



## Evaluation of the Accuracy of CMIP6 Models in Estimating the Temperature and Precipitation of Iran Based on a Network Analysis

Mohammad Javad Zareian<sup>1</sup>✉ | Hossein Dehban<sup>2</sup> | Alireza Gohari<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: [m.zareian@wri.ac.ir](mailto:m.zareian@wri.ac.ir)
2. Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: [dehbanh@gmail.com](mailto:dehbanh@gmail.com)
3. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: [ar.gohari@cc.iut.ac.ir](mailto:ar.gohari@cc.iut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

### Article history:

Received: 20 July 2022  
Received in revised form:  
18 August 2022  
Accepted: 18 September 2022  
Published online:  
25 December 2022

### Keywords:

Climate change,  
General Circulation Models,  
Iran,  
Network analysis,  
Reanalysis.

### ABSTRACT

Climate change is one of the most important factors affecting the world's climate. Due to the importance of estimating these effects, it is necessary to use appropriate tools and models to estimate the effects of climate change on climatic variables (especially temperature and precipitation). For this purpose, the use of Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) as the most common of these tools, has found a lot of use in studies related to climate change. In this regard, the aim of this study was to evaluate the accuracy of the latest AOGCMs related to the sixth IPCC assessment report of IPCC in in different regions of Iran. For this purpose, the historical outputs of 10 AOGCMs in the period 1980 to 2014 were extracted from the IPCC database and compared with the ERA5 reanalysis data of the ECMWF center. This comparison was based on RMSE, Pearson correlation coefficient and Kling-Gupta combined index (KGE). The results showed that different models do not have the same accuracy in estimating the temperature and precipitation of Iran in different months of the year. The variability of the model errors in precipitation estimation were more than the variability of these errors in temperature estimation. On the annual scale, the results showed that the IPSL-CM6A-LR model had the best performance in estimating temperature and the HadGEM3-GC31-LL model had the best performance in estimating annual precipitation. Also, the results showed that the error rate of these models was lower in central and eastern regions of Iran than the other regions.

**Cite this article:** Zareian, M. J., Dehban, H., & Gohari, R. A. (2022). Evaluation of the Accuracy of CMIP6 Models in Estimating the Temperature and Precipitation of Iran Based on a Network Analysis. *Journal of Water and Irrigation Management*, 12 (4), 783-797. DOI: <http://doi.org/10.22059/jwim.2022.345975.1006>





## ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش ایران بر اساس تحلیل شبکه‌ای

محمد جواد زارعیان<sup>۱</sup> | حسین دهبان<sup>۲</sup> | علیرضا گوهری<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: [m.zareian@wri.ac.ir](mailto:m.zareian@wri.ac.ir)

۲. پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: [dehbanh@gmail.com](mailto:dehbanh@gmail.com)

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: [ar.gohari@cc.iut.ac.ir](mailto:ar.gohari@cc.iut.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

### کلیدواژه‌ها:

ایران،

تحلیل شبکه‌ای،

تغییر اقلیم،

مدل‌های گردش عمومی جو.

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر وضعیت آب‌وهوای جهان اثرگذار بوده است. به دلیل اهمیت برآورد این اثرات، ضروری است از ابزار و مدل‌های مناسب برای تخمین اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی (به‌ویژه دما و بارندگی) استفاده شود. بدین منظور استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو- اقیانوس (AOGCMs) به‌عنوان رایج‌ترین این ابزارها، کاربرد فراوانی در مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم پیدا نموده است. در این راستا، هدف این مطالعه منظور ارزیابی دقت جدیدترین مدل‌های AOGCM مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC در نواحی مختلف ایران بوده است. بدین منظور، خروجی تاریخی مربوط به ۱۰ مدل AOGCM در دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ از پایگاه IPCC استخراج شد و با داده‌های بازتحلیل ERA5 مربوط به مرکز ECMWF مقایسه شد. این مقایسه براساس شاخص‌های RMSE، ضریب همبستگی پیرسون و شاخص ترکیبی کلینگ-گوپتا (KGE) صورت گرفت. نتایج نشان دادند که مدل‌های مختلف در ماه‌های متفاوت سال، دقت یکسانی در برآورد دما و بارش کشور دارا نیستند. تغییرپذیری خطای مدل‌ها در برآورد بارش، بیش‌تر از تغییرپذیری این خطاها در برآورد دما بود. در مقیاس سالانه نیز نتایج نشان دادند که مدل IPSL-CM6A-LR بهترین عملکرد را در برآورد دما و مدل HadGEM3-GC31-LL بهترین عملکرد را در برآورد بارش سالانه دارا بودند. همچنین نتایج نشان داد که میزان خطای این مدل‌ها در نواحی مرکزی و شرقی ایران، کم‌تر از سایر نواحی بود.

**استناد:** زارعیان، م. ج، دهبان، ح. و گوهری، ع. ر (۱۴۰۱). ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش ایران بر اساس تحلیل شبکه‌ای. نشریه

مدیریت آب و آبیاری، ۱۲ (۴)، ۷۸۳-۷۹۷. DOI: <http://doi.org/10.22059/jwim.2022.345975.1006>



## ۱. مقدمه

تغییر اقلیم<sup>۱</sup> پدیده‌ای است که به‌طور عمده در اثر تغییر در غلظت گازهای گلخانه‌ای موجود در جو زمین ایجاد شده و در طی چند دهه اخیر منجر به تأثیرات قابل توجه بر اقلیم زمین شده است (Goyal, 2004; Werndl, 2016). از جمله مهم‌ترین تأثیرات تغییر اقلیم بر وضعیت آب و هوایی کره زمین می‌توان به تأثیر این پدیده بر دما و بارندگی نواحی مختلف در سطح جهان اشاره نمود (Solomon *et al.*, 2007). علاوه بر این، تغییر اقلیم باعث شده است که سایر فرایندهای آب و هواشناسی نظیر مقادیر حدی بارش و سیلاب، طوفان‌ها، خشکسالی و ترسالی‌ها و نیاز آبی گیاهان نیز به‌صورت‌های مختلفی تحت تأثیر قرار گیرد (Woolf and Wolf, 2013; Mal *et al.*, 2018).

مجموعه اثراتی که تغییر اقلیم بر وضعیت آب و هوایی کره زمین بر جای گذاشته است، موجب شده تا مدیریت عرضه و تقاضای آب تحت اثر تغییر اقلیم نیز با چالش‌های جدی مواجه شود. افزایش جمعیت در نواحی مختلف دنیا به همراه تغییر در سبک زندگی از یک طرف و کاهش دسترسی به منابع آب کافی از طرف دیگر، منجر به برهم‌خوردن تعادل در عرضه و تقاضای آب شده و دیدگاه‌های مربوط به مدیریت منابع آب در بسیاری از نواحی دنیا را تحت تأثیر قرار داده است. در این شرایط توجه به رویکردهای سازگاری با تغییر اقلیم در بخش‌های مختلف مصرف آب، اهمیت دوچندانی پیدا نموده است (Dagbegnon *et al.*, 2016; Ghalehsard *et al.*, 2021; Zareian, 2021).

به‌دلیل طبیعت خشک و کم‌آب اغلب نواحی ایران، اثر تغییر اقلیم بر وضعیت دما و بارش کشور ما اثر فزاینده‌ای بر چالش‌های آبی در کشور به‌جا گذاشته است. در هر حاضر وضعیت بارش‌های ایران چندان مطلوب نبوده و موجب بروز نگرانی‌هایی در خصوص تأمین آب جمعیت رو به رشد کشور شده است (Okhravi *et al.*, 2014; Eslamian *et al.*, 2017). بیلان منفی سفره‌های آب زیرزمینی نیز موجب شده است تا منبع قابل اتکای دیگری نیز برای جایگزینی منابع آب سطحی جهت تأمین نیازهای روزافزون آبی در ایران وجود نداشته باشد. بنابراین کشور ایران در حال حاضر با چالش‌های متعددی در زمینه منابع آب مواجه است. وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی باعث گردیده است که ضمن کم‌شدن بارش در سالیان اخیر، پتانسیل منابع آب سطحی و زیرزمینی کشور نیز دچار آسیب شده و موجب شده است تا تأمین نیازهای روزافزون آبی در ایران، با مشکلات عدیده‌ای همراه شود (Ashraf *et al.*, 2021; Okhravi *et al.*, 2019). این در حالی است که بررسی‌های نشان می‌دهد که تغییر اقلیم در کشورهای مناطق خشک و نیمه‌خشک قاره آسیا اثرات منفی را بر روی منابع آب به‌همراه خواهد داشت. ایران نیز با اقلیمی خشک از این قاعده مستثنی نمی‌باشد و بر مبنای پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته از وضعیت اقلیم، تغییر در دما، رطوبت خاک و رواناب رودخانه‌ها از آثار مهم تغییر اقلیم در این ناحیه خواهد بود (IPCC, 2013; Gohari and Zareian, 2017). در چنین شرایطی تغییر اقلیم به‌عنوان یک عامل تشدیدکننده برای این شرایط، ممکن است موجب پیچیدگی مدیریت عرضه و تقاضای آب در دورنمای کشور شود.

اصلی‌ترین ابزاری که در حال حاضر برای پایش اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت آب و هوای آینده کره زمین وجود دارد، مدل‌های جفت‌شده گردش عمومی جوی- اقیانوس (AOGCM)<sup>۲</sup> می‌باشد که توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)<sup>۳</sup> ارائه می‌شوند. در این مدل‌ها، روابط توصیف‌کننده رفتار جو بر مبنای شبکه‌ای سه‌بعدی که نشان‌دهنده سطح افقی کره زمین و ارتفاع عمودی جو است، حل می‌شوند. به‌عبارتی مدل‌های AOGCM، حل معادلات حاکم بر جو، براساس قوانین نیوتن و ترمودینامیک هستند، به‌طوری‌که قوانین نیوتن در سه محور  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  به‌همراه قوانین عمومی گازها و ترمودینامیک، اساس این مدل‌ها را تشکیل می‌دهند. در این مدل‌ها هر یک از اجزای اقلیم کره زمین در شبکه‌های سه‌بعدی حل می‌شوند و سپس تمام مدل‌های وابسته به جو و اقیانوس با هم جفت شده و مدل‌های AOGCM را تشکیل می‌دهند (IPCC, 2013).

در این راستا هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در ششمین دوره فعالیت خود (۲۰۲۲-۲۰۱۶)، تهیه گزارش ششم جامع ارزیابی تغییر اقلیم AR6 را در دستور کار خود قرار داده است. مجموع این تلاش‌ها منجر به شکل‌گیری مدل‌های CMIP6<sup>۴</sup> در گزارش ششم IPCC شد (Tebaldi *et al.*, 2021). بنابراین مدل‌های CMIP6 در حال حاضر به‌روزترین ابزار برای تحلیل تغییرات اقلیم در دوره آتی می‌باشند. به دلیل عدم قطعیت‌های مدل‌های مورد اشاره، استفاده از این مدل‌ها در نواحی مختلف جهان (از جمله ایران) باید با بررسی میزان دقت این مدل‌ها براساس مقایسه خروجی این مدل‌ها در دوره گذشته با داده‌های تاریخی صورت پذیرد. به عبارت دیگر، لازم است تا دقت مدل‌های AOGCM مختلف قبل از به‌کارگیری در هر محل ارزیابی شده و این ارزیابی مبنای استفاده از یک مدل منفرد یا ترکیبی از مدل‌های مورد اشاره قرار گیرد.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه بررسی میزان دقت مدل‌های AOGCM در برآورد بارش و دمای نواحی مختلف جهان صورت پذیرفته است. از مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه، بررسی اثر روش وزن‌دهی مدل‌های اقلیمی برای مطالعات هیدرولوژیکی توسط Chen *et al.* (2017) می‌باشد. در این پژوهش پنج روش برای وزن‌دهی ۲۸ مدل AOGCM از سری مدل‌های CMIP5 مورد استفاده قرار گرفت و جریان سطحی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی برای دوره ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ و ۲۰۶۱ تا ۲۰۹۰ برای زیرحوضه‌ای در کشور کانادا محاسبه شد. نتایج تحلیل اثرات وزن‌دهی مختلف در میانگین و عدم قطعیت گروهی نتایج نشان داد که ترکیب مدل‌های AOGCM می‌تواند دقت پیش‌بینی‌های آتی تغییر اقلیم را افزایش دهد. از دیگر مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه، ارزیابی عملکرد ۲۰ مدل مختلف اقلیم جهانی از سری مدل‌های (CMIP5) بر مبنای توانایی این مدل‌ها در شبیه‌سازی میانگین سالانه، باد موسمی و بارش‌های زمستان در دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ بود. در این مطالعه بارش از طریق ادغام بارش شبیه‌سازی شده مدل‌های AOGCM انتخابی با استفاده از میانگین ساده و رگرسیون جنگل تصادفی (RF)<sup>۵</sup> تولید شد. نتایج بیانگر عملکرد بهتر ترکیب چند مدل با استفاده از رگرسیون جنگل تصادفی نسبت به میانگین ساده بود (Ahmed *et al.*, 2019).

نتایج مطالعات صورت‌گرفته در زمینه بررسی دقت مدل‌های AOGCM بر مبنای گزارش چهارم IPCC (AR4) در برآورد دما و بارش حوضه زاینده‌رود نشان داده است که مدل‌های مختلف دارای دقت متفاوت در برآورد دما و بارش منطقه مطالعاتی بوده‌اند، به نحوی که مدل NCARCCSM3 و CGCM2.3.2a به ترتیب بیش‌تری دقت را در برآورد دما و بارش منطقه مطالعاتی دارا بودند (Zareian *et al.*, 2015). نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته توسط Ansari *et al.* (2022) به منظور ارزیابی دقت ۱۰ مدل CMIP6 براساس داده‌های مشاهده‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی ایران نشان داد که مدل‌های BCC-CSM2-MR و HadGEM3-GC31-LL به ترتیب دقت مناسب‌تری در میان مدل‌های مورد بررسی جهت تصویرسازی دما و بارش منطقه مطالعاتی دارا بوده‌اند. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان داد که میانگین بارش کشور در نواحی مختلف طی دو دهه آتی ممکن است بین ۱۹+ تا ۱۲- درصد و دما نیز بین ۰/۱ تا ۰/۶ درجه سانتی‌گراد تغییر پیدا نماید.

مطالعات مختلفی در کشور در خصوص ارزیابی دقت پایگاه‌های داده‌های بارش ماهواره‌ای به‌ویژه Era5 نیز صورت گرفته است. Hoseeni *et al.* (2022) دقت داده‌های Era5 را در برآورد دما و بارش استان مرکزی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقادیر ضریب همبستگی مقادیر مشاهده‌شده و داده‌های بازتحلیل Era5 در اکثر مناطق بالای ۰/۵ و خطا در ۷۰ درصد مناطق بسیار کم و خطای اریبی نیز در بیش‌تر مناطق مقدار مثبت و کمی بوده است. در پژوهشی دیگر دقت داده‌های Era5 برای برآورد بارش روزانه و ماهانه در سطح استان اردبیل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در مقیاس روزانه در اکثر سلول‌های مورد بررسی، ضریب همبستگی برای بارش Era5 بیش‌تر از ۰/۷۵ و مقدار

RMSE نیز کم‌تر از سه میلی‌متر بود. در مقیاس ماهانه نیز ضریب همبستگی بیش‌تر از ۰/۸ و شاخص RMSE کم‌تر از ۲۰ میلی‌متر به‌دست آمد (Azizi et al., 2021).

با توجه به این‌که مدل‌های CMIP6 جدیدترین مدل‌های گردش عمومی جو در دسترس می‌باشند، ضروری است دقت این مدل‌ها قبل از به‌کارگیری در مطالعات مختلف مربوط به تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به مقیاس‌های شبکه‌ای خروجی این مدل‌ها، ارزیابی دقت این مدل‌ها براساس معیار مقایسه شبکه‌ای (پیکسل به پیکسل) می‌تواند جوابگوی نیازهای مهمی برای مطالعات آتی تغییر اقلیم در کشور باشد. بر این اساس استفاده از داده‌های مشاهده‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی به‌دلیل تراکم پایین این ایستگاه‌ها در برخی از نواحی کشور، ممکن است جوابگوی این موضوع نباشد. به این دلیل در این مطالعه سعی شده است تا براساس یک ایده نوآورانه، داده‌های مربوط به خروجی این مدل‌ها در دوره گذشته به‌صورت شبکه‌ای با داده‌های بارش و دمای ماهواره‌ای مدل ERA5 از پایگاه ECMWF مقایسه شده و براساس معیارهای آماری مختلف، دقت این مدل‌ها در پهنه ایران به‌صورت شبکه‌بندی شده ارائه شود. با این وجود، به‌دلیل محدودیت‌هایی که در دسترسی به خروجی تمام مدل‌های گزارش ششم IPCC در زمان تهیه این مقاله وجود داشت، استفاده از خروجی تمامی این مدل‌ها ممکن نبود و در این مقاله از خروجی ۱۰ مدل AOGCM استفاده شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

محدوده موردبررسی در این مطالعه، پهنه کل کشور ایران می‌باشد. در این مطالعه در ابتدا داده‌های ۱۰ مدل AOGCM مربوط به گزارش ششم IPCC، از پایگاه داده‌های رسمی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم استخراج شد. ویژگی‌های این مدل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جو (ECMWF)<sup>۶</sup> یکی دیگر از مراکز بازتحلیل<sup>۷</sup> داده‌های هواشناسی به‌شمار می‌آید. این مرکز برای نخستین بار داده‌های شبکه‌ای جو را طی یک دوره ۱۵ ساله با عنوان Era15 فراهم کرد. دومین سری داده‌های بازتحلیل این مرکز با نام (Era40) با بهره‌مندی از داده‌های ماهواره‌ای تهیه شد (Uppala et al., 2005). داده‌های Era40 از نظر دقت مکانی و ارتفاعی به مراتب بهتر از داده‌های سری قبل بود. با توجه به بازخورد داده‌های قبلی، مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جو توانست نسل پیشرفته‌تری از نسخه‌های قبلی را منتشر نماید و به‌تازگی ECMWF داده‌های بازتحلیل جدیدی را با نام Era5 منتشر نموده است که این داده‌ها از تلفیق داده‌های دیده‌بانی با داده‌های مدل‌های عددی به‌دست آمده است. تفکیک مکانی این داده‌های ۰/۲۵ درجه بوده و داده‌های مربوطه (از جمله دما و بارندگی) در مقیاس زمانی ساعتی تا ماهانه در دسترس می‌باشند (Hersbach et al., 2020).

Table 1. Characteristics of selected AOGCM models used in this study

Model	Resolution	Developer
BCC-CSM2-MR	1.12°×1.12°	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
CESM2	1.25°×0.94°	Community Earth System Model Contributors
CNRM-CM6-1	0.50°×0.50°	Centre National de Recherches Météorologiques Scientifique
MIROC6	1.40°×1.40°	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo
MRI-EMS2-0	1.12°×1.12°	Meteorological Research Institute
IPSL-CM6A-LR	2.50°×1.27°	Institute Pierre-Simon Laplace
CAMS-CSM1-0	1.12°×1.12°	Chinese Academy of Meteorological Sciences, China
CMCC-ESM2	1.25°×0.94°	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
GFDL-ESM4	1.25°×1.00°	NOAA-Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
HadGEM3-GC31-LL	1.88°×1.25°	Meteorological Office Hadley Centre

از آنجاکه تراکم مناسب داده‌های مشاهده‌شده در سراسر پهنه کشور در دسترس نبوده و برخی از نواحی مورد بررسی فاقد ایستگاه‌های هواشناسی پایش داده‌های هواشناسی بودند، لذا در این پژوهش جهت ایجاد امکان تحلیل منطقه‌ای دقت مدل‌های AOGCM، داده‌های پایگاه Era5 به‌عنوان مبنای داده‌های مشاهداتی دما و بارش در نظر گرفته شدند و اطلاعات مربوط به دما و بارش ماهانه در دوره تاریخی (دوره سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴) از پایگاه مربوطه برای تمامی پهنه مطالعاتی، استخراج شد. در این پژوهش از دو طیف داده‌های تاریخی و داده‌های آینده دما و بارش استفاده شده و این داده‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل روند مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

اطلاعات مربوط به مدل‌ها AOGGCM شامل دو بخش اصلی اطلاعات تاریخی و اطلاعات مربوط به دوره آینده می‌باشند. اطلاعات تاریخی ارائه‌شده براساس این مدل‌ها را می‌توان به‌عنوان مبنایی جهت ارزیابی دقت آن‌ها مورد استفاده قرار داد. بر این اساس اطلاعات مربوط به خروجی این مدل‌ها در دوره تاریخی را می‌توان با داده‌های مبنای دوره تاریخی مورد مقایسه قرار داد تا براساس آن میزان دقت هر کدام از مدل‌ها مشخص شده و در نهایت بتوان از یک مدل واحد یا ترکیبی از این مدل‌ها جهت پیش‌بینی دما و بارش در دوره آتی استفاده نمود. مبنای برآورد دقت این مدل‌ها نیز مقایسه خروجی آن‌ها در دوره تاریخی با داده‌های باز تحلیل‌شده مدل Era5 منظور شد.

برای سنجش میزان دقت مدل‌های AOGCM مورد استفاده در این پژوهش، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربع خطاها<sup>۱</sup> (RMSE)، ضریب همبستگی پیرسون<sup>۲</sup> (Co) و شاخص ترکیبی کلینگ-گوپتا<sup>۱۱</sup> (KGE) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Co = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(Co - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در این روابط،  $O_i$  و  $S_i$  به‌ترتیب مقادیر داده‌های تاریخی بارش یا دمای مدل Era5 و مدل‌های AOGCM؛  $\bar{S}$  و  $\mu_s$  به‌ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌های تاریخی بارش یا دمای مدل Era5 و مدل‌های AOGCM؛  $\bar{O}$  و  $\mu_o$  به‌ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌های تاریخی بارش یا دمای مدل Era5 و مدل‌های AOGCM؛  $Co$  ضریب همبستگی پیرسون؛  $\sigma_s$  و  $\sigma_o$  به‌ترتیب انحراف معیار داده‌های تاریخی بارش یا دمای مدل Era5 و مدل‌های AOGCM و KGE شاخص ترکیبی KGE می‌باشند (Knoben et al., 2019). مقدار این شاخص بین  $-\infty$  تا یک متغیر بوده و هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، تطابق بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده نیز بیش‌تر خواهد بود (Patil and Stieglitz, 2015).

به‌دلیل حجم زیاد محاسبات و لزوم انجام این محاسبات در پهنه وسیعی از کشورهای مورد بررسی به‌صورت مقایسات پیکسلی، کدهای مربوطه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R و در محیط Rstudio تهیه شد و ارزیابی دقت مدل‌ها به‌صورت ماهانه و به‌صورت پهنه‌بندی‌شده ارائه شد.

### ۳. نتایج و بحث

شکل (۱) نتایج ارزیابی مدل‌های مختلف را برای برآورد دما در دوره تاریخی براساس شاخص RMSE نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار شاخص RMSE در ماه‌ها و برای مدل‌های مختلف، بین ۱/۹۵ تا ۱۲/۰۸ نوسان داشته است. کم‌ترین این مقدار مربوط به مدل GFDL-ESM4 بوده است که در ماه آگوست رخ داده است. بیش‌ترین مقدار شاخص RMSE نیز برای مدل MIROC6 و در ماه جولای مشاهده می‌شود. در حالت کلی میزان خطای مدل‌های مختلف در برآورد دما در ماه‌های گرم سال بیش‌تر از ماه‌های سرد آن بوده است.

نتایج مربوط به ارزیابی دقت مدل‌های مختلف در برآورد بارش نیز در شکل (۲) ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار شاخص RMSE برای ارزیابی دقت مدل‌های مدنظر، بین ۶/۹ تا ۸۵/۳ تغییر خواهد نمود. بدین لحاظ کم‌ترین این مقدار در ماه جولای و برای مدل GFDL-ESM4 ملاحظه شده است. بیش‌ترین مقدار شاخص RMSE نیز در ماه ژانویه و در مدل CNRM-CM6-1 مشاهده شده است. بر این اساس در ماه‌های پربارش‌تر سال، مقدار خطای مدل‌ها براساس شاخص RMSE بیش‌تر از ماه‌های گرم و خشک سال خواهد بود.

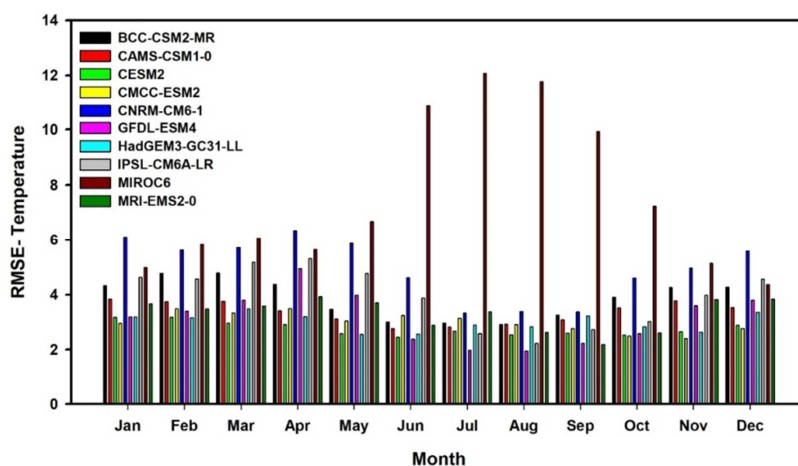


Figure 1. Evaluation of different AOGCMs for estimating temperature based on RMSE index

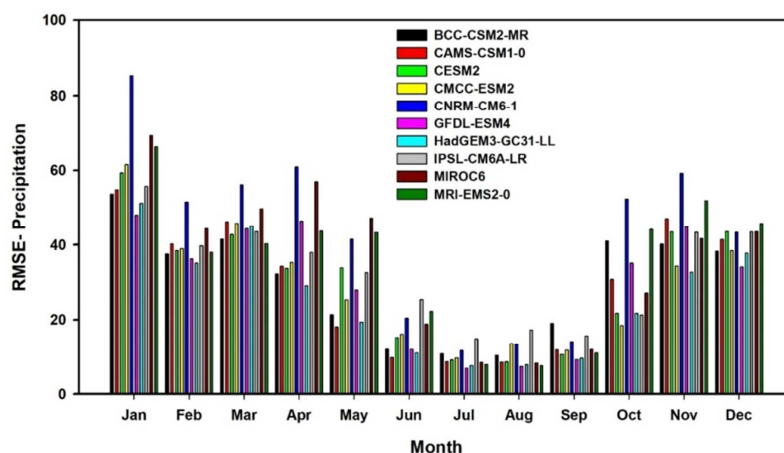


Figure 2. Evaluation of different AOGCMs for estimating precipitation based on RMSE index

نتایج مربوط به ارزیابی دقت مدل‌های AOGCM در برآورد دمای منطقه مطالعاتی براساس ضریب همبستگی پیرسون، در شکل (۳) نشان داده است. براساس نتایج حاصل شده، مقدار این ضریب در ماه‌های مختلف سال، بین  $-0/29$  تا  $0/32$  تغییر نموده است. در اغلب ماه‌های سال و برای مدل‌های مختلف، مقدار این ضریب مثبت بوده است و نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین داده‌های مدل‌های AOGCM و داده‌های بازتحلیل شده ERA5 می‌باشد. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار ضریب همبستگی، به ترتیب در ماه‌های دسامبر و جولای و در مدل MRI-EMS2-0 مشاهده می‌شود. ارزیابی دقت مدل‌ها در برآورد بارش براساس ضریب همبستگی پیرسون نیز در شکل (۴) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقدار ضریب همبستگی پیرسون برای برآورد بارش بین  $-0/18$  تا  $0/188$  نوسان داشته است که کم‌ترین آن برای مدل CAMS-CSM1-0 در ماه نوامبر و بیش‌ترین آن برای مدل GFDL-ESM4 در ماه ژانویه رخ داده است. برخلاف روند مشاهده شده برای این ضریب در زمینه برآورد دما، مقادیر همبستگی منفی برای برآورد بارش بیش‌تر بوده است که نشان می‌دهد که تمام مدل‌های موردنظر ممکن است براساس شاخص ضریب همبستگی، نتوانند دقت مطلوبی در حد دقت برآورد دمای منطقه داشته باشند.

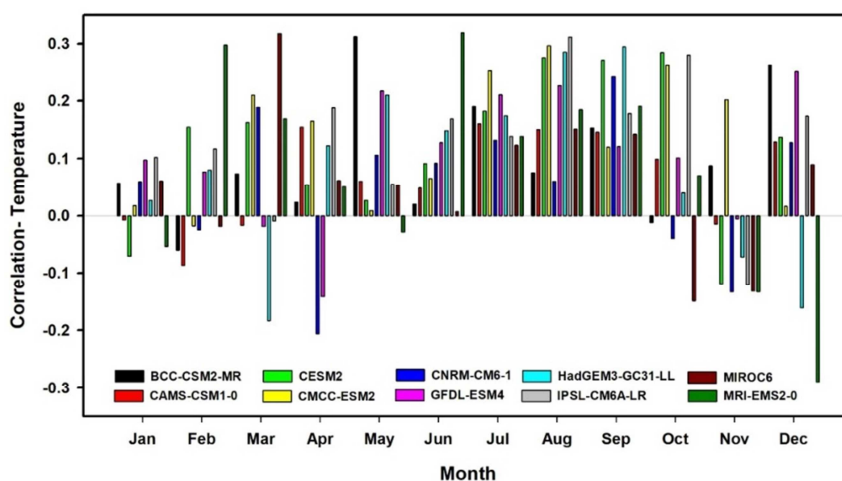


Figure 3. Evaluation of different AOGCMs for estimating temperature based on Pearson correlation coefficient

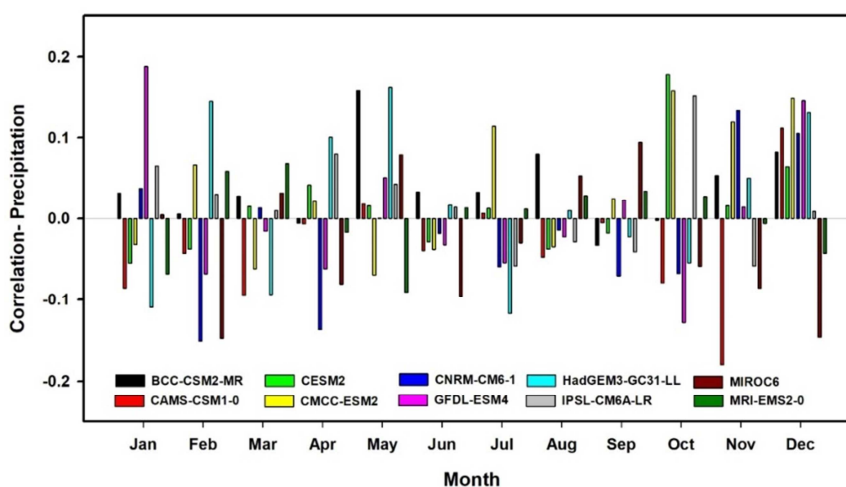


Figure 4. Evaluation of different AOGCMs for estimating precipitation based on Pearson correlation coefficient



شکل (۵) نتایج ارزیابی دقت مدل‌های مختلف AOGCM را در برآورد دمای منطقه مطالعاتی براساس شاخص ترکیبی KGE نشان داده است. براساس نتایج به‌دست آمده، مقدار شاخص KGE برای برآورد دمای منطقه، بین  $0.25$  تا  $0.4$  تغییر نموده است. بر این اساس بهترین عملکرد مدل‌های موردبررسی در ماه آگوست و برای مدل IPSL-CM6A-LR و ضعیف‌ترین عملکرد نیز برای مدل CNRM-CM6-1 و در ماه مارس مشاهده می‌شود. در مجموع نتایج نشان‌دهنده آن است که شاخص KGE، عملکرد مدل‌ها را در ماه‌های گرم سال در برآورد بارش، بهتر از ماه‌های سرد سال نشان داده است.

روند تغییرات شاخص KGE برای برآورد بارش نیز در شکل (۶) ارائه شده است. بر این اساس، مقدار این شاخص در بین  $0.03$  تا  $0.09$  نوسان داشته است و در اغلب ماه‌های سال و مدل‌های مختلف، مقدار شاخص KGE منفی بوده است. بهترین عملکرد مدل در برآورد بارش براساس شاخص KGE در ماه ژانویه و برای مدل GFDL-ESM4 و ضعیف‌ترین عملکرد نیز در ماه آگوست و برای مدل IPSL-CM6A-LR مشاهده می‌شود. در مجموع در ماه‌های پربارش سال، دقت مدل‌های مختلف در برآورد بارش براساس شاخص KGE، مطلوب‌تر از ماه‌های گرم سال تخمین زده شده است.

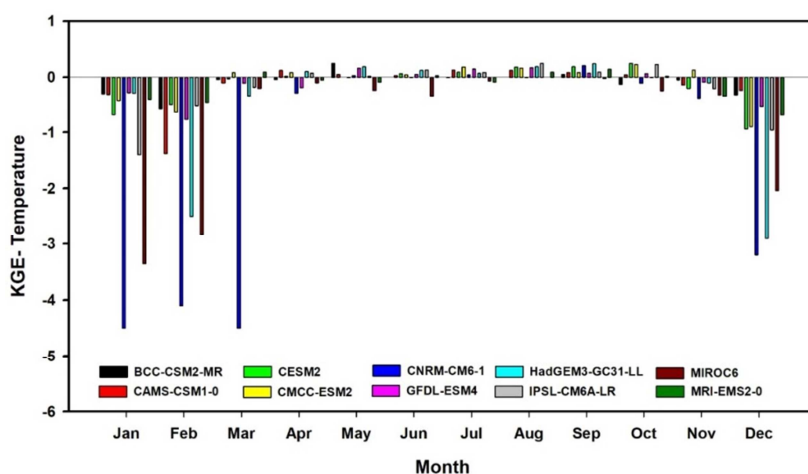


Figure 5. Evaluation of different AOGCMs for estimating temperature based on KGE index

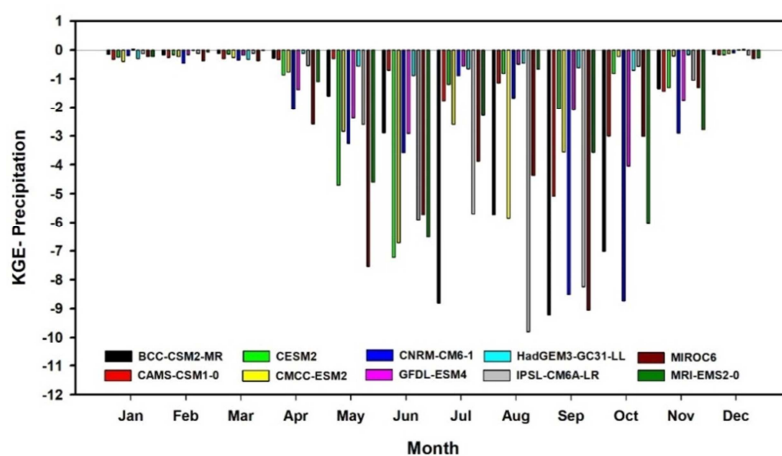


Figure 6. Evaluation of different AOGCMs for estimating precipitation based on KGE index

جدول (۲) مقادیر شاخص‌های RMSE، ضریب همبستگی پیرسون و KGE مدل‌های مختلف را در برآورد دما و بارش سالانه منطقه مطالعاتی ارائه داده است. هم‌چنین مقادیر رتبه هر کدام از مدل‌های موردبررسی برای برآورد دما و بارش سالانه براساس شاخص‌های ذکرشده، در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که رتبه مدل‌ها براساس شاخص‌های مختلف ممکن است اندکی با هم تفاوت داشته باشد. با این وجود براساس شاخص ترکیبی KGE، مدل IPSL-CM6A-LR بهترین عملکرد را در برآورد دمای سالانه کشور ایران داشته است. هرچند این مدل براساس شاخص‌های RMSE و ضریب همبستگی نیز عملکرد قابل قبول و خوبی داشته است. در مقابل، مدل HadGEM3-GC31-LL توانسته است در مجموع بهترین عملکرد را در برآورد بارش سالانه ایران از خود نشان دهد. نتایج این تحقیق با نتایج مطالعات توسط Ansari *et al.* (2022) به‌منظور ارزیابی تطابق دارد که نشان دادند مدل IPSL-CM6A-LR و HadGEM3-GC31-LL به‌ترتیب دقت مناسبی جهت تصویرسازی دما و بارش نواحی مختلف ایران دارا هستند.

شکل‌های (۷) و (۸) به‌ترتیب تغییرات مکانی شاخص ترکیبی KGE را برای ارزیابی دقت مدل‌های AOGCM در برآورد دما و بارش ایران، نشان داده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در مورد متغیر دما، شاخص KGE در پهنه کشور دارای نوسانات شدید نبوده و مقدار این شاخص در یک دامنه نوسان تقریباً ثابت قرار داشته است. هرچند برای برخی مدل‌ها نظیر MIROC6، مقدار این شاخص در برخی از نواحی با نوسان قابل توجه همراه بوده است (شکل ۷). از طرف دیگر تغییرات شاخص KGE برای ارزیابی دقت مدل‌ها در برآورد بارش نشان می‌دهد که این شاخص در محدوده‌های مختلف کشور و برای مدل‌های مختلف، نوسانات قابل‌ملاحظه‌ای داشته است. در حالت کلی در نواحی مرکزی و شرقی کشور، مقدار خطای مدل‌ها براساس شاخص KGE بیش از سایر نواحی کشور بوده است (شکل ۸).

Table 2. Evaluation of different AOGCMs for estimating temperature and precipitaton based on different indices

Model	Temperature			Precipitation		
	RMSE	Co	KGE	RMSE	Co	KGE
BCC-CSM2-MR	2.77	0.43	0.35	29.85	0.06	-0.25
CAMS-CSM1-0	2.32	0.45	0.33	29.32	-0.07	-0.27
CESM2	1.69	0.41	0.35	30.05	-0.09	-0.37
CMCC-ESM2	2.04	0.38	0.25	29.13	-0.09	-0.29
CNRM-CM6-1	4.42	0.28	0.18	42.50	-0.06	-0.59
GFDL-ESM4	2.12	0.39	0.32	29.39	-0.05	-0.26
HadGEM3-GC31-LL	2.05	0.37	0.31	25.70	-0.03	-0.18
IPSL-CM6A-LR	1.95	0.49	0.42	32.59	0.13	-0.23
MIROC6	7.04	0.26	0.08	35.63	-0.05	-0.6
MRI-EMS2-0	3.21	0.21	0.17	35.19	0.01	-0.45

Table 3. Rank of different AOGCMs for estimating temperature and precipitaton based on different indices

Model	Temperature			Precipitation		
	RMSE	Co	KGE	RMSE	Co	KGE
BCC-CSM2-MR	7	3	2	5	2	3
CAMS-CSM1-0	6	2	4	3	8	5
CESM2	1	4	3	6	9	7
CMCC-ESM2	3	6	7	2	10	6
CNRM-CM6-1	9	8	8	10	7	9
GFDL-ESM4	5	5	5	4	5	4
HadGEM3-GC31-LL	4	7	6	1	4	1
IPSL-CM6A-LR	2	1	1	7	1	2
MIROC6	10	9	10	9	6	10
MRI-EMS2-0	8	10	9	8	3	8

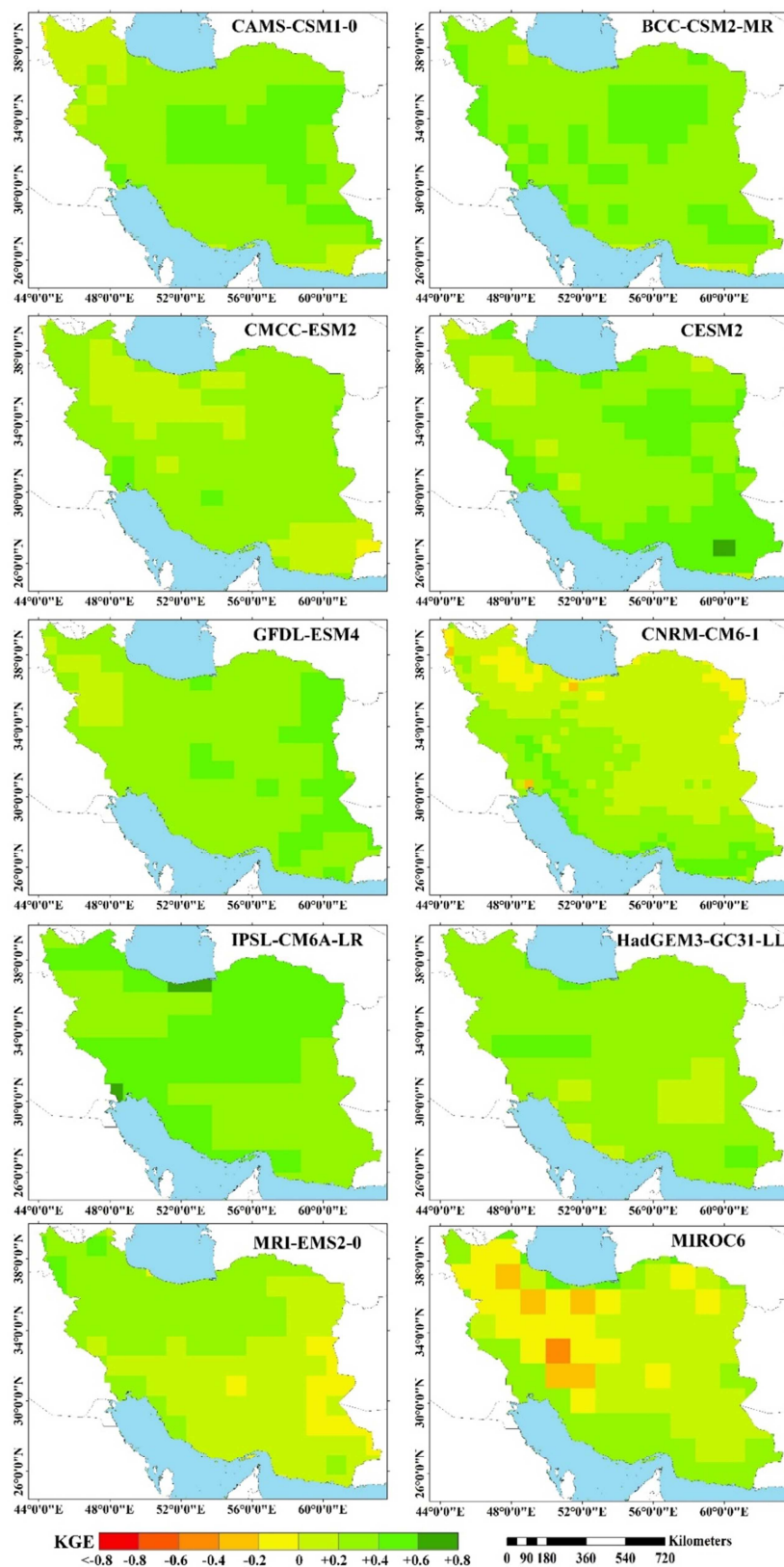


Figure 7. Spatial accuracy of AOGCMs for estimating temperature of Iran based on KGE index

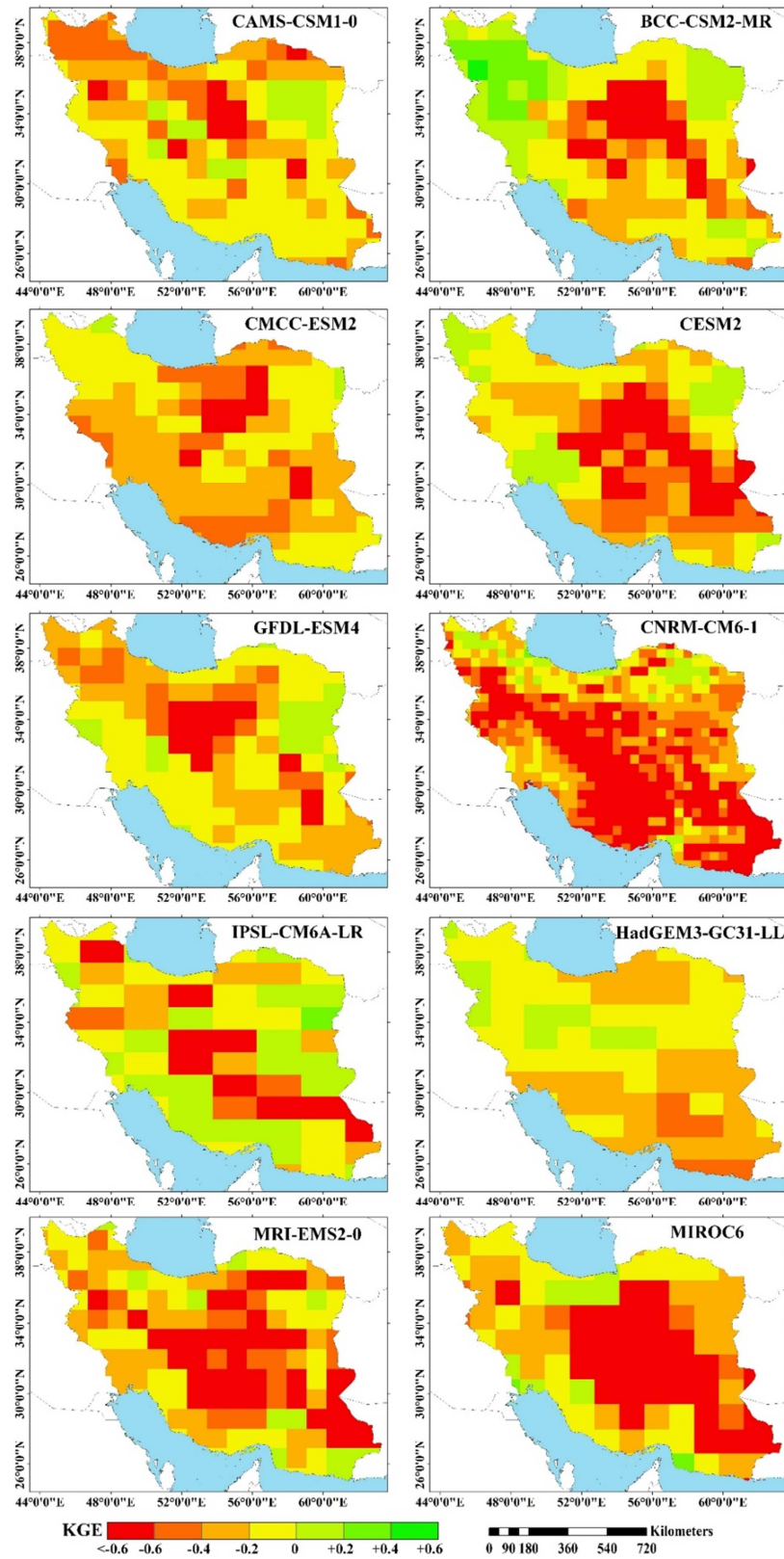


Figure 8. Spatial accuracy of AOGCMs for estimating precipitation of Iran based on KGE index

#### ۴. نتیجه‌گیری

اگرچه استفاده از مدل‌های مختلف AOGCM برای برآورد دما و بارش در دوره آتی، در مطالعات و پژوهش‌های مختلف بسیار رایج است، اما باید توجه داشت که دقت این مدل‌ها در نواحی مختلف و در ماه‌های مختلف سال با یکدیگر متفاوت می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که از بین ۱۰ مدل AOGCM مورد استفاده در این پژوهش و براساس شاخص‌های ارزیابی RMSE، ضریب همبستگی پیرسون و KGE، مدل‌های مختلف در ماه‌های متفاوت سال، دارای دقت‌های غیر یکسانی بودند. دقت این مدل‌ها در زمینه برآورد دمای نواحی مختلف ایران دارای اختلاف‌هایی با یکدیگر بود، اما در حالت کلی و در مقیاس سالانه، مدل IPSL-CM6A-LR بهترین عملکرد را در برآورد دمای سالانه ایران داشته است. از طرف دیگر مدل‌های AOGCM اختلاف دقت قابل توجهی در برآورد بارش نواحی مختلف کشور داشتند و مدل HadGEM3-GC31-LL بهترین عملکرد را در برآورد بارش سالانه ایران از خود نشان داد. میزان خطای این مدل‌ها در نواحی خشک و کم‌بارش مرکزی و شرقی ایران، بیش‌تر از سایر نواحی بود. بنا بر نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش باید به این نکته توجه داشت که در نواحی مختلف کشور برای برآورد دما و بارش دوره آتی، باید از مدل‌های AOGCM مناسب آن ناحیه استفاده نمود و این موضوع در خصوص برآورد بارش دوره آتی دارای اهمیت بیش‌تری می‌باشد. همچنین با توجه به محدودیت داده‌های مشاهداتی در سطح کشور، استفاده از داده‌های پایگاه‌های بارش ماهواره‌ای می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود، این داده‌ها ممکن است عدم قطعیت‌هایی را در نتایج ایجاد نمایند. بدین لحاظ در شرایطی که داده‌های مشاهده‌شده در مناطق خاص و با کیفیت مناسب در اختیار باشند، بهتر است تحلیل‌ها براساس مقایسه نتایج مدل‌های AOGCM با داده‌های مشاهداتی صورت پذیرد.

#### ۵. پی‌نوشت‌ها

1. Climate Change
2. Atmosphere-Ocean General Circulation Models
3. Inter-governmental Panel on Climate Change
4. The sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project
5. Random Forest Regression
6. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
7. Reanalysis
8. Root Mean Square Error
9. Pearson Correlation Coefficient
10. Kling-Gupta

#### ۶. تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۱۳۰۶» انجام شده است.

#### ۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی بین نویسندگان وجود ندارد.

**۸. منابع مورد استفاده**

- Ahmed, K., Sachindra, D.A., Shahid, S., Demirel, M.C., & Chung, E.S. (2019). Selection of multi-model ensemble of GCMs for the simulation of precipitation based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 23, 4803-4824.
- Ansari, M., Dehban, H., Zareian, M.J., & Farokhnia, A. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Research Journal*, 16(1), 11-24. (In Persian).
- Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11(1), 1-10.
- Azizi, J., Rasoulzadeh, A., Rahmati, A., Shayeghi, A., & Bakhtar, A. (2021). Evaluating the Performance of Era-5 Re-Analysis Data in Estimating Daily and Monthly Precipitation, Case Study; Ardabil Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(11), 2937-2951. (In Persian).
- Chen, J., Brissette, F.P., Lucas-Picher, P., & Caya, D. (2017). Impacts of weighting climate models for hydro-meteorological climate change studies. *Journal of Hydrology*, 549, 534-546.
- Dagbegnon, C., Djebou, S., & Singh, V.P. (2016). Impact of climate change on the hydrologic cycle and implications for society. *Environment and Social Psychology*, 1(1).
- Eslamian, S., Safavi, H.R., Gohari, A., Sajjadi, M., Raghbi, V., & Zareian, M.J. (2017). Climate change impacts on some hydrological variables in the Zayandeh-Rud River Basin, Iran. In: *Reviving the dying giant*, Springer, Cham, pp. 201-217.
- Goyal, R. K. (2004). Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural water management*, 69(1), 1-11.
- Gohari, A., & Zareian, M.J. (2017). Interbasin Transfers of Water: Zayandeh-Rud River Basin, *Handbook of Drought and Water Scarcity*, Taylor and Francis.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., & Simmons, A. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Hoseeni, Z.S., Moghaddasi, M., & Paimozd, S. (2022). Accuracy assessment of ECMWF datasets in prediction of climate data and drought monitoring of Garechai basin of Markazi Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(4), 715-732. (In Persian).
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Final Draft Report of Working Group I, Stockholm, Sweden
- Kiani Ghalehsard, S., Shahraki, J., Akbari, A., & Sardar Shahraki, A. (2021). Assessment of the impacts of climate change and variability on water resources and use, food security, and economic welfare in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 23(10), 14666-14682.
- Knoben, W.J., Freer, J.E., & Woods, R.A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash- Sutcliffe and Kling- Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331.
- Mal, S., Singh, R.B., Huggel, C., & Grover, A. (2018). Introducing linkages between climate change, extreme events, and disaster risk reduction. In: *Climate change, extreme events and disaster risk reduction*. Springer, Cham.
- Okhravi, S., Eslamian, S., & Dalezios, N.R. (2019). Reducing water shortage crisis through rainwater reuse: lessons learned from ancient toward integrated technology. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 9(6), 587-602.
- Okhravi, S., Eslamian, S., Eslamian, F., & Tarkesh-Esfahani, S. (2014). Indigenous knowledge as a supportive tool for sustainable development and utilisation of rainwater harvesting systems. *Journal of Flood Engineering*, 5(1), 39-50.
- Patil, S.D., & Stieglitz, M. (2015). Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology*, 525, 409-417.

- Solomon, S., Manning, M., Marquis, M., & Qin, D. (2007). Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4). Cambridge university press
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., & Van Vuuren, D. (2021). Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253-293.
- Uppala, S.M., Kallberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Bechtold, V.D.C., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., & Li, X. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, Applied Meteorology and Physical Oceanography*, 131(612), 2961-3012.
- Werndl, C. (2016). On defining climate and climate change. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 67(2), 337-364.
- Woolf, D., & Wolf, J. (2013). Impacts of climate change on storms and waves. *MCCIP Science Review*.
- Zareian, M.J. (2021). Optimal water allocation at different levels of climate change to minimize water shortage in arid regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin, Iran). *Journal of Hydro-Environment Research*, 35, 13-30.
- Zareian, M.J., Eslamian, S., & Safavi, H.R. (2015). A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(3), 497-516.