in the eastern regions, was lower than in other regions.

**Keywords:** Assessment, Iran, Reference Evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), CMIP6 models, Taylor's diagram, Hargreaves Samani method

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Shakeri, F.; Fallah Ghalhari, G.A. (2024). Validation of the output performance of CMIP6 climate models in estimating the Reference evapotranspiration of Iran. *J. Meteorol. Atmos. Sci.*, 6(2): 125-144

### COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

