

## مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.2.1.5

درصد همانندی: ۱۳٪

## ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 بر اساس شاخص آماری KGE برای شبیه‌سازی بارش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

علی شاهی<sup>۱</sup>، برومند صلاحی<sup>۲\*</sup><sup>۱</sup> دانشجوی دکترای آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ali.shahi@uma.ac.ir<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. salahy@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

## چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی دقت مدل‌های منتخب در ۵ ایستگاه هواشناسی همدیدی بر اساس شاخص آماری KGE برای شبیه‌سازی بارش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه (ایران) در سه دهه گذشته انجام گرفته است. از داده‌های ۴ مدل AOGCM (MPI-ESM1-2-HR، INM-CM5-0، BCC-CSM2-MR و EC-EARTH3-CC) از مجموعه مدل‌های سری CMIP6 استفاده شد. دوره تاریخی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ در نظر گرفته شد. برون‌داد خام مدل‌ها توسط نرم‌افزار CMHyd مقیاس‌کاهی شد. برای انتخاب روش مناسب ریزمقیاس از میان ۲ روش Linear Scaling و Distribution mapping نمودار تیلور ترسیم شد. کارایی مدل‌ها در هر ایستگاه با KGE ارزیابی شدند. محاسبات نشان داد که برترین مدل برای شبیه‌سازی بارش در همه ایستگاه‌های منتخب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مدل MPI و ضعیف‌ترین مدل، مدل BCC است. بیش‌ترین و کم‌ترین تصحیح توسط شاخص آماری کلینگ‌گوپتا، به ترتیب در ایستگاه‌های مراغه مهاباد بود. بیشینه و کمینه مقدار شاخص KGE به ترتیب در ایستگاه‌های تبریز و مراغه به دست آمد. نتایج نشان داد که برون‌داد خام مدل‌ها دارای خطای زیادی بوده و نمی‌توان به‌طور مستقیم از آن‌ها استفاده کرد. نتایج نشان داد که روش مقیاس‌کاهی Linear Scaling قابلیت مناسبی در بهینه کردن برون‌داد مدل‌های GCM در منطقه مورد مطالعه دارد. با توجه به مقدار سنجه KGE برای مدل MPI که در هر ۵ ایستگاه بعد از مقیاس‌کاهی بیشتر از ۰/۰۳ است، توانایی این مدل برای ارزیابی بارش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه آشکار شد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، بارش، نمودار تیلور، حوضه آبریز دریاچه ارومیه، CMIP6، CMHYD، KGE.

## ۱. مقدمه

توزیع مکانی نامنظم بارش در مناطق مختلف جغرافیایی سبب اختلاف زیاد در دسترسی به آب شده و نیاز به مدیریت آن را تشدید کرده است [۱]. مطالعات انجام گرفته در ایران بیانگر روند کاهشی بارش، روند افزایشی دما و کاهش منابع آبی تحت اثر تغییر اقلیم است [۲]. با توجه به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و روند گرمایش جهانی، پیش‌بینی می‌شود که تغییرات اقلیمی بر منابع آب و آب‌شناسی تأثیر بگذارد [۳]. فاز ششم پروژه مقایسه مدل جفت شده (CMIP6)، الگوی تکامل و ویژگی‌های فازهای قبلی CMIP را ادامه می‌دهد و شامل سناریوهای جدید سازمان‌دهی شده از مدل‌سازی اقلیمی جهانی است که برای شناخت مکانیسم‌های مختلف آب و هوا طراحی شده است [۴]. در مقایسه با CMIP5 مدل‌های موجود در CMIP6 عموماً دارای وضوح مدل بهتر و فرآیندهای فیزیکی بهبود یافته‌اند [۵]. با توجه به عوامل محیطی در مناطق مختلف جهان، این مناطق با چالش‌های متفاوتی مواجه خواهند شد؛ بنابراین، مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم حیاتی است [۶].

عدم قطعیت و اریبی از مدلی به مدل دیگر و برای متغیرهای خاص متفاوت است از این رو استفاده مستقیم از خروجی مدل‌ها توصیه نمی‌شود؛ زیرا ممکن است منجر به نتایج نادرست شوند بنابراین استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و یا تصحیح اریبی برای استفاده از داده‌های اقلیمی مدل‌های GCM به عنوان مرحله‌ای ضروری در نظر گرفته می‌شود [۷]. شبیه‌سازی‌های تاریخی برای ارزیابی دقت مدل‌ها مفید هستند. دوره‌های تاریخی مدل‌ها ابزار مهمی برای تعیین سازگاری و حساسیت مدل‌های اقلیمی نسبت به داده‌های مشاهداتی و کنترل عدم قطعیت این مدل‌ها می‌باشند [۴].

پیش‌نگری تغییرات بارش‌های تابستانه جنوب شرقی ایالات متحده توسط فریرا و همکاران [۸] نشان داد که افزایش دما و شار بخار آب منجر به افزایش زیاد بارش شده است. المزروعی و همکاران [۹] تغییرات بارش و دما در شبه‌جزیره عربستان را برای دوره آینده پیش‌نگری کردند. آن‌ها از برونداد ۳۱ مدل از CMIP6 در این مطالعه استفاده کردند.

نتایج پژوهش نشان داد که میانگین بارش سالانه حدود ۰/۶۳ درجه سانتی‌گراد در هر دهه افزایش یافته و تغییرات بارش کاهش خواهد بود. ژانگ و همکاران [۱۰] قابلیت‌های ۴۲ مدل از CMIP6 را جهت بازتولید دما و بارش در سین کیانگ چین طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۵ را مورد ارزیابی قرار دادند نتایج نشان داد این مدل‌ها توانایی خوبی در شبیه‌سازی دما و بارش دارند و استفاده از ترکیب چند مدل نیز عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های منفرد دارند. آزاد و احمدی [۱۱] در مطالعه‌ای به ارزیابی برونداد مدل‌های CMIP6 مربوط به پارامترهای بارش و میانگین دما در کشور ایران پرداختند. برای این منظور از ۴۰ مدل اقیانوسی - جوی استفاده شد. برای انجام تصحیح بایاس روش نگاشت چارک (Quantile Mapping) به کار رفت. نتایج تحقیق نشان داد که روش نگاشت چارک عملکرد مناسبی در تصحیح اریبی بارش در منطقه مورد مطالعه دارد و همچنین از بین مدل‌های مورد استفاده، ۳ مدل NorESM2-MM, AWI-ESM-1-1-LR, MPI-ESM1-2-LR and در زمینه ارزیابی بارش عملکرد دقیقی داشته‌اند.

تیکو و همکاران [۱۲] به شبیه‌سازی و ارزیابی بارش با مدل‌های CMIP6 در منطقه آمهارا اتیوپی پرداختند. آن‌ها از ۱۶ مدل GCM استفاده کردند. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها در دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ از معیارهای آماری مانند ضریب تعیین ( $R^2$ )، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین بایاس (MB)، نمودار تیلور و آزمون t استفاده شد. نتایج نشان داد که عملکرد مدل‌ها در بخش شرقی آمهارا نسبت به غرب مناسب‌تر بوده است.

شریفان و همکاران [۱۳] با استفاده از مدل‌های CMIP6 تأثیر تغییرات آب و هوا بر بارش دوره آینده حوضه رودخانه Siminehrood (ایران) را ارزیابی کردند. برای این منظور، عملکرد ۲۶ مدل اقلیمی مورد استفاده برای پیش‌بینی بارش در دوره پایه (۱۹۸۸-۲۰۱۸) ارزیابی و مدل‌ها رتبه‌بندی و وزن‌دهی شدند. سپس، روند تغییرات بارش طی دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی و مدل LARS-WG 7.0 برای ریزمقیاس‌نمایی

آبریز دریاچه ارومیه، دقت مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی دما خوب و در شبیه‌سازی بارش ضعیف بوده و در بین مدل‌ها CMCC بیشترین خطا را داشته است.

انصاری مهابادی و همکاران [۱۶] به بررسی روند تغییرات دما و بارش حوزه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس پرونداد ۱۰ مدل CMIP6 تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 پرداختند. دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) و دوره آتی را ۲۰۲۰-۲۰۳۹ در نظر گرفتند. مدل‌ها بر اساس سنجه KGE رتبه‌بندی شدند و بر مبنای رتبه‌های حاصل، وزن دهی مدل‌ها صورت گرفت. نتایج نشان داد که از ۶ مدل برتر برای شبیه‌سازی بارش و ۴ مدل برتر برای شبیه‌سازی دما در نواحی مختلف کشور تعیین شد. به علاوه نتایج حاصل از تصویرسازی اقلیمی حاکی از تغییر بارش از حدود ۱۹+ تا ۱۲- درصد و افزایش دما به طور متوسط در دامنه‌ی ۰/۱ تا ۰/۶ درجه سلسیوس در حوضه‌های مختلف کشور طی ۲۰ سال آتی خواهد بود، به طوری که نواحی غربی کشور بیشترین کاهش بارندگی را در این دوره تجربه خواهند کرد.

بازیان و عمادی [۱۷] ارزیابی منابع آب‌های زیرزمینی غرب ایران با استفاده از مشاهدات ماهواره‌های GRACE و GRACE-FO از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ انجام دادند. نتایج نشان دهنده کاهشی به میزان  $0/15 \pm 1/17$  سانتی‌متر بر سال در سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه غرب ایران است، همچنین کاهش  $0/19 \pm 1/28$  سانتی‌متر بر سال در کل سطح منابع آبی که شامل آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، آب معادل برف، رطوبت خاک می‌باشد در غرب ایران مشاهده گردید. مدل بارش نیز با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM مورد بررسی قرار گرفت که همبستگی  $0/16$  با ذخایر آب مشاهده شده توسط ماهواره‌های GRACE و GRACE-FO دارد.

باباییان و همکاران [۱۸] به مطالعه چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس کاهی آماری پرونداد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMhyd پرداختند. در این پژوهش از ۴۳ ایستگاه هواشناسی و چهار مدل از نوع ESM به نام‌های MIROC6، FGOALS\_g3، BCC-CSM2-MR و

داده‌های بارش مدل‌های GCM پیاده‌سازی شد. نتایج نشان دادند که بارندگی سالانه تحت هر سه سناریو در مقایسه با دوره پایه کاهش خواهد یافت.

نعیمی و همکاران [۱۴] به مقایسه مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی مبتنی بر یادگیری ماشین برای برآورد میزان کلروفیل آ در سواحل قشم و هرمز پرداختند. برای این منظور از داده‌های ماهواره TERRA سنجنده MODIS و برداشت‌های میدانی از نقاط مختلف محدوده مطالعه استفاده شده است. مدل‌های مورد بررسی شامل رگرسیون خطی، مدل خطی تعمیم یافته با توزیع پواسون، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان است. عملکرد این مدل‌ها با استفاده از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد خطا (MPE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تعیین R-squared (rsq) ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که رگرسیون خطی و مدل خطی تعمیم یافته ضعیف عمل می‌کنند، در حالی که جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان عملکرد بهتری را نشان می‌دهند. به طور خاص، جنگل تصادفی بالاترین عملکرد را با  $RMSE=0/5725$  و  $rsq=0/6632$  نشان می‌دهد. این مدل قابلیت تشخیص الگوهای غیرخطی و پیچیده‌تر را دارد و با استفاده از تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری می‌تواند به صورت مؤثر با داده‌های حجیم کار کند. به طور کلی، این پژوهش اثربخشی مدل‌های یادگیری ماشین، به ویژه جنگل‌های تصادفی را در پیش‌بینی دقیق میزان کلروفیل آ به عنوان یک عامل مهم در مدیریت اکوسیستم‌های دریایی در منطقه مورد مطالعه برجسته می‌کند.

عبدالعلی‌زاده و همکاران [۱۵] دقت مدل‌های CMIP6 را در شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۳ مورد ارزیابی قرار دادند. از مدل‌های MPI-ESM1-2-HR، MRI-ESM2-0، CMCC-ESM2 و INM-CM5-0 استفاده کردند. تصحیح اریبی را با روش آماری تغییر عامل دلتا انجام دادند. به منظور درستی‌سنجی از سنجه‌های  $R^2$ ، RMSE، NRMSE و نمودارهای تیلور استفاده کردند. یافته‌ها حاکی از آن بود که نشان داد که در حوضه

خطا و ضریب ناش-ساتکلیف به ترتیب  $R2=0/941$ ،  $RMSE=(m/s)0/04$  و  $NSE=0/88$  پیش‌بینی نمود. با این حال ویژگی‌های شبکه مورد استفاده تأثیر بالایی بر توزیع سرعت دارا بود، به گونه‌ای که شبکه منظم با تراکم بالا بهترین دقت را در شبیه‌سازی سرعت جریان داشته است. برای شبیه‌سازی جریان در مدل عددی، تعیین مدت‌زمان شبیه‌سازی و گام‌های زمانی در انجام فرآیند محاسبات عددی، لازم و ضروری است. در این تحقیق در مراحل مختلف، زمان شبیه‌سازی متفاوت بوده است و گام‌های زمانی در اغلب مراحل شبیه‌سازی برابر با مقدار  $0/5$  ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین نتایج با بررسی نقشه‌های ماهواره‌ای مربوط به ۵۱ سال اخیر نشان داد محدوده دیواره‌های ساحلی محدوده مئاندر جنگیه به دلیل تنش برشی تمایل به فرسایش داشته است.

حوضه آبریز دریاچه ارومیه، با توجه به خشک‌سال‌های اخیر رخ داده در این منطقه نیازمند تحقیق در زمینه بارش و پیش‌نگری این متغیر در منطقه مذکور است. استفاده از مدل‌های مناسب با دقت بالا می‌تواند خطای محاسبات را کاهش داده و به مدیریت آب منطقه مورد مطالعه کمک زیادی کند. این مطالعه با ارزیابی مدل‌های گزارش ۶ IPCC که قدرت تفکیک بالایی دارند و سازگار با بارش هستند و رتبه‌بندی ۴ مدل کارآمد CMIP6 که توسط روش‌های مناسب مقیاس‌گامی شده‌اند و با شاخص آماری دقیق کلینگ‌گوپتا مورد صحت‌سنجی قرار گرفته‌اند، مطالعه متفاوتی محسوب می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش از دو گروه داده‌های مشاهداتی و مدل به صورت روزانه برای ۳ دهه استفاده شده است. داده‌های بارش روزانه ۵ ایستگاه همدیدی واقع در شمال غرب ایران از سازمان هواشناسی کشور ایران [www.irimo.ir](http://www.irimo.ir) اخذ گردید. برونسداد مدل‌های گزارش ۶ از سایت <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/> برای دوره زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ (دوره تاریخی) استخراج شد.

ACCESS-ESM1-5 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد. دوره مشاهداتی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و دوره‌های آینده به صورت آینده نزدیک ۲۰۲۶-۲۰۵۰، آینده میانه ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و آینده دور ۲۱۰۰-۲۰۷۶ در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که تغییرات بارش آینده در حدود ۷۸ درصد از ایستگاه‌ها معنی‌دار نیستند و در ۱۹ و ۳ درصد ایستگاه‌ها به ترتیب افزایش و کاهش معنی‌داری دارند. بیشترین افزایش بارش در جنوب-جنوب شرق و بیشترین کاهش در زاگرس مرکزی رخ خواهد داد.

جوان و عزیززاده [۱۹] به ارزیابی روش‌های مختلف تصحیح اریبی بر پیش‌نگری بارش مدل GFDL-ESM4 با دوره پایه ۱۹۹۰-۲۰۱۴ در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. پنج روش تصحیح اریبی شامل روش‌های نسبت‌گیری خطی (LS)، نسبت‌گیری شدت موضعی (LOCI)، تبدیل توانی (PT)، نکاشت توزیع (DM) و تغییر عامل دلتا (DC) را ارزیابی کردند. به منظور مقایسه داده‌های مشاهداتی و برونسداد مدل برای انتخاب بهترین روش برای تصحیح داده‌های سناریوهای آینده از معیارهای ضریب همبستگی، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد اریبی (PBias) استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که روش تغییر عامل دلتا برآوردهای خام را پس از اصلاح به طور قابل توجهی بهبود داد؛ علاوه بر این، پیش‌نگری‌های میانگین سالانه بارش در سناریوی SSP126 بین ۲ تا ۹ درصد، در SSP245 بین ۵ تا ۱۷ درصد و در SSP585 بین ۸ تا ۲۶ درصد کاهش را نسبت به داده‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهند.

صدیق و همکاران [۲۰] مدل‌سازی عددی الگوی جریان در ابعاد مدل فیزیکی رودخانه کارون (محدوده مئاندر جنگیه) را مورد پژوهش قرار دادند. مقایسه نتایج در چارچوب یک مطالعه مدل فیزیکی کج رودخانه کارون در بخش پیچان‌رود جنگیه صورت پذیرفت. محدوده مدل‌سازی شده حداثی ایستگاه اهواز تا فارسیات، به طول ۴۰ کیلومتر بوده که شامل برداشت رقوم سطح آب و سرعت جریان می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، مدل عددی، الگوهای سرعت جریان مشابهی با مدل فیزیکی، با شاخص‌های ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات

استفاده از نرم‌افزار R به شکل متنی تبدیل شدند و سپس به علت اینکه داده‌های بارش مستخرج، دارای واحد  $\text{kg/m}^2 * \text{s}$  بودند، به واحد متریک (میلی‌متر) تبدیل شدند. از آنجایی که مدل‌های ارائه‌شده توسط IPCC به صورت فرمت باینری هستند و به طور مستقیم برای محققان قابل استفاده نمی‌باشند، لازم است با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند GIS، R یا MATLAB، این داده‌ها به فرمت متنی تبدیل شوند. علاوه بر این، برای امکان مقایسه بین داده‌های ایستگاهی و خروجی‌های مدل، تبدیل واحدهای داده‌ها نیز ضروری است. در ادامه به علت بزرگ‌مقیاس بودن داده‌ها بر اساس مختصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار R برش مکانی اعمال گردید. خروجی‌های مدل‌های اقلیمی جهانی، مبتنی بر شبکه‌ای از سلول‌ها هستند که کل کره زمین را پوشش می‌دهند. هنگام مطالعه در یک مکان خاص که تنها بخش محدودی از خروجی مدل را شامل می‌شود، ضروری است با استفاده از ابزارهای نرم‌افزاری مانند R، داده‌های مربوط به مختصات ایستگاه‌های مورد نظر استخراج و گزینش شوند.

در این مطالعه در ابتدا از بین مدل‌های سری CMIP6، آن دسته از مدل‌هایی که دارای داده‌هایی با دوره‌های مشترک تاریخی و با تفکیک مکانی افقی بالا بودند انتخاب شدند؛ برای تعدیل عدم قطعیت در شبیه‌سازی بارش منطقه مورد مطالعه از چهار مدل اقیانوسی - جوی استفاده شد تا قابلیت اطمینان در محاسبات بالا باشد (جدول ۱). بر اساس تحقیقات گسترده در حوزه تغییر اقلیم و مدل‌های گردش عمومی جو، برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی تحت سناریوهای مختلف، ابتدا ضروری است از حداقل سه مدل معتبر در دوره تاریخی استفاده شود. این کار به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها در منطقه مورد مطالعه انجام می‌گیرد. در صورت تأیید دقت مدل‌ها در دوره پایه که معمولاً از طریق مقایسه خروجی‌های مدل با داده‌های ایستگاهی مربوط به پارامتر مورد نظر انجام می‌شود مدل‌هایی که عملکرد مناسبی نشان داده‌اند، با استفاده از شاخص‌ها و روش‌های آماری مانند نمودار تیلور، معیار کلینگ-گوپتا، معیار نش-ساتکلیف، ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین، انتخاب شده و برای پیش‌بینی و برآورد آینده متغیر مورد مطالعه به کار گرفته می‌شوند. داده‌های خام مدل‌های منتخب به علت داشتن فرمت NC، با

جدول ۱. مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد بررسی در این پژوهش

ردیف	مدل	شرکت توسعه‌دهنده	کشور	قدرت تفکیک
۱	MPI-ESM1-2-HR	مرکز داده‌های اقلیمی آلمان	آلمان	۱۰۰ کیلومتر
۲	INM-CM5-0	موسسه ریاضیات عددی، آکادمی علوم روسیه	روسیه	۱۰۰ کیلومتر
۳	BCC-CSM2-MR	مرکز اقلیم پکن	چین	۱۰۰ کیلومتر
۴	EC-EARTH3-CC	اتحادیه‌ای از چندین شرکت تجاری	(۱۲ کشور اروپایی)	۱۰۰ کیلومتر

استفاده است؛ چرا که این ابزار شامل روش‌های متنوعی برای بهبود دقت پارامترهای دما و بارش بوده و برای مدل‌های گزارش ششم IPCC کارایی مناسبی با خطای کم ارائه می‌دهد. در حال حاضر، روش‌های Lars و SDSM در مقیاس‌گاهی مدل‌های گزارش ششم توانایی قابل قبولی ندارند و بروزرسانی آن‌ها تنها برای تعداد محدودی از مدل‌ها انجام شده است. کارایی هر یک از دو روش ریزمقیاس از طریق ترسیم نمودار تیلور تعیین گردید. یکی از منابع اصلی عدم قطعیت در تحلیل‌ها، تنوع روش‌های ریزگردانی است؛

بعد از استخراج برونداد ۴ مدل منتخب، به منظور کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت محاسبات از ۲ روش (Linear Scaling) و (Distribution Mapping) برای کوچک‌مقیاس کردن در محیط نرم‌افزار CMhyd استفاده شد. با توجه به دقت نسبتاً پایین خروجی‌های مدل‌های اقلیمی، افزایش دقت مکانی داده‌ها ضروری است. این امر معمولاً با استفاده از روش‌هایی مانند مقیاس‌گاهی (downscaling) و تصحیح بایاس (bias correction) انجام می‌شود که هر کدام دارای انواع مختلفی هستند. برای این منظور، نرم‌افزار CMhyd قابل

در این منطقه برای این متغیر در این دوره (۳۰ سال) روش مناسبی است؛ اقدام به ارزیابی کارایی مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش منطقه مورد مطالعه گردید. برای انجام مطالعات اقلیمی، دوره‌های پایه و آینده معمولاً به مدت ۳۰ سال در نظر گرفته می‌شوند تا بیشینه همپوشانی زمانی بین داده‌ها فراهم گردد.

## ۲-۲. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها

شبیه‌سازی‌های تاریخی برای ارزیابی دقت مدل‌ها مفید هستند. دوره‌های تاریخی مدل‌ها ابزار مهمی برای تعیین سازگاری و حساسیت مدل‌های اقلیمی نسبت به داده‌های مشاهداتی و کنترل عدم قطعیت این مدل‌ها می‌باشند [۴].

مقایسه برون‌داد خام مدل‌ها و مقیاس‌گامی شده توسط نمودار تیلور و شاخص کلینگ گویتا انجام گرفت. برای تعیین دقت هر یک از چهار مدل این تحقیق در پنج ایستگاه شمال غرب ایران، پس از حذف اریبی، از سنجه کلینگ گویتا استفاده شد. بعد از تعیین مدل‌های برتر هر ایستگاه، برون‌داد خام و ریزمقیاس شده مدل‌های برتر هر ایستگاه با شاخص آماری KGE<sup>۲</sup> (کلینگ - گویتا) (معادله ۱) مورد راستی‌آزمایی قرار گرفت.

شاخص کلینگ - گویتا یک شاخص ترکیبی بوده که قادر است چند شاخص آماری نظیر میانگین، انحراف معیار و همبستگی داده‌ها را با یکدیگر ترکیب کرده و دقت انتخاب مدل‌ها بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی دوره تاریخی را افزایش دهد. به عبارت دیگر، زمانی که از چند شاخص آماری به صورت مجزا در این زمینه استفاده شود، امکان تصمیم‌گیری نهایی بدون بهره‌گیری از شاخص KGE دشوار خواهد بود [۲۴].

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2} \quad (1)$$

در این رابطه  $O_i$  و  $S_i$  به ترتیب مقادیر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش هستند.  $\mu$  میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار و  $r$  ضریب همبستگی پیرسن است [۲۵].

بنابراین، استفاده از چند روش ریزگردانی ضروری است تا با به‌کارگیری شاخص‌ها و آزمون‌های آماری، مناسب‌ترین روش برای مطالعه انتخاب شود.

نمودار تیلور به‌طور هم‌زمان نمایه‌های اریبی، انحراف معیار و جذر میانگین مربعات را در نظر می‌گیرد [۲۱]. در این نمودار داده مشاهده شده به‌عنوان یک نقطه مرجع روی محور افقی مشخص می‌شود و بعد زاویه‌ای نشان‌دهنده همبستگی مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی است، مقادیر انحراف معیار به‌صورت دایره متحدالمرکز نسبت به مرکز دایره و مقادیر RMSE به‌صورت دایره متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع ترسیم می‌شود.

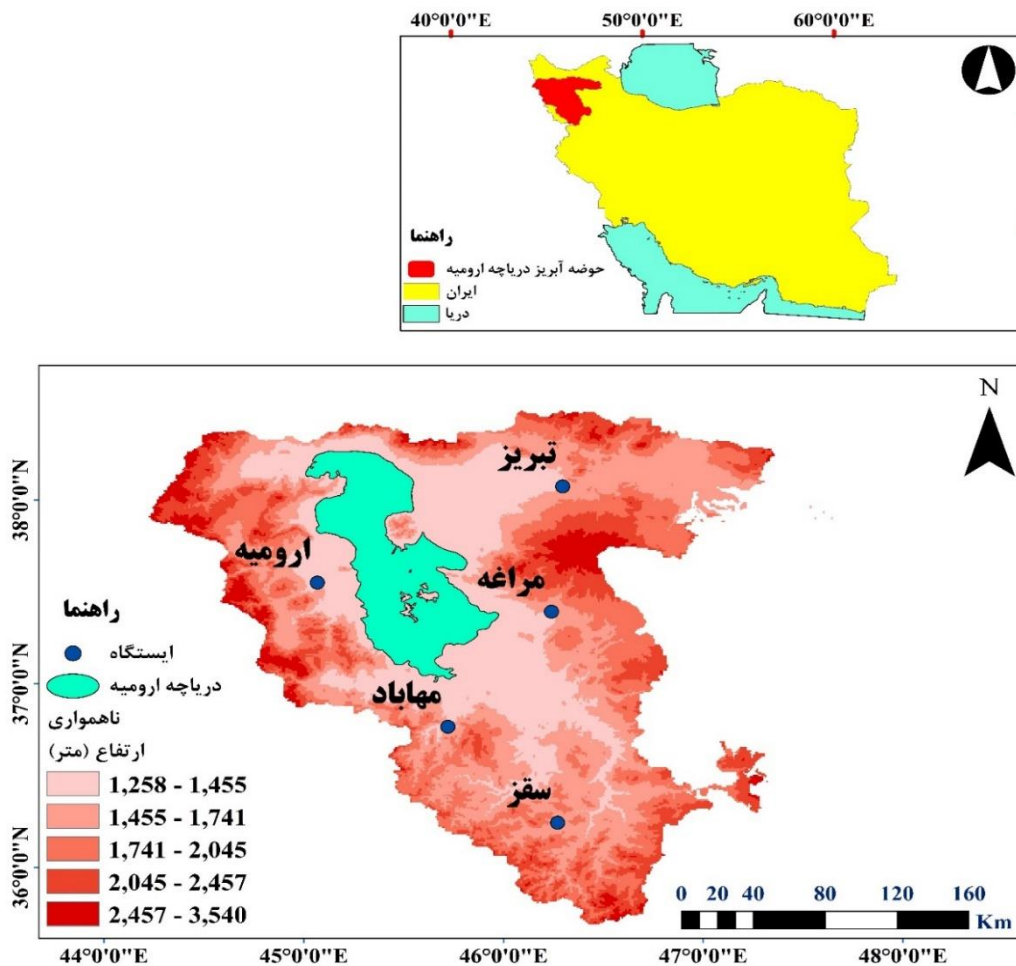
## ۲-۱. مقیاس‌گامی توسط CMhyd

برون‌داد مدل‌های GCM به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن به‌طور مستقیم قابل استفاده نیستند برای رفع مشکل قدرت تفکیک مکانی کم از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌گردد [۲]. جهت مقیاس‌گامی برون‌داد مدل‌های گردش کلی از نرم‌افزار CMhyd استفاده شد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی هیدرولوژی توسط راتجنز و همکاران [۲۲] در دانشگاه پردو آمریکا در محیط پایتون توسعه داده شده است. CMhyd از هشت روش تصحیح اریبی طی فرایندی مجزا برای بارش و دما استفاده می‌کند. از بین هشت روش، پنج روش مختص بارش است. اجرای سریع و امکان انتخاب گزینه‌های مختلف از مزایای این نرم‌افزار است [۱۸]. این نرم‌افزار نیازمند سه نوع داده، شامل داده دیده‌بانی، داده دوره گذشته مدل اقلیمی (هیستوریکال) و داده سناریو (آینده) مدل‌های اقلیمی است. فرایند مقیاس‌گامی در پنج مرحله انجام می‌شود که به ترتیب عبارت‌اند از: ورود متغیرهای دیده‌بانی (به‌صورت متنی)، انتخاب روش تصحیح اریبی، ورود داده‌های مدل در دوره تاریخی و سناریو (به دو صورت متنی یا NetCDF)، پردازش (شامل چک داده‌ها و اجرای مقیاس‌گامی) و مرحله آخر (خروجی نتایج به دو شکل عددی و گراف) [۲۳]. بعد از مقیاس‌گامی با روش منتخب Linear Scaling که با نمودار تیلور صحت‌سنجی شد که در مقایسه با روش نگاشت توزیع

### ۳. موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، حوزه آبریز دریاچه ارومیه است که در شمال غرب ایران، محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۵ تا ۳۸ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴ تا ۴۷ درجه شرقی واقع شده است که شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان می‌شود. در این مطالعه، از میان

ایستگاه‌های واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، ۵ ایستگاه انتخاب شده‌اند. معیار انتخاب، دسترسی به داده‌های کامل و مشترک طی دوره زمانی مورد بررسی بوده است. با وجود اهمیت ایستگاه‌های سراب و تکاب در این حوضه، به دلیل محدودیت داده‌های قابل استفاده در این پژوهش لحاظ نگردیده‌اند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

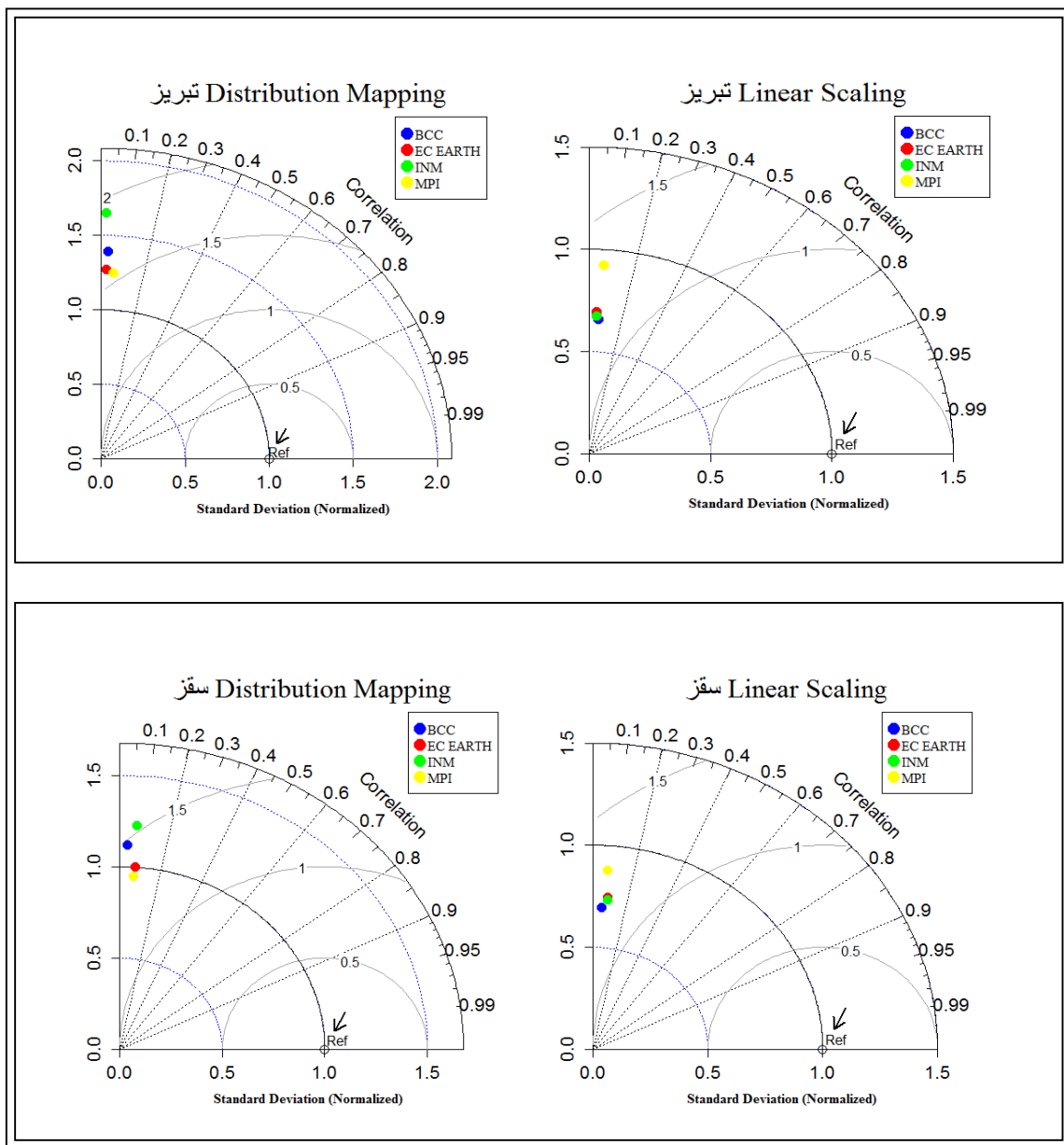
پیرسن، در روش Distribution Mapping در همه مدل‌ها متمایل به صفر است در صورتی که در روش تصحیح اریبی Linear Scaling در اکثر مدل‌ها از صفر فاصله دارد (با توجه به ماهیت نوسانی متغیر بارش و عدم قطعیت بالای این متغیر نمی‌توان انتظار همبستگی چشمگیری داشت، برخلاف پارامتر دما). مقایسه انحراف استاندارد برای دو روش تصحیح بایاس در ایستگاه‌های تبریز و سقز نشان داد که در روش Distribution Mapping، انحراف استاندارد بیشتر از عدد ۱

### ۴. یافته‌ها

با توجه به شکل ۲، نمودار تیلور ایستگاه‌های تبریز و سقز به عنوان نماینده بخش شمالی و جنوبی منطقه مورد مطالعه برای چهار مدل در دوره پایه، بر اساس برون‌داد دو روش Linear Scaling و Distribution Mapping نشان داد که روش Linear Scaling از دقت بالا و خطای کمتری نسبت به روش Distribution Mapping برخوردار است. بر اساس شکل فوق در ایستگاه‌های تبریز و سقز، مقادیر ضریب همبستگی

ایستگاه مقدار ریشه دوم میانگین مربعات خطا کمتر از ۱/۵ و متمایل به عدد یک بوده است. در مجموع هر سه پارامتر نمودار تیلور در ایستگاه‌های تبریز و سقز گویای برتری روش Linear Scaling نسبت به روش Distribution Mapping در مقیاس گاهی برونداد بارش چهار مدل منتخب در منطقه مورد مطالعه در این تحقیق است.

بوده تا جایی که در ایستگاه تبریز به عدد ۱/۵ نیز رسیده است؛ اما در روش Linear Scaling انحراف معیار در همه مدل‌ها بین دو عدد ۰/۵ تا ۱ بوده است. ارزیابی با توجه به ریشه دوم میانگین مربعات خطا نشان داد که در روش Distribution Mapping ایستگاه سقز RMSE حول و حوش مقدار ۱/۵ بوده است ولی در ایستگاه تبریز به مقادیر بالاتر از ۱/۵ نیز رسیده است، در روش Linear Scaling در هر دو



شکل ۲. نمودار تیلور بر اساس روش تصحیح اریبی در ۲ ایستگاه تبریز و سقز در دوره ۳۰ ساله (پایه)

انحراف معیار، ضریب همبستگی پیرسون و ریشه دوم میانگین مربعات خطا و همچنین ارائه نمایش بصری شفاف، امکان

بر اساس ارزیابی انجام گرفته توسط نمودار تیلور (شکل ۲)، از میان ۲ روش تصحیح بایاس، روش Linear Scaling انتخاب شد. نمودار تیلور، با ترکیب سه شاخص کلیدی شامل

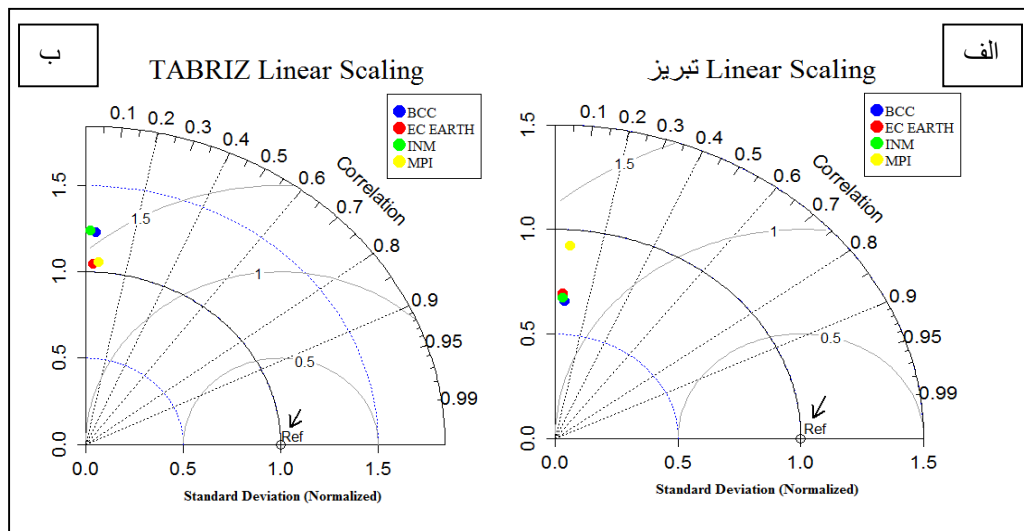
مقایسه‌ای دقیق‌تر و کارآمدتر نسبت به سایر شاخص‌های آماری را فراهم می‌کند. جدول ۲ مشخصات روش مقیاس‌کاهی Linear Scaling را نشان می‌دهد و ریزمقیاس برونداد خام مدل‌ها در این تحقیق با روش فوق در نرم‌افزار CMhyd انجام گردید.

جدول ۲. فرمول مورد استفاده در روش‌های مقیاس‌کاهی نرم‌افزار CMhyd

نام روش	توضیح روش مقیاس‌کاهی	منبع
Linear Scaling	نسبت میانگین ماهانه مقادیر دیدبانی به تاریخی مدل در دوره یکسان به سری داده‌های شبیه‌سازی شده آینده ضرب می‌شود. این روش ترجیحاً برای مقیاس‌کاهی بارش، فشار بخار و تابش استفاده می‌شود.	مندز و همکاران [۲۶]

دوم میانگین مربعات خطا بعد از انجام تصحیح بایاس برای همه مدل‌ها بهبود یافته است (برای جلوگیری از افزایش حجم مقاله مقایسه برای قبل و بعد ریزمقیاس برای یک ایستگاه آورده شده است).

با توجه به شکل ۳ برای ایستگاه تبریز، مقایسه برونداد خام مدل‌ها (ب) با برونداد ریز گردانی شده (الف) نشان داد که عملکرد ریزگردان منتخب مناسب بوده و خروجی خام مدل‌ها دارای خطا هستند و نمی‌توان به‌طور مستقیم از آن‌ها استفاده کرد. مطابق شکل مذکور، انحراف استاندارد و ریشه



شکل ۳. نمودار تیلور با روش Linear Scaling در ایستگاه تبریز در دوره ۳۰ ساله: الف- بعد از کوچک‌مقیاس کردن و ب- قبل از انجام ریز گردانی در ایستگاه مذکور

است). بر اساس محاسبات در هر ایستگاه هواشناسی همدیدی در همه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه مدل MPI بهترین عملکرد را داشته است. همچنین ضعیف‌ترین مدل در منطقه مورد مطالعه مدل BCC بود. چهار مدل مورد مطالعه در این پژوهش برای هر ایستگاه، رتبه‌بندی شدند و بر اساس کارایی که در هر ایستگاه از طریق شاخص کلینگ گوپتا داشت از ۱ تا ۴ قرار گرفتند (جدول ۳). برای انجام رتبه‌بندی مدل‌ها از شاخص مذکور استفاده شد که توانایی ارزیابی هم‌زمان سه فاکتور شامل ضریب همبستگی پیرسون، نسبت میانگین و

بعد از مقیاس‌کاهی، برونداد بارش ۵ ایستگاه هواشناسی همدیدی منتخب در این مطالعه (ایستگاه‌های مورد استفاده از لحاظ پراکندگی جغرافیایی و شرایط توپوگرافی نماینده مناسبی برای منطقه مورد مطالعه به شمار می‌روند) در دوره تاریخی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) توسط ۴ مدل با سنجه KGE راستی آزمایی گردید. (در حال حاضر دوره ۳۰ ساله نزدیک به زمان حال، بر اساس آخرین بروز رسانی IPCC که تمام واداشته‌های مؤثر در تغییر اقلیم را در برگیرد این بازه زمانی

بین ۵ ایستگاه منطقه مورد مطالعه، به ترتیب کارایی مدل‌ها تضعیف شده است (با کاهش ارتفاع ایستگاه، دقت مدل‌ها کاهش را نشان می‌دهند).

احتمال تفاوت عملکرد مدل‌ها در دو ایستگاه مجاور بالا است، چرا که عملکرد مدل‌ها به تفکیک مکانی عمودی و ارتفاع وابسته است.

در جدول ۴ نتایج صحت سنجی مدل برتر ۵ ایستگاه قبل و بعد از ریز گردانی با سنج KGE نشان داده شد. طبق محاسبات، ریز گردانی انجام شده توسط روش Linear Scaling به‌طور مناسبی برونداد مدل‌ها را در همه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه بهینه کرده است و از خطای آن‌ها کاسته شده است. مطابق جدول فوق بیشترین تصحیح توسط مقیاس گاهی انجام شده با روش ذکر شده، بر اساس سنجه آماری کلینگ گویا در ایستگاه مراغه صورت گرفته که از مقدار (۰/۰۴۶-) به مقدار (۰/۰۳۱) ارتقا یافته است و کمترین میزان تصحیح شناسایی شده توسط شاخص KGE در ایستگاه مهاباد بوده که از (۰/۰۵۲) به (۰/۰۶۱) افزایش یافته است. بیشینه و کمینه مقدار شاخص KGE در بین ۵ ایستگاه مورد مطالعه بعد از انجام تصحیح اریبی به ترتیب در ایستگاه‌های تبریز و مراغه به دست آمد.

جدول ۴. مقایسه دقت مدل برتر ۵ ایستگاه منتخب قبل و بعد از ریز گردانی در منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	KGE	
	قبل از ریزمقیاس	بعد از ریزمقیاس
سقز	۰/۰۴۳	۰/۰۵۶
مهاباد	۰/۰۵۲	۰/۰۶۱
ارومیه	۰/۰۱	۰/۰۳۴
تبریز	۰/۰۳	۰/۰۶۳
مراغه	-۰/۰۴۶	۰/۰۳۱

در مباحث تغییر اقلیم برای بررسی اقلیم گذشته و آینده استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو که در حال حاضر مناسب‌ترین ابزار برای پیش‌نگری هستند اجتناب‌ناپذیر است، نکته مهم استفاده از مدل‌های دارای دقت بالا و با تعداد زیاد است تا بتوان عدم قطعیت بالای متغیر بارش را تا حدودی

نسبت ضریب تغییرات را دارد. این شاخص با ارائه خروجی ترکیبی از این سه پارامتر، امکان تعیین رتبه هر مدل با دقت بالا را فراهم می‌کند. بر اساس جدول ۳، عملکرد چهار مدل در منطقه مورد مطالعه در ایستگاه‌های سقز و مهاباد نسبت به بقیه ایستگاه‌ها مناسب‌تر بوده است (مقادیر شاخص کلینگ گویا توسط هر چهار مدل در هر دو ایستگاه مثبت بوده است). در ایستگاه‌های ارومیه و مراغه کارایی مدل‌ها بر اساس مقدار شاخص کلینگ گویا ضعیف بوده است (مقادیر منفی شاخص KGE مؤید این ادعا است). خروجی شاخص کلینگ-گویا هرچه به عدد +۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برتری مدل مورد ارزیابی است، در حالی که مقادیر نزدیک به صفر یا منفی، بیانگر ضعف عملکرد مدل در شبیه‌سازی شرایط واقعی می‌باشد.

جدول ۳. صحت سنجی برونداد ۴ مدل توسط سنج KGE در ۵ ایستگاه منتخب در دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۴)

نام ایستگاه	رتبه مدل‌ها بر اساس شاخص KGE			
	۱	۲	۳	۴
سقز	MPI ۰/۰۵۶	EC EARTH ۰/۰۵۲	INM ۰/۰۴۷	BCC ۰/۰۰۶
مهاباد	MPI ۰/۰۶۱	INM ۰/۰۰۶	EC EARTH ۰/۰۳۲	BCC ۰/۰۰۵
ارومیه	MPI ۰/۰۳۴	EC EARTH -۰/۰۰۵	INM -۰/۰۰۸	BCC -۰/۰۴۶
تبریز	MPI ۰/۰۶۳	BCC ۰/۰۲۳	INM ۰/۰۰۸	EC EARTH -۰/۰۰۳
مراغه	MPI ۰/۰۳۱	INM ۰/۰۲۸	EC EARTH -۰/۰۱۱	BCC -۰/۰۳۲

منطقه مورد مطالعه به دلیل ناهمواری شدید در مقیاس مکانی کوچک (تغییرات ارتفاع)، جزو مناطقی به شمار می‌رود که با توجه به موارد ذکر شده عملکرد مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، در بخش جنوبی حوضه عملکرد دقیق‌تری داشته‌اند؛ همچنین نقش توپوگرافی در عملکرد مدل‌ها به چشم می‌خورد به طوری که در ایستگاه سقز با بالاترین ارتفاع و ایستگاه ارومیه پایین‌ترین ارتفاع (در

### سپاسگزاری

نویسندگان از داوران محترم مقاله که سبب غنای محتوای مقاله شدند سپاسگزاری می‌نمایند.

### مراجع

- [1] Versini P A, Pouget L, McEnnis S, Custodio E, Escaler I. Climate change impact on water resources availability: a case study of the Llobregat River basin (Spain). *Hydrological Sciences Journal*. 2016; 61(14): 2496-2508. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1154556>
- [2] Fallah-Ghalhari G, Shakeri F, and Dadashi-Roudbari A. Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 2019; 138: 1539-1562. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-019-02906-9>
- [3] Kim J H, Sung J H, Chung E S, Kim S U, Son M, and Shiru M S. Comparison of Projection in Meteorological and Hydrological Droughts in the Cheongmicheon Watershed for RCP4. 5 and SSP2-4.5. *Sustainability*. 2021; 13(4):2066 <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2066#>
- [4] Eyring V, Bony S, Meehl G A, Senior C A, Stevens B, Stouffer R J, and Taylor K E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*. 2016; 9(5): 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- [5] Stouffer R J, Eyring V, Meehl G A, Bony S, Senior C, Stevens B, and Taylor K E. CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017; 98(1): 95-105. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00013.1>
- [6] Liu L Y, Wang X J, Gou X H, Yang M X, and Zhang Z H. Projections of surface air temperature and precipitation in the 21st century in the Qilian Mountains. Northwest China, using REMO in the CORDEX. *Advances in Climate Change Research*. 2022; 13(3): 344-358. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2022.03.003>
- [7] Zhao T, Bennett J C, Wang Q J, Schepen A, Wood A W, Robertson D E, and Ramos M H. How suitable is quantile mapping for postprocessing GCM precipitation forecasts?.

کاهش داد و محاسبات با خطای کم که قابل اعتماد هستند انجام داد.

### ۵. نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه ارزیابی دقت مدل‌های گزارش ۶ IPCC برای شبیه‌سازی بارش بر اساس سنجه آماری کلینگ گوتنا (KGE) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در ایران در دوره تاریخی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) با استفاده از ۴ مدل GCM ارائه شده در گزارش ششم IPCC در ۵ ایستگاه هواشناسی همدیدی بر اساس ریز گردانی آماری با نرم‌افزار CMhyd با روش Linear Scaling نشان داد که مدل برتر در منطقه مورد مطالعه برای شبیه‌سازی بارش مدل MPI است و ضعیف‌ترین مدل در ارزیابی بارش منطقه مورد مطالعه مدل BCC است. از طرفی نتایج حاکی از آن بود که روش ریز گردانی Linear Scaling بر اساس راستی آزمایی انجام شده از روش ریز گردانی دیگر این مطالعه (Distribution mapping) قابلیت بهتری داشته است و همچنین نتایج ارزیابی با سنجه KGE برای مقادیر برون‌داد خام و کوچک‌مقیاس شده همه ایستگاه‌ها نشان از عملکرد مناسب این روش ریز گردان است. بر اساس مطالعه انجام شده نقش توپوگرافی (ناهمواری) در عملکرد مدل‌ها مشهود است به طوری که در ایستگاه سقز با بالاترین ارتفاع و ایستگاه ارومیه پایین‌ترین ارتفاع (در بین ۵ ایستگاه منطقه مورد مطالعه)، به ترتیب کارایی مدل‌ها تضعیف شده است (با کاهش ارتفاع ایستگاه، دقت مدل‌ها کاهش را نشان داد). با توجه به مطالعه صورت گرفته، نقش ارزیابی دقت مدل‌ها حائز اهمیت است و با توجه به حساسیت مکانی مدل‌های اقلیمی و تأثیرپذیری از توپوگرافی و اقلیم محلی ایستگاه‌های مورد مطالعه؛ نمی‌توان به معیار تفکیک افقی بالای مدل بسنده کرد. نتایج مطالعه حاضر با نتایج پژوهش انجام شده توسط عبدالعلی‌زاده و همکاران [۱۵] و بابائیان و همکاران [۲۳] مبنی بر پایین بودن دقت خروجی مدل‌های GCM و لزوم مقیاس‌کاهی و تصحیح اریبی برون‌داد مدل‌ها مطابقت دارد.

- [۱۵] عبدالعلی زاده فیروز، محمدخورشید دوست علی، جهانبخش اصل سعید. ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 برای شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی. ۱۴۰۱؛ ۳(۱۱): ۱۷-۳۰.
- [doi: 10.30488/ccr.2022.361233.1093](https://doi.org/10.30488/ccr.2022.361233.1093)
- [۱۶] انصاری مهابادی ثمین، دهبان حسین، زارعیان محمدجواد، فرخ نیا اشکان. بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6. پژوهش آب ایران. ۱۴۰۱؛ ۱۶(۱): ۱۱-۲۴.
- [doi: 10.22034/iwrj.2022.11204](https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204)
- [۱۷] بازبان سعید، عمادی سید روح اله. ارزیابی منابع آب‌های زیرزمینی غرب ایران با استفاده از مشاهدات ماهواره‌های GRACE و GRACE-FO از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱. هیدروفیزیک. ۱۴۰۲؛ ۹(۲): ۸۱-۸۸.
- <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24767131.1402.9.2.7.4>
- [۱۸] بابائیان ایمان، مدیریان راهله، خزانه‌داری لیلی، کریمیان مریم، کوزه‌گران سعیده، کوهی منصوره، فلامرزی یاشار، ملبوسی شراره. چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس گاهی آماری برونداد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd. فیزیک زمین و فضا. ۱۴۰۲؛ ۴۹(۲): ۴۳۱-۴۴۹.
- [doi: 10.22059/jesphys.2023.332410.1007436](https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.332410.1007436)
- [۱۹] جوان خدیجه، عزیززاده محمدرضا. ارزیابی روش‌های مختلف تصحیح اریبی بر پیش‌نگری بارش مدل GFDL-ESM4 در حوضه دریاچه ارومیه. جغرافیا و برنامه‌ریزی. ۱۴۰۳؛ ۲۸(۸۸): ۴۱۵-۳۹۷.
- [doi: 10.22034/gp.2023.56731.3140](https://doi.org/10.22034/gp.2023.56731.3140)
- [۲۰] صدیق علیرضا، قمشی مهدی، زایری محمدرضا. مدل‌سازی عددی الگوی جریان در ابعاد مدل فیزیکی رودخانه کارون محدوده مئاندر جنگیه. هیدروفیزیک. ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱): ۸۳-۹۸.
- <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24767131.1403.10.1.7.9>
- [21] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of geophysical research: atmospheres. 2001; Journal of Climate. 2017; 30(9): 3185-3196.
- <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0652.1>
- [8] Ferreira R N, Nissenbaum M R, Rickenbach TH.M. Climate change effects on summertime precipitation organization in the Southeast United States. Atmospheric Research. 2018; 214: 348- 63.
- <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.012>.
- [9] Almazroui M, Saeed F, Saeed S, Islam M N, Ismail M, Klutse, N A B, and Siddiqui M H. Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. Earth Systems and Environment. 2020; 4: 455-475.
- <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00161-x>
- [10] Zhang X, Hua L, and Jiang D. Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang, China. Atmospheric and Oceanic Science Letters. 2022; 15(2): 100128.
- <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100128>
- [11] Azad N, and Ahmadi A. Assessment of CMIP6 models and multi-model averaging for temperature and precipitation over Iran. Scientific Reports. 2024; 14(1): 24165.
- <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74789-4>
- [12] Tiku T W, Tarekegn G B, Sahlu D, Teshebo G B, Enyew F B, Umer Y, and Debele S E. Evaluating CMIP6 Precipitation Simulations Across Different Rainfall Regimes in the Amhara Region, Ethiopia. Natural Hazards Research. 2025;
- <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2025.03.002>
- [13] Sharifan F, Ramezani Y, Amirabadizadeh M, and De Michele C. Evaluating the impact of climate change on precipitation in the future period using CMIP6 models (case study: Siminehrood River Basin, Iran). Acta Geophysica. 2025; 73(5): 1-16.
- <https://doi.org/10.1007/s11600-025-01612-7>
- [۱۴] نعیمی میترا، عزیزی زهرا، مرتضوی محمدصدیق، محبی نوذر سیده لیلی، عظام مجتبی. مقایسه مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی مبتنی بر یادگیری ماشین برای برآورد میزان کلروفیل آ در سواحل قشم و هرمز. هیدروفیزیک. ۱۴۰۱؛ ۸(۲): ۱۳۱-۱۴۳.
- <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24767131.1401.8.2.3.3>

106 (D7): 7183-92.

<https://doi.org/10.1029/2000JD900719>

[22] Rathjens H, Bieger K, Srinivasan R, Chaubey I, and Arnold J G. (2016). CMhyd User Manual: Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies. Texas: SWAT.

[۲۳] بابائیان ایمان، مدیریان راهله، خزانهداری لیلی، کوهی منصوره، کوزه گران سعیده، فلامرزی یاشار، کریمیان مریم، ملبوسی شراره. پیش‌نگری بارش کشور با استفاده از مقیاس گاهی آماری برون‌داد مدل‌های CMIP6. مشهد: پژوهشکده اقلیم‌شناسی؛ ۱۴۰۰.

[24] Knoben W J, Freer J E, and Woods R A. Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019; 23(10): 4323-4331  
<https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>

[۲۵] زارعیان محمدجواد. اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش علوم CMIP6 استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های آب و خاک. ۱۴۰۱؛ ۲۶ (۲): ۹۱-۱۰۵.  
<http://dx.doi.org/10.47176/jwss.26.2.31501>

[26] Mendez M, Maathuis B, Hein-Griggs D, and Alvarado-Gamboa L F. Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. *Water*. 2020; 12(2): 482. <https://doi.org/10.3390/w12020482>

#### پی‌نوشت‌ها

1. Climate Model data for Hydrologic modeling
2. Network Common Data Form
3. Kling Gupta Efficiency