



Evaluation of the Performance of CMIP6 Models in Estimating Temperature and Precipitation in the Sefidrood Basin

Reza Seraj Ebrahimi¹  | Mohammad Javad Zareian²  | Hossein Dehban³ 

1. Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. E-mail: reza.serajebrahimi@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: m.zareian@wri.ac.ir
3. Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: dehbanh@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 3 April 2024

Received in revised form

30 April 2024

Accepted 10 June 2024

Published online 5 September 2023

Keywords:

AOGCM Models

Climate change

KGE Index

Simulation

ABSTRACT

Using the most accurate methods and models to simulate the impact of climate change on meteorological variables in different regions of the world is of utmost importance. In this study, the accuracy of 10 AOGCM models related to the sixth assessment report of the IPCC (CMIP6) was investigated for simulating temperature and precipitation in the Sefidrood Basin. For this purpose, observational data of temperature and precipitation from 16 weather stations located in the basin during the time period from 1980 to 2014 were compared with the output of AOGCMs. The Kling-Gupta Efficiency (KGE) index was utilized for this comparison. The comparison was conducted on both annual and monthly time scales, and the more accurate models were identified for each time period. The results indicated that the accuracy of AOGCM models in estimating temperature in the study area was higher than their accuracy in estimating precipitation. Additionally, different models exhibited varying capabilities in simulating these variables across different months. Based on the results obtained, the MIROC6 and MRI-EMS2-0 models performed better than other models in estimating the temperature of different months. Furthermore, the HadGEM3-GC31-LL model showed a better performance than other models in estimating historical precipitation for most months of the year. Based on the results obtained, it is necessary to select and use the best AOGCM models for each month before conducting climate change simulation studies in the study area.

Cite this article: Name, x., Name, x., & Name, x. (2024). Evaluation of the Performance of CMIP6 Models in Estimating Temperature and Precipitation in the Sefidrood Basin. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (2), 277-289.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.374623.1155>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.374623.1155>



ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 جهت برآورد دما و بارش در حوضه آبریز سفیدرود

رضا سراج ابراهیمی^۱ | محمد جواد زارعیان^۲ | حسین دهبان^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. رایانامه: reza.serajebrahimi@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: m.zareian@wri.ac.ir
۳. پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: dehbanh@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	استفاده از دقیق‌ترین روش‌ها و مدل‌ها برای شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای آب و هواشناسی در نقاط مختلف جهان اهمیت بسیار زیادی دارد. در این مطالعه، دقت ۱۰ مدل AOGCM مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC (CMIP6) برای شبیه‌سازی دما و بارش در حوضه آبریز سفیدرود، موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور داده‌های مشاهداتی دما و بارش در ۱۶ ایستگاه هواشناسی واقع در حوضه طی دوره زمانی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ با خروجی مدل‌های AOGCM مقایسه شدند. جهت انجام این مقایسه از شاخص ترکیبی کلینگ-گوپتا (KGE) استفاده شد. این مقایسه در مقیاس‌های زمانی سالانه و ماهانه انجام و مدل‌های دقیق‌تر در هر دوره زمانی مشخص شدند. نتایج نشان دادند که دقت مدل‌های AOGCM برای برآورد دما در منطقه مورد مطالعه از دقت آن‌ها در برآورد بارش بیش‌تر بوده است. همچنین مدل‌های مختلف، دارای توانایی متفاوتی در شبیه‌سازی این متغیرها در ماه‌های مختلف بودند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل‌های MIROC6 و MRI-EMS2-0 عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در برآورد دمای ماه‌های مختلف داشته‌اند. همچنین مدل HadGEM3-GC31-LL در بیش‌تر ماه‌های سال عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر مدل‌ها در برآورد بارش دوره تاریخی دارا بوده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، لازم است تا قبل از انجام مطالعات شبیه‌سازی تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه، بهترین مدل‌های AOGCM در هر ماه انتخاب و مورد استفاده قرار گیرند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۱۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۲/۱۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۲۱	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۱۵	
کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم شاخص KGE شبیه‌سازی مدل‌های AOGCM	

استناد: سراج ابراهیمی، رضا؛ زارعیان، محمدجواد و دهبان، حسین (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 جهت برآورد دما و بارش در حوضه آبریز سفیدرود. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۲)، ۲۷۷-۲۸۹. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.374623.1155>



۱. مقدمه

تغییر اقلیم^۱ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های چند دهه اخیر در سطح جهان به‌شمار می‌رود. این پدیده که به‌طور عمده متأثر از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای^۲ در جو زمین می‌باشد، در اثر افزایش فعالیت‌های صنعتی بشر تشدید گردیده است و نگرانی‌هایی را برای آینده وضعیت آب‌وهوای زمین نیز ایجاد نموده است (Ramanathan and Feng, 2009; Werndl, 2016). تغییر اقلیم برخی از فرایندهای مهم آب‌وهوایی در نقاط مختلف جهان را تحت تأثیر خود قرار داده است. تغییر در مقدار و الگوهای بارش و دما، مقادیر حدی متغیرهای اقلیمی، تبخیر و تعرق، نیاز آبی گیاهان و وقایع حدی هیدرولوژیکی (نظیر سیلاب و خشکسالی) از مهم‌ترین این اثرات بوده است (Mal et al., 2018).

به‌دلیل اثرگذاری معنی‌دار تغییر اقلیم بر فرایندهای آب‌وهوایی در نقاط مختلف جهان، مدیریت منابع آب در این نواحی نیز با چالش‌هایی مواجه شده است. این موضوع در کلیه نواحی خشک و یا مرطوب باعث تغییر رویکردهای جاری در خصوص عرضه و تقاضای آب و همچنین سیاست‌گذاری کلان در حوضه سازگاری با تغییر اقلیم گردیده است. در چنین شرایطی اهمیت پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی آبی (به‌ویژه دما و بارش) بیش از پیش مورد توجه پژوهش‌گران و همچنین سیاست‌گذاران آبی قرار گرفته است. استفاده از بهترین روش‌ها و مدل‌های لازم برای برآورد دما و بارش در چنین شرایطی باید با لحاظ عدم قطعیت‌های احتمالی صورت گرفته تا دقت این برآوردها تا حد قابل‌قبولی افزایش و امکان مدیریت منابع آب را براساس نتایج تحلیل‌های مبتنی بر آن در دوره‌های آبی، فراهم سازد (Dagbegnon et al., 2016; Zareian, 2021).

کشور ایران نیز یکی از نواحی دنیاست که با چالش‌های متعددی در زمینه مدیریت منابع آب مواجه است و این چالش‌ها می‌توانند در اثر تغییر اقلیم تشدید گردند. تنوع اقلیمی در نواحی مختلف ایران علاوه بر این که موجب شکل‌گیری مراکز جمعیتی، صنعتی و کشاورزی متنوع در کشور گردیده است، الگوی مصرف آب را نیز در نواحی مختلف با یکدیگر متمایز ساخته است (Ashraf et al., 2021). حوضه آبریز سفیدرود بزرگ به‌عنوان یکی از حوضه‌های مهم در شمال ایران واقع شده است و استان‌های متعددی را در محدوده خود جای داده است. تعدد رودخانه‌ها، مراکز جمعیتی و صنعتی، اراضی کشاورزی و سرمایه‌های زیست‌محیطی (نظیر جنگل‌ها، مراتع، تالاب‌ها و حیات‌وحش) در این حوضه بسیار بالا بوده و وابستگی شدیدی بین این موارد با موجودیت آب در حوضه وجود دارد. بدین لحاظ ضروری است تا با استفاده از مهم‌ترین و جدیدترین مدل‌های اقلیمی، وضعیت آبی دما و بارش این حوضه موردبررسی قرار گرفته تا براساس آن بتوان نسبت به مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در منطقه با توجه به سناریوهای اقلیمی آبی، اقدام نمود.

مدل‌های جفت‌شده گردش عمومی جوی - اقیانوس (AOGCMs)^۳ از اصلی‌ترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی آینده اقلیم جهان براساس سناریوهای مختلف به‌شمار می‌روند. این مدل‌ها قادرند فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را در جو، اقیانوس و سطح زمین شبیه‌سازی نمایند و براساس این شبیه‌سازی‌ها، معادلات پیچیده‌ای را برای نشان‌دادن چگونگی تأثیر این اجزا بر اقلیم کره زمین ایجاد می‌نمایند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان عکس‌العمل سیستم‌های اقلیمی به تغییراتی مانند افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای را تحت سناریوهای انتشار^۴ مختلف شبیه‌سازی نمود (IPCC, 2013). جدیدترین نسخه از این مدل‌ها تحت ششمین گزارش ارزیابی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۵ و تحت عنوان CMIP6^۶ ارزیابی و نتایج آن‌ها منتشر شده است. در حقیقت، این گزارش جدیدترین داده‌های مدل‌های آب‌وهوایی را ارائه می‌دهد. CMIP6 نسبت به فازهای قبلی از سناریوهای انتشار گسترده‌تری استفاده می‌کند و عوامل اجتماعی - اقتصادی مختلفی را که می‌توانند بر سطوح انتشار آبی تأثیر بگذارند، در نظر می‌گیرد (O'Neill et al., 2016).

یکی از مهم‌ترین موضوعاتی که در استفاده از مدل‌های AOGCM باید مدنظر قرار گیرد، توانمندی و دقت این

مدل‌ها در ناحیه موردنظر است. بر این اساس در مطالعات مختلف باید تلاش گردیده است تا بهترین مدل از میان مدل‌های مختلف AOGCM براساس مقایسه خروجی این مدل‌ها در دوره گذشته با داده‌های مشاهداتی انتخاب و شبیه‌سازی‌های اقلیمی در دوره آتی براساس بهترین مدل یا ترکیبی از مدل‌ها صورت گیرد (Chen *et al.*, 2017; Parker, 2013). Zareian *et al.* (2015) دقت مدل‌های AOGCM را براساس چهارمین گزارش ارزیابی IPCC در حوضه زاینده‌رود بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌های NCARCCSM3 و CGCM2.3.2a به‌ترتیب بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی دما و بارش به خود اختصاص دادند. نتایج مطالعه‌ای که توسط Ongoma *et al.* (2019) به‌منظور ارزیابی دقت مدل CMIP5 جهت برآورد بارش در محدوده شرق آفریقا صورت گرفت نشان داد که چهار مدل گردش عمومی CanESM2، CESM1-CAM5، CMCC-CESM و CNRM-CM5 قادر به پیش‌بینی بارش در محدوده مورد مطالعه با دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها بودند. Lovino *et al.* (2018) با انجام یک پژوهش به ارزیابی عملکرد ۴۰ مدل CMIP5 جهت برآورد دما و بارش در نواحی جنوب‌شرقی آسیا پرداختند. نتایج نشان داد که از میان مدل‌های مورد بررسی، مدل گردش عمومی CNRM-CM5-2 عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در پیش‌بینی دما و بارش دارا بود. همچنین عملکرد مدل‌های مختلف در سطح خشکی و دریا نیز با یکدیگر متفاوت بود. در مطالعه‌ای دیگر، Zamani *et al.* (2019) عملکرد ۲۰ مدل از مجموعه CMIP5 را در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی در حوضه رودخانه‌های زردرود، بختگان و قره‌سو با استفاده از روش TOPSIS^۶ رتبه‌بندی نمودند. نتایج نشان دادند که مدل‌های MIROC-ESM، BCC-CSM1.1 و CSM1.1 به‌ترتیب بهترین مدل‌های AOGCM برای شبیه‌سازی دما و بارش در حوضه‌های رودخانه‌های زردرود، بختگان و قره‌سو بودند.

مطالعه Ansari *et al.* (2022) که به‌منظور ارزیابی دقت ۱۰ مدل CMIP6 در برخی از ایستگاه‌های هواشناسی ایران صورت گرفت نشان داد که مدل‌های BCC-CSM2-MR و HadGEM3-GC31-LL به‌ترتیب دارای بهترین عملکرد در شبیه‌سازی در دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب بودند. Yazdandoost *et al.* (2021) نیز با انجام پژوهشی به ارزیابی عملکرد ۱۲ مدل از مجموعه CMIP6 در برآورد بارش در نواحی مختلف اقلیمی ایران پرداختند. نتایج نشان داد که عملکرد این مدل‌ها در نواحی خشک ایران مطلوب‌تر از نواحی مرطوب می‌باشد. بر این اساس مدل‌های CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 بهترین دقت را در نواحی مرطوب و مدل‌های HadGEM3-GC31-LL، BCC-CSM2-MR و CanESM5 بهترین عملکرد را در نواحی خشک از خود نشان دادند.

با توجه به موارد ذکرشده، مشخص است که برنامه‌ریزی و تحلیل‌های لازم در خصوص اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش در نقاط مختلف، باید با استفاده از نتایج بهترین مدل‌های AOGCM که کارایی بالاتری در هر منطقه دارند، صورت پذیرد. بنابراین هدف اصلی از این پژوهشی، بررسی کارایی مدل‌های مختلف CMIP6 مربوط به ششمین ارزیابی IPCC در برآورد دما و بارش حوضه آبریز سفیدرود و رتبه‌دهی این مدل‌ها برای استفاده در مطالعات آتی مرتبط با تغییر اقلیم می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، حوضه آبریز سفیدرود به‌عنوان محدوده مورد مطالعه جهت ارزیابی دقت مدل‌های AOGCM انتخاب گردید. این حوضه در محدوده بین طول‌های جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۳ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه تا ۳۷ درجه و ۵۵ دقیقه شمالی واقع گردیده است. مساحت این حوضه ۵۹۵۰۰ کیلومتر مربع بوده که حدود ۷۳ درصد آن را مناطق کوهستانی و ۲۷ درصد آن را دشت‌ها تشکیل می‌دهند. شکل یک موقعیت حوضه آبریز سفیدرود را در شمال ایران نشان می‌دهد.

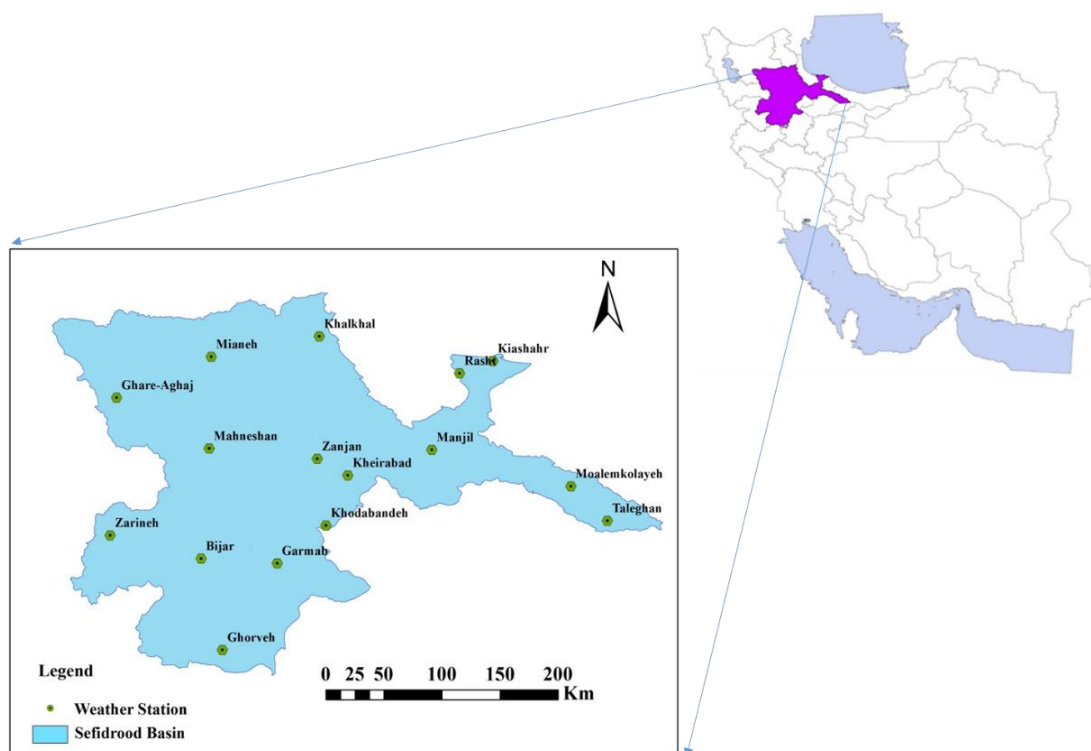


Figure 1. Location of study area (Sefidrood basin) in the north of Iran

به منظور دسترسی به داده‌های مشاهداتی دما و بارش در محدوده حوضه سفیدرود و لزوم پراکندگی مکانی مناسب برای این داده‌ها، ۱۶ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در محدوده مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به لزوم در دسترس بودن طول دوره آماری مناسب برای ارزیابی دقت مدل‌های AOGCM، ایستگاه‌های هواشناسی در این پژوهش با حداقل طول دوره آماری ۳۰ ساله انتخاب گردیدند. همچنین پراکندگی این ایستگاه‌ها نیز به نوحی انتخاب شد که در کل حوضه پوشش مناسبی داشته باشند. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین وضعیت پراکندگی ایستگاه‌های این ایستگاه‌ها در حوضه نیز قبلاً در شکل (۱) نشان داده شده است.

Table 1. Characteristics of selected synoptic weather stations in the study area

Name	Longitude	Latitude	Elevation from sea level (m)
Taleghan	50°46'	36°10'	1857
Khalkhal	48°31'	37°36'	1797
Mianeh	47°42'	37°27'	1110
Ghare-Aghaj	46°57'	37°07'	1302
Kiashahr	49°52'	37°24'	-22
Rasht	49°37'	37°19'	-8.6
Manjil	49°24'	36°43'	338
Zarineh	46°54'	36°03'	2142
Bijar	47°37'	35°52'	1883
Ghorveh	47°46'	35°10'	1906
Moalemkolayeh	50°28'	36°26'	1629
Mahmeshan	47°40'	36°44'	1284
Zanjan	48°31'	36°39'	1659
Kheirabad	48°45'	36°31'	1767
Khodabandeh	48°34'	36°08'	1887
Garmab	48°12'	35°50'	1632

لازم به ذکر است که استفاده از داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های هواشناسی برای ارزیابی دقت مدل‌های AOGCM در دوره تاریخی، دقیق‌ترین روش برای بررسی کارایی این مدل‌ها به‌شمار می‌رود. در صورتی که داده‌های مشاهداتی با پراکنش مکانی مناسب در دسترس نباشند، می‌توان از داده‌های بازتحلیل یا داده‌های ماهواره‌ای هواشناسی نیز استفاده نمود (نظیر داده‌های ERA5، GPCP و ...). که دقت آن‌ها در قیاس با داده‌های مشاهداتی کم‌تر خواهد بود. در ادامه داده‌های ۱۰ مدل AOGCM مربوط به گزارش ششم IPCC، از پایگاه داده‌های رسمی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم استخراج گردید. خصوصیات این مدل‌ها در جدول (۲) ارائه گردیده است.

Table 2. Characteristics of selected AOGCM models

Model	Resolution	Developer
BCC-CSM2-MR	1.12°×1.12°	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
CAMS-CSM1-0	1.1°×1.1°	Chinese Academy of Meteorological Sciences, China
CESM2	1.25°×0.94°	Community Earth System Model Contributors
CMCC-ESM2	1.1°×1.1°	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
CNRM-CM6-1	1.4°×1.4°	Centre National de Recherches Météorologiques Scientifique (CNRM)
GFDL-ESM4	1.3°×1.0°	NOAA-Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
HadGEM3-GC31-LL	1.88°×1.25°	Meteorological Office Hadley Centre
IPSL-CM6A-LR	2.5°×1.26°	Institute Pierre-Simon Laplace
MIROC6	1.4°×1.4°	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo
MRI-EMS2-0	1.12°×1.12°	Meteorological Research Institute

خروجی مدل‌های منتخب در این پژوهش همانند سایر مدل‌های AOGCM، شامل سری زمانی داده‌های دوره گذشته و دوره‌های آینده می‌باشند. از آنجایی که دقت این مدل‌ها در پیش‌بینی دما و بارش در دوره گذشته می‌تواند به‌عنوان یک معیار قابل قبول در کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی این مدل‌ها در دوره آتی مورد استفاده قرار گیرد، در این پژوهش نیز داده‌های مشاهداتی دما و بارش در هر کدام از ایستگاه‌های هواشناسی مورد اشاره در جدول (۲)، با خروجی مدل‌های AOGCM مختلف مقایسه گردیدند. براساس این فرایند، امکان شناسایی دقیق‌ترین مدل‌های AOGCM و رتبه‌بندی آن‌ها برای پیش‌بینی دما و بارش در دوره آینده فراهم شد. دوره تاریخ منتخب در این پژوهش، سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ بود که منطبق بر دوره تاریخی در دسترس مدل‌های CMIP6 می‌باشد.

برای مقایسه خروجی مدل‌های AOGCM در دوره زمانی تاریخی (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴) با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های هواشناسی، از شاخص ترکیبی کلینگ-گوپتا (KGE)^۱ استفاده گردید. این شاخص معیاری است که برای ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف هواشناسی و هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. این شاخص داده‌های شبیه‌سازی شده (خروجی مدل) را با داده‌های مشاهده شده مقایسه می‌کند تا براساس آن بتوان دقت مدل را برآورد نمود. شاخص KGE یک شاخص ترکیبی است که علاوه بر در نظر گرفتن اریبی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، به همبستگی بین داده‌ها نیز توجه دارد. این شاخص همان‌گونه که مقادیر میانگین و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را با یکدیگر مقایسه می‌کند، با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون می‌تواند همبستگی بین آن‌ها را نیز تحلیل نماید. بر این اساس می‌توان استفاده از این شاخص را به استفاده از شاخص‌های تک‌بعدی نظیر RMSE، MSE و R² و ... ارجحیت داد. برای محاسبه این شاخص از روابط زیر استفاده می‌گردد:

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad \text{رابطه ۴}$$

در روابط (۱) تا (۴)، S_i و O_i به ترتیب داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (دما و بارش)، σ_s و σ_o به ترتیب انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، μ_s و μ_o میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و CC ضریب همبستگی پیرسون^۹ می‌باشند (Knoben *et al.*, 2019). مقدار شاخص KGE بین $-\infty$ تا یک متغیر می‌باشد. هرچه مقدار شاخص KGE به ۱ نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل بهتر است و عدد یک نشان‌دهنده عملکرد ایده‌آل مدل در شبیه‌سازی داده‌های موردنظر می‌باشد (Patil and Stieglitz, 2015).

در این پژوهش ارزیابی عملکرد مدل‌های AOGCM در هر ایستگاه به صورت جداگانه صورت گرفت. همچنین این ارزیابی در دو مقیاس ماهانه و سالانه صورت گرفت. نتایج این ارزیابی‌ها به صورت نقشه پهنه‌بندی KGE برای حوضه آبریز سفیدرود ارائه گردید. کلیه محاسبات مربوطه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R انجام و نقشه‌های پهنه‌بندی نیز با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.3 ترسیم گردید.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. ارزیابی دقت مدل‌های AOGCM در برآورد دمای محدوده مطالعاتی

شکل (۲)، پهنه‌بندی مکانی شاخص KGE را به منظور ارزیابی دقت مدل‌های AOGCM در برآورد دمای سالانه دوره تاریخی در پهنه مطالعاتی نشان داده است. در حالت کلی مدل‌های مختلف در نواحی شرقی حوضه، عملکرد بهتری در برآورد دما نسبت به نواحی شرقی حوضه از خود نشان داده‌اند. هر چند دو مدل HadGEM3-GC31-LL و MRI-ES2M2-0 در نواحی غربی حوضه نیز عملکرد قابل‌قبولی از خود ارائه نموده‌اند. به طور کلی در نواحی مرکزی حوضه مدل‌ها دارای خطای بیش‌تری نسبت به نواحی دیگر هستند (شکل ۲). نتایج نشان می‌دهد که مدل IPSL-CM6A-LR با مقدار متوسط $KGE=0/34$ و مدل MIROC6 با مقدار متوسط $KGE=-0/14$ بهترین و ضعیف‌ترین دقت را در برآورد دمای سالانه دارا بوده‌اند.

جهت تدقیق بهتر نتایج مربوط به انتخاب بهترین مدل AOGCM در برآورد دمای دوره تاریخی، انتخاب بهترین مدل براساس دمای ماهانه به صورت جداگانه در هر ماه نیز صورت گرفت. جدول (۳) و شکل (۳) مقادیر ماهانه شاخص KGE را جهت برآورد دمای ماه‌های مختلف سال ارائه داده‌اند.

Table 3. Monthly KGE index for evaluating the performance of AOGCMs in temperature estimation

Model	Month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
BCC-CSM2-MR	-0.30	-0.31	-0.68	-0.42	-0.45	-0.28	-0.29	-0.84	-0.36	-0.40	-0.30	-0.31
CAMS-CSM1-0	-0.56	-0.38	-0.49	-0.62	-0.42	-0.77	-0.75	-0.51	-0.83	-0.45	-0.56	-0.38
CESM2	-0.04	-0.10	-0.03	0.08	-0.35	-0.11	-0.34	-0.18	-0.20	0.09	-0.04	-0.10
CMCC-ESM2	-0.04	0.12	0.02	0.08	-0.29	-0.19	0.10	0.07	-0.10	-0.05	-0.04	0.12
CNRM-CM6-1	0.30	0.05	0.01	-0.01	0.03	0.16	0.19	0.02	-0.24	-0.09	0.30	0.05
GFDL-ESM4	0.02	0.03	0.06	0.04	-0.01	0.05	0.12	0.13	-0.34	0.03	0.02	0.03
HadGEM3-GC31-LL	-0.01	0.13	0.09	0.18	0.04	0.15	0.07	0.08	-0.07	-0.09	-0.01	0.13
IPSL-CM6A-LR	0.02	0.12	0.18	0.16	-0.01	0.17	0.19	0.15	0.05	0.09	0.03	0.12
MIROC6	0.05	0.08	0.19	0.08	0.21	0.07	0.24	0.09	-0.02	0.14	0.05	0.08
MRI-ESM2-0	-0.13	0.04	0.25	0.23	-0.11	0.06	-0.01	0.23	-0.25	0.02	-0.13	0.04

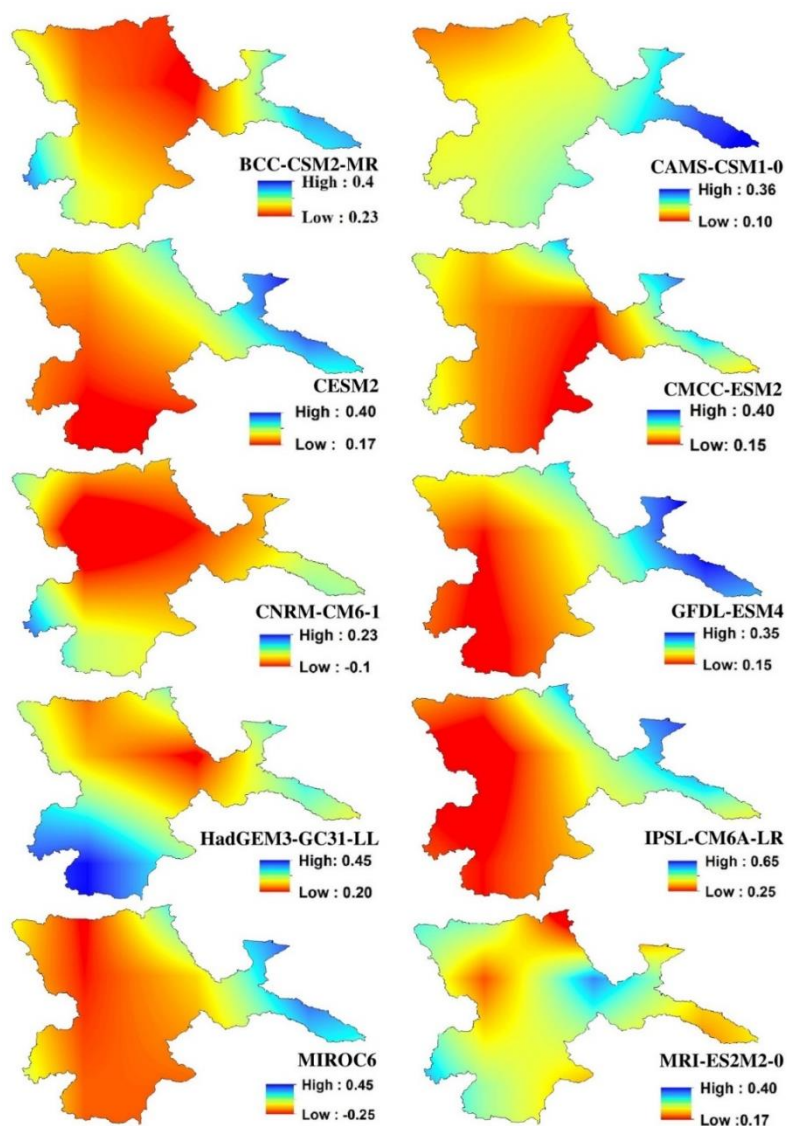


Figure 2. Zoning map of KGE index for evaluating the performance of AOGCMs in temperature estimation

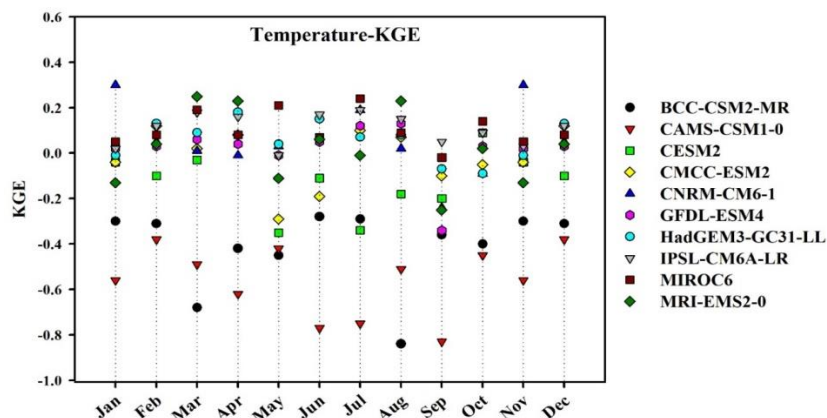


Figure 3. Monthly KGE index for evaluating the performance of AOGCMs in temperature estimation

براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل CNRM-CM6-1 در ماه‌های ژانویه و نوامبر (در هر دو ماه با $KGE=0/3$)، مدل HadGEM3-GC31-LL در ماه‌های فوریه و دسامبر (در هر دو ماه با $KGE=0/13$)، مدل IPSL-CM6A-LR در ماه‌های ژوئن ($KGE=0/17$) و سپتامبر ($KGE=0/05$)، مدل MIROC6 در ماه‌های می ($KGE=0/21$)، جولای ($KGE=0/24$) و اکتبر ($KGE=0/14$) و مدل MRI-EMS2-0 در ماه‌های آوریل ($KGE=0/23$)، مارس ($KGE=0/25$) و آگوست ($KGE=0/23$) بهترین عملکرد را نشان داده‌اند. بنابراین، براساس نتایج به‌دست‌آمده مدل‌های MIROC6 و MRI-EMS2-0 عملکرد ماهانه بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته و هرکدام از این مدل‌ها سه مرتبه در ماه‌های مختلف دارای بهترین عملکرد بوده‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل‌های BCC-CSM2-MR، CESM2، CAMS-CSM1-0 و CMCC-ESM2 نتوانسته‌اند در هیچ‌کدام از ماه‌های سال عملکرد مطلوبی از خود نشان دهند. از طرف دیگر ارزیابی دقت ماهانه مدل‌های AOGCM مختلف نشان می‌دهد که مدل BCC-CSM2-MR در ماه‌های مارس ($KGE=-0/68$)، می ($KGE=-0/45$) و آگوست ($KGE=-0/84$) و مدل CAMS-CSM1-0 در ماه‌های ژانویه ($KGE=-0/56$)، فوریه ($KGE=-0/38$)، آوریل ($KGE=-0/62$)، ژوئن ($KGE=-0/77$)، جولای ($KGE=-0/75$)، سپتامبر ($KGE=-0/83$)، اکتبر ($KGE=-0/45$)، نوامبر ($KGE=-0/56$) و دسامبر ($KGE=-0/38$) کم‌ترین دقت ماهانه را دارا بوده‌اند.

۲.۳. ارزیابی دقت مدل‌های AOGCM در برآورد بارش محدوده مطالعاتی

شکل (۴)، نقشه پهنه‌بندی مقادیر شاخص KGE برای برآورد بارش دوره تاریخی را در نواحی مختلف حوضه سفیدرود توسط مدل‌های مختلف AOGCM نشان داده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل‌های مختلف، دقت متفاوتی در برآورد بارش در نواحی مختلف داشته‌اند. در حالت کلی، مدل‌های BCC-CSM2-MR، CESM2، CMCC-ESM2 و HadGEM3-GC31-LL دارای دقت بهتری در نواحی غربی حوضه نسبت به نواحی شرقی آن بوده‌اند. از طرف دیگر مدل‌های MRI-ES2M2-0، MIROC6، GFDL-ESM4 و CNRM-CM6-1 در نواحی شرقی حوضه، دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها در برآورد بارش براساس شاخص KGE داشته‌اند (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهند که در مقیاس سالانه، مدل BCC-CSM2-MR با $KGE=0/27$ بهترین دقت را در برآورد بارش سالانه داشته است. همچنین مدل CAMS-CSM1-0 با $KGE=-0/45$ کم‌ترین کارایی را در برآورد بارش سالانه در منطقه نشان داده است.

جدول (۴) و شکل (۵)، مقادیر شاخص KGE محاسبه‌شده را برای برآورد بارش حوضه سفیدرود در ماه‌های مختلف سال ارائه داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های AOGCM مختلف، در ماه‌های سال دارای دقت‌های متفاوتی در برآورد بارش بوده‌اند و این موضوع باید مبنای انتخاب این مدل‌ها قرار گیرد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل CAMS-CSM1-0 در ماه‌های می ($KGE=-0/15$) و ژوئن ($KGE=-0/55$)، مدل CMCC-ESM2 در ماه اکتبر ($KGE=-0/08$)، مدل GFDL-ESM4 در ماه‌های ژانویه ($KGE=0/18$) و جولای ($KGE=-0/41$)، مدل HadGEM3-GC31-LL در ماه‌های فوریه ($KGE=0/13$)، آوریل ($KGE=0/03$)، آگوست ($KGE=-0/31$)، سپتامبر ($KGE=-0/47$)، نوامبر ($KGE=-0/01$) و دسامبر ($KGE=-0/17$) و مدل MRI-EMS2-0 در ماه مارس ($KGE=0/13$) بهترین عملکرد را از خود نشان داده‌اند. بنابراین، مدل HadGEM3-GC31-LL در بیش‌تر ماه‌های سال عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر مدل‌ها در برآورد بارش دوره تاریخی دارا بوده است.

نتایج مربوطه به عملکرد مدل‌ها در ماه‌های مختلف همچنین نشان می‌دهد که مدل‌های BCC-CSM2-MR، CESM2، CNRM-CM6-1، IPSL-CM6A-LR و MIROC6 در هیچ‌کدام از ماه‌های سال نتوانسته‌اند بهترین عملکرد را نسبت به سایر

مدل‌های AOGCM در برآورد بارش نشان دهند. مدل BCC-CSM2-MR در ماه‌های جولای ($KGE=-۸/۶۶$) و سپتامبر ($KGE=-۹/۰۶$)، مدل CESM2 در ماه ژوئن ($KGE=-۷/۰۷$)، مدل CMCC-ESM2 در ماه‌های فوریه ($KGE=-۰/۳۱$)، اکتبر ($KGE=-۸/۵۸$) و نوامبر ($KGE=-۲/۷۶$)، مدل IPSL-CM6A-LR در ماه آگوست ($KGE=-۹/۶۴$) و مدل MIROC6 در ماه‌های مارس ($KGE=-۰/۲۲$)، آوریل ($KGE=-۲/۴۴$)، می ($KGE=-۷/۳۹$) و دسامبر ($KGE=-۰/۱۵$)، ضعیف‌ترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها در برآورد دمای ماهانه به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۴).

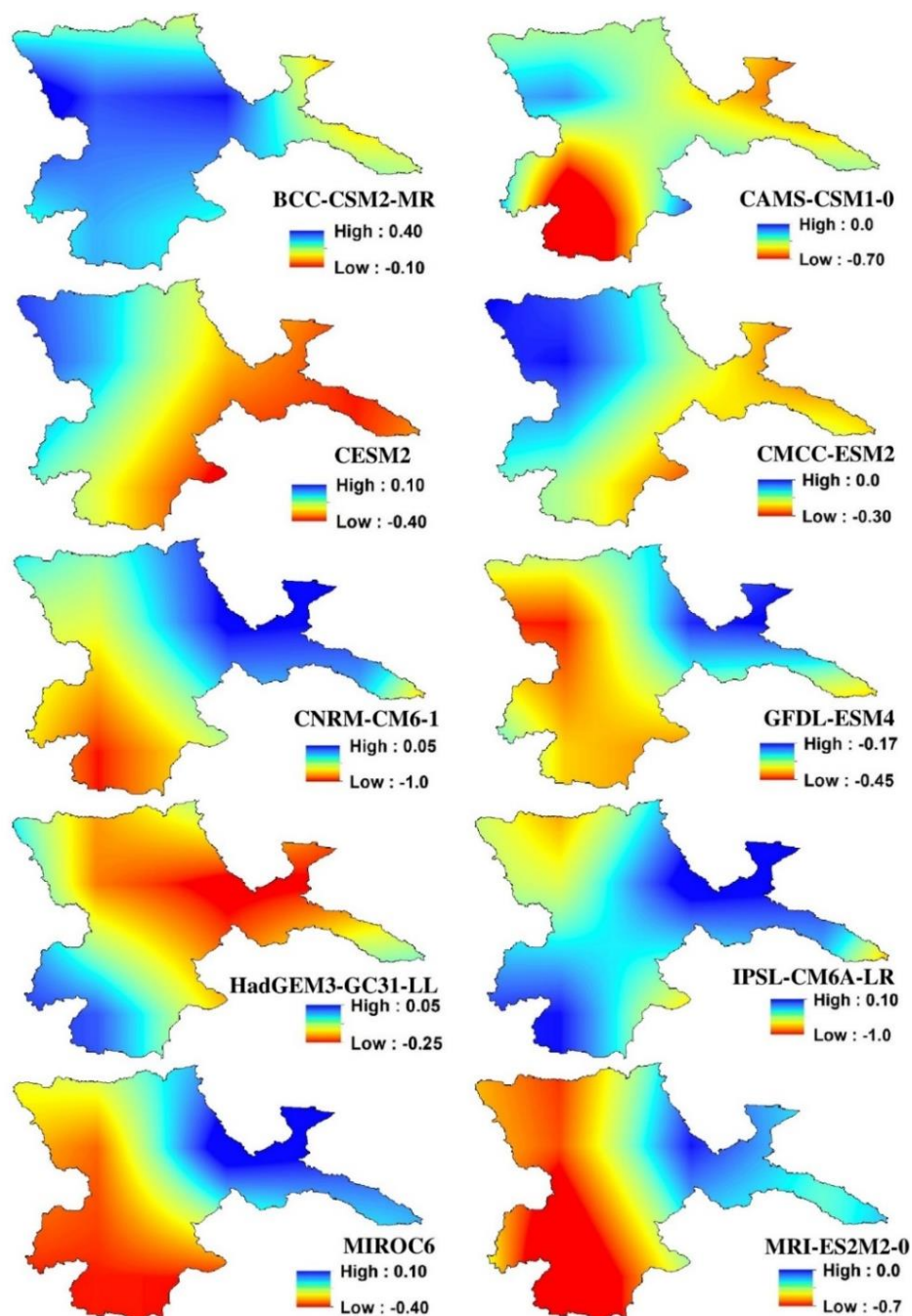


Figure 4. Zoning map of KGE index for evaluating the performance of AOGCMs in precipitation estimation

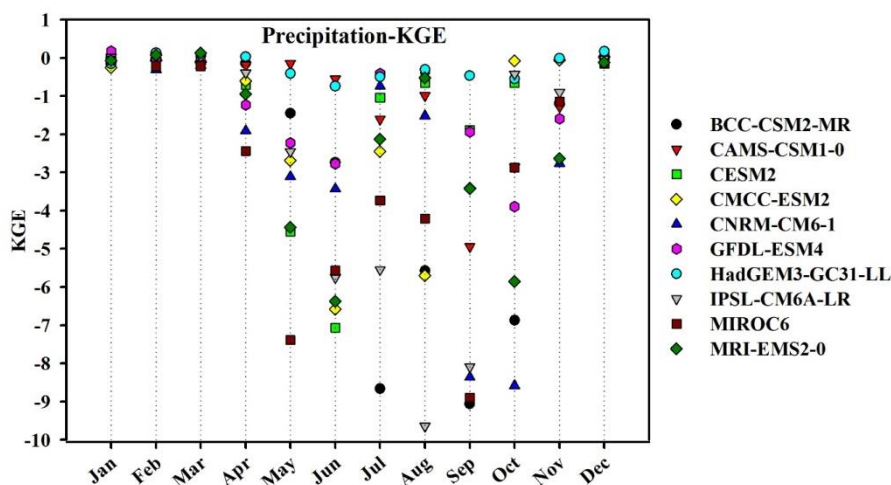


Figure 5. Monthly KGE index for evaluating the performance of AOGCMs in precipitation estimation

Table 4. Monthly KGE index for evaluating the performance of AOGCMs in precipitation estimation

Model	Month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
BCC-CSM2-MR	0.01	-0.02	0.04	-0.14	-1.45	-2.74	-8.66	-5.57	-9.06	-6.87	-1.19	0.05
CAMS-CSM1-0	-0.17	-0.11	-0.15	-0.19	-0.15	-0.55	-1.61	-0.99	-4.94	-2.86	-1.28	-0.02
CESM2	-0.10	-0.01	0.01	-0.71	-4.55	-7.07	-1.04	-0.66	-1.89	-0.66	-1.15	-0.02
CMCC-ESM2	-0.25	-0.07	-0.11	-0.61	-2.69	-6.58	-2.45	-5.70	-3.41	-0.08	-0.06	0.02
CNRM-CM6-1	-0.04	-0.31	-0.20	-1.91	-3.11	-3.43	-0.74	-1.52	-8.36	-8.58	-2.76	0.05
GFDL-ESM4	0.18	-0.02	-0.03	-1.23	-2.23	-2.77	-0.41	-0.35	-1.94	-3.89	-1.59	0.16
HadGEM3-GC31-LL	-0.15	0.13	-0.17	0.03	-0.41	-0.74	-0.50	-0.31	-0.47	-0.55	-0.01	0.17
IPSL-CM6A-LR	0.02	0.03	0.03	-0.39	-2.45	-5.75	-5.55	-9.64	-8.09	-0.42	-0.90	-0.03
MIROC6	-0.07	-0.22	-0.22	-2.44	-7.39	-5.57	-3.73	-4.21	-8.90	-2.87	-1.15	-0.15
MRI-EMS2-0	-0.07	0.08	0.13	-0.95	-4.44	-6.37	-2.13	-0.52	-3.42	-5.86	-2.63	-0.12

۴. نتیجه‌گیری

با وجود آن‌که مدل‌های AOGCM مرتبط با ششمین گزارش ارزیابی IPCC (CMIP6) در حال حاضر به‌عنوان متداول‌ترین ابزار جهت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره آتی (به‌ویژه دما و بارش) مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما تعدد این مدل‌ها و توسعه نسخه‌های مختلفی از آن‌ها توسط مراجع علمی و پژوهشی در سراسر جهان باعث شده است تا لزوم ارزیابی این مدل‌ها برای مطالعه در نواحی مختلف ضروری گردد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که از میان ۱۰ مدل AOGCM منتخب، دقت این مدل‌ها در نواحی مختلف حوضه آبریز سفیدرود متفاوت بود. همچنین این دقت‌ها در ماه‌های مختلف سال نیز متفاوت بود. نتایج نشان دادند که مدل CNRM-CM6-1 در ماه‌های ژانویه و نوامبر، مدل HadGEM3-GC31-LL در ماه‌های فوریه و دسامبر، مدل IPSL-CM6A-LR در ماه‌های ژوئن و سپتامبر، مدل MIROC6 در ماه‌های می، جولای و اکتبر و مدل MRI-EMS2-0 در ماه‌های آوریل، مارس و آگوست بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی دمای منطقه داشته‌اند. بنابراین، مدل‌های MIROC6 و MRI-EMS2-0 عملکرد ماهانه بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در شبیه‌سازی دما داشته‌اند. همچنین مدل CAMS-CSM1-0 در ماه‌های می و ژوئن، مدل CMCC-ESM2 در ماه اکتبر، مدل GFDL-ESM4 در ماه‌های ژانویه و جولای، مدل HadGEM3-GC31-LL در ماه‌های فوریه، آوریل، آگوست، سپتامبر، نوامبر و دسامبر و مدل MRI-EMS2-0 در ماه مارس بهترین دقت را در شبیه‌سازی بارش دوره تاریخی از خود نشان داده‌اند. بنابراین، مدل HadGEM3-GC31-LL در شش ماه از سال، بهترین عملکرد را در برآورد بارش

ماهانه منطقه مطالعاتی طی دارا می‌باشد. در حالت کلی، دقت مدل‌های AOGCM در نواحی پرباران حوضه نسبت به نواحی خشک‌تر آن بالاتر بود. با این وجود در خصوص دقت این مدل‌ها در برآورد دما، اختلاف چندانی میان نواحی گرم‌تر و سردتر حوضه وجود نداشت. همچنین نتایج نشان می‌دهند که توانایی مدل‌های AOGCM برای شبیه‌سازی دما در منطقه به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی بارش بوده است. بر این اساس باید قبل از شبیه‌سازی دما و بارش در دوره آتی در منطقه مورد مطالعه، بهترین مدل انتخاب و از نتایج آن در مطالعات هواشناسی و هیدرولوژیکی استفاده نمود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Climate Change
2. Greenhouse Gases
2. Atmosphere-Ocean General Circulation Models
4. Emission Scenarios
5. Inter-governmental Panel on Climate Change
6. The Sixth Phase of the Coupled Model Intercomparison Project
7. Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution
8. Kling-Gupta
8. Root Mean Square Error
9. Pearson Correlation Coefficient

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- 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.
- 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).
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Final Draft Report of Working Group I*, Stockholm, Sweden
- 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.
- Lovino, M.A., Müller, O.V., Berbery, E.H., & Müller, G.V. (2018). Evaluation of CMIP5 retrospective simulations of temperature and precipitation in northeastern Argentina. *International Journal of Climatology*, 38, 1158-1175.
- 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.
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J., & Meehl, G.A. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
- Ongoma, V., Chen, H., & Gao, C. (2019). Evaluation of CMIP5 twentieth century rainfall simulation over the equatorial East Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3), 893-910.
- Parker, W.S. (2013). Ensemble modeling, uncertainty and robust predictions. *Wiley interdisciplinary reviews: Climate change*, 4(3), 213-223.

- Patil, S.D., & Stieglitz, M. (2015). Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology*, 525, 409-417.
- Ramanathan, V., & Feng, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric environment*, 43(1), 37-50.
- Werndl, C. (2016). On defining climate and climate change. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 67(2), 337-364.
- Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 250, 105369.
- Zamani, R., & Berndtsson, R. (2019). Evaluation of CMIP5 models for west and southwest Iran using TOPSIS-based method. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 533-543.
- 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.