



Analyzing the Capability of CMIP6 and ISIMIP Models in Forecasting Maximum Temperature (Case Study: Tabas Meteorological Station)

Seyyede Zahra Hoseini¹ | Mohammad Fouladi Nasrabad² | Amir Hosein Ramazani Feriz³ | Mehdi Dastourani⁴

1. B.Sc. Graduated in Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
2. Ph.D. Candidate in Water Resources, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
3. M.Sc. Student in Water Resources, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
4. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

Corresponding Author: Mdastourani@birjand.ac.ir

Received:
10 September 2025

Accepted:
13 September 2025

Published:
22 September 2025

Keywords:

*Climate change,
Emission scenario,
Bias correction,
Global climate models.*

Extended abstract

Introduction

Climate change, as one of the most pressing environmental challenges of the 21st century, exerts widespread impacts on global temperatures, resulting in increases in both maximum and minimum temperatures and alterations in precipitation patterns. Accurate projections of these changes are particularly critical for water resources management in arid and semi-arid regions. Global Climate Models (GCMs), developed under initiatives such as the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), serve as essential tools for simulating future climate conditions; however, raw outputs are often constrained by systematic biases and spatial heterogeneity, especially at local scales. Projects such as the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) have been implemented to correct these biases, providing datasets that are more consistent with local observations. The present study aims to evaluate and compare the performance of two prominent climate models, IPSL-CM6A-LR and MPI-ESM1-2-HR, in reproducing maximum temperatures using both raw CMIP6 outputs and ISIMIP bias-corrected data.

Cite this article: Hoseini, Z., Fouladi Nasrabad, M., Ramezani Feriz, A.H. & Dastourani, M. (2025). Analyzing the Capability of CMIP6 and ISIMIP Models in Forecasting Maximum Temperature (Case Study: Tabas Meteorological Station). *Journal of Aquifer and Qanat*, 6 (1), 149-166. DOI: <http://10.22077/jaaq.2025.10067.1123>.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Based on the results, projections of maximum temperature were conducted using the best-performing model under the SSP5-8.5 scenario, representing a high greenhouse gas emission pathway through the mid-21st century.

Materials and Methods

Monthly maximum temperature data from 1990 through 2014 were used as the baseline period, divided into calibration (1990–2007) and validation (2008–2014) phases. To downscale the maximum temperature parameter, a bias-correction method based on quantile mapping was implemented in R using the Qmap package. Outputs from two global climate models—IPSL-CM6A-LR (CMIP6) and MPI-ESM1-2-HR (ISIMIP)—were assessed. Model performance was evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE) and Kling–Gupta Efficiency (KGE) statistics, and the superior model was selected through a weighted-ranking approach.

Results and Discussion

The evaluation results indicated that ISIMIP models outperformed the raw CMIP6 models. Accordingly, the best-performing ISIMIP model was employed to simulate maximum temperature changes for the period 2030–2050 under the SSP5-8.5 scenario at Tabas station. The outputs of these simulations, presented in Figure 1, demonstrate a clear upward trend in maximum temperatures at the station. During the observational period, both MPI and IPSL models reproduced the seasonal cycle with a mean maximum temperature of 29.08°C, corresponding to the observed average. In the future period, the MPI model showed an increase of 0.57°C, reaching 29.65°C, while the IPSL model increased by 1.34°C, reaching 30.42°C. These results indicate a continued warming trend at Tabas station and confirm the intensification of future climate change in the region.

Comparison of MPI and IPSL Models: Baseline vs. Future

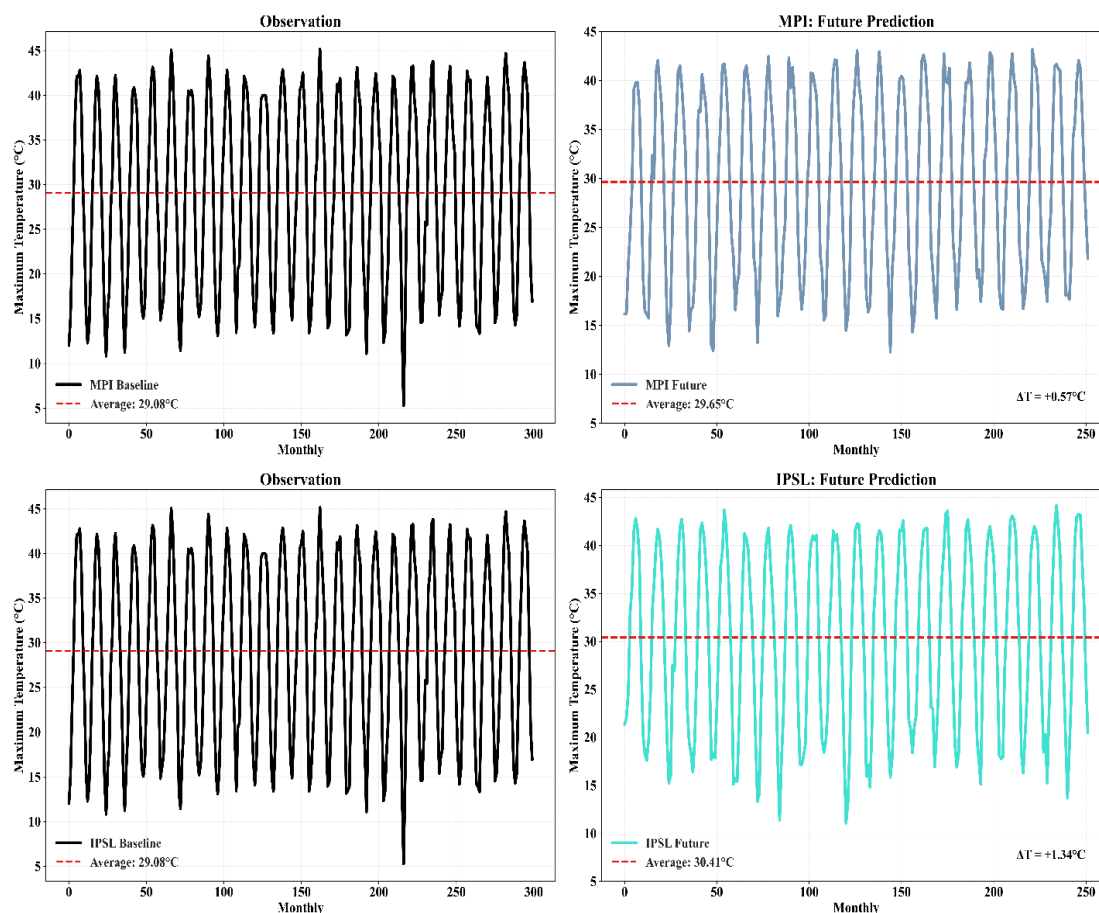


Fig 1. Estimated Maximum Temperature Values Under The SSP5-8.5 Emission Scenario Using The Best-Performing ISIMIP Model

Conclusion

This research highlights the importance of using high-accuracy models in localized climate studies, especially in arid and semi-arid regions. The findings provide a basis for developing future climate scenarios, assessing the impacts of global warming, and designing targeted adaptation strategies for vulnerable areas.



تحلیل قابلیت مدل‌های CMIP6 و ISIMIP در پیش‌برآورد دمای بیشینه (مطالعه موردی: ایستگاه هواشناسی طبس)

سیده زهرا حسینی^۱ | محمد فولادی نصرآباد^۲ | امیرحسین رضائی فریز^۳ | مهدی دستورانی^۴ ✉

۱. دانش آموخته مقطع کارشناسی علوم و مهندسی آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.
۲. دانشجوی دکتری، گرایش منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.
۴. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

✉ نویسنده مسئول: Mehdi840561@gmail.com

چکیده

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست و یکم، اثرات گسترده‌ای بر دمای کره زمین دارد. در پژوهش حاضر، به‌منظور بازتولید متغیر دمای بیشینه، از داده‌های ایستگاه هواشناسی طبس در بازه سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ در مقیاس ماهانه استفاده شد. به‌طوری‌که سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۷ برای بخش واسنجی و سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ برای بخش اعتبارسنجی در نظر گرفته شدند. برای بررسی پارامتر دمای بیشینه، از روش آماری تصحیح خطا (نگاشت چارکی) در محیط نرم‌افزار R و با کمک بسته Qmap بهره گرفته شد. همچنین برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، شاخص‌های RMSE و KGE به کار رفتند و مدل برتر از طریق روش وزن‌دهی انتخاب گردید. در این راستا، خروجی دو مدل اقلیمی جهانی IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2-HR از پروژه‌های CMIP6 (داده‌های خام) و ISIMIP (داده‌های تصحیح‌اریبی‌شده) مورد تحلیل قرار گرفت و عملکرد آن‌ها در بازتولید دمای بیشینه مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل‌های زیرمجموعه ISIMIP نسبت به CMIP6 عملکرد بهتری داشتند. بر همین اساس، مدل برتر ISIMIP برای شبیه‌سازی تغییرات دمای بیشینه در دوره آتی ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ تحت سناریوی انتشار با سطح بالای گازهای گلخانه‌ای (SSP5-8.5) به کار گرفته شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده تداوم روند افزایشی دمای بیشینه در منطقه است که می‌تواند پیامدهایی همچون افزایش تنش‌های حرارتی، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش تغذیه آبخوان را در پی داشته باشد که در نهایت به افت سطح آب زیرزمینی و تشدید تنش آبی منجر می‌گردد. با وجود تفاوت عملکرد مدل‌ها، نتایج همواره با سطحی از عدم قطعیت همراه است که باید در تحلیل‌ها مورد توجه قرار گیرد. این پژوهش نخستین مطالعه‌ای است که در منطقه طبس عملکرد مدل‌های CMIP6 و ISIMIP را در بازتولید دمای بیشینه مقایسه می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

کلیدواژه‌ها:

تغییر اقلیم،

سناریوی انتشار،

اصلاح اریبی،

مدل‌های اقلیمی جهانی.

مقدمه

انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط فعالیت‌های بشر یکی از مهم‌ترین علل تغییرات آب و هوایی و گرمایش جهانی می‌باشد. تغییر اقلیم بیانگر تغییر مشخص در الگوهای مورد انتظار برای وضعیت میانگین آب و هوایی طولانی مدت در یک منطقه خاص است؛ به بیان دیگر، تغییر اقلیم نشان دهنده تغییرات غیر عادی در اقلیم درون اتمسفر زمین و پیامدهای ناشی از آن در قسمت‌های مختلف کره زمین می‌باشد. این تغییرات منجر به وقوع پدیده‌هایی همچون افزایش دما بیشینه و کمینه، تغییر در الگوهای بارش و تغییرات در فرکانس و شدت پدیده‌های اقلیمی همچون خشک‌سالی و سیلاب می‌شود (Amirabadi Zadeh et al., 2019; IPCC, 2021; Pedersen et al., 2022). در پاسخ به این چالش، مدل‌های اقلیمی جهانی (GCMs) در قالب پروژه‌هایی همچون CMIP^۱ توسعه یافته‌اند (Zhang et al., 2021). ارزیابی کارایی مدل‌های CMIP6 را برای شبیه‌سازی دما و بارش خینچیانگ چین با استفاده از ۴۲ مدل طی دوره‌ی آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۴ پیش‌نگری کردند. نتایج آنان نشان داد که مدل‌های SDMS^۲ برای شبیه‌سازی دما خطای کمتری نسبت به بارش دارند و بارش سالانه و فصلی عموماً بیش از حد انتظار تخمین زده می‌شوند. میش را و همکاران (Mishra et al., 2020) با هدف بهبود دقت داده‌های پارامتر دما، خروجی ۱۳ مدل اقلیمی جفت شده CMIP6 را برای جنوب آسیا با استفاده از روش EQM^۳ مورد تصحیح اریبی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که پس از تصحیح، بازتولید الگوهای متغیر دما در بازه‌های زمانی تاریخی و آینده به‌طور قابل توجهی ارتقا یافته‌است. هم‌چنین نتایج حاصل از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP126 و

SSP585 نشان دهنده افزایش میانگین دمای بیشینه و دمای کمینه در آینده است. پژوهش‌های انجام‌گرفته در ایران نیز بیانگر روند کاهشی بارش، روند افزایشی دما و کاهش منابع آبی تحت اثر تغییر پارامترهای اقلیمی بوده‌اند (Fallah-Ghalhari et al., 2019; Sharafati et al., 2020; Zarrin et al., 2021; Ansari et al., 2022).

تحلیل‌های آماری (Rahimzadeh et al., 2019) حاکی از آن است که دمای بیشینه در ایران طی دهه‌های اخیر با نرخ متوسط ۰/۲۳ درجه سلسیوس در هر دهه افزایش یافته‌است؛ روندی معنادار که در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی کشور، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مشاهده شده و بیانگر تشدید گرمایش اقلیمی در مقیاس ملی است. جهان‌گیری و روزبهانی (Jahangir & Rouzbahani, 2022) برآورد بلندمدت تغییرات عوامل آب و هوایی ایستگاه سینوپتیک بروجرد را با استفاده از نرم‌افزار SDSM پیش‌نگری کردند. نتایج به‌دست آمده از مدل CanESM2 نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها بارش دارای روند کاهشی و متغیرهای دما، دمای کمینه و بیشینه در تمامی سناریوهای مورد مطالعه در این پژوهش نسبت به دوره پایه روند افزایشی خواهد داشت (Vaghefi et al., 2019). به ارزیابی آینده‌ی تغییرات اقلیمی در ایران با استفاده از خروجی پنج مدل اقلیمی با وضوح بالا و تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6) پرداختند. نتایج نشان داد که دمای بیشینه در سراسر ایران روندی افزایشی خواهد داشت و این روند در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در شرق ایران، چشم‌گیرتر خواهد بود. عبدالعزیز و همکاران (Abdolizadeh et al., 2022) دقت مدل‌های CMIP 6 برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه را ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج به‌دست آمده بین داده‌های دمای

^۱ Coupled Model Intercomparison Project^۲ Species Distribution Models^۳ Empirical Quantile Mapping

مشاهداتی و تصحیح شده رابطه خطی قوی و بین داده‌های بارش مشاهداتی و تصحیح شده رابطه خطی ضعیف برقرار است. بنابراین دقت مدل‌های مورد مطالعه در شبیه‌سازی دما مناسب و در شبیه‌سازی بارش به‌ویژه در مدل CMCC-ESM2 ضعیف ارزیابی شده است. میان‌آبادی و همکاران (Mianabadi et al., 2023) با بهره‌گیری از داده‌های اصلاح‌اریبی شده مدل‌های اقلیمی CMIP 6 به بررسی تغییرات توزیع پارامترهای دما و بارش در ایستگاه همدیدی کرمان طی دوره پایه ۱۹۶۵ تا ۲۰۱۴ پرداختند. در این پژوهش، بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی این دو متغیر در سال‌های (۲۰۵۱-۲۱۰۰) بر مبنای سناریوهای مختلف اقلیمی (RCP 4.5, RCP 2.6, RCP 8.5) انتخاب شدند. نتایج بررسی روند تغییرات بارش نشان داد که احتمال افزایش وقوع بارش‌های حدی از نظر آماری انتظار نمی‌رود. همچنین روند افزایشی دما بیانگر افزایش احتمال وقوع تنش‌های حرارتی در آینده، به‌ویژه در ماه‌های گرم سال می‌باشد. در مطالعه‌ای زارعیان (Zareian et al., 2022) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات دما و بارش در چهار ایستگاه سینوپتیک استان یزد پرداخته شد. بدین‌منظور، ترکیبی از خروجی‌های جدیدترین مدل‌های جفت‌شده عمومی اتمسفری- اقیانوسی (AOGCM) که در گزارش ششم ارزیابی (CMIP6) ارائه شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفت. برای ترکیب این مدل‌ها، از روش وزن‌دهی بر اساس شاخص ترکیبی کلینگ-گوپتا (KGE) بهره گرفته شد. پس از وزن‌دهی مدل‌ها، مقدار تغییرات ماهانه دما و بارش در هر ماه بر اساس سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP245، SSP126 و SSP585 محاسبه شده و با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG سری زمانی روزانه داده‌های دما و بارش ۴ ایستگاه سینوپتیک استخراج شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های CanESM5 و BCC-CSM2-MR به‌ترتیب بیشترین

توانایی را در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی در تمامی ایستگاه‌های مختلف هواشناسی دارا هستند. همچنین در تمامی سناریوهای انتشار، دمای سالیانه افزایش و بارندگی سالیانه کاهش پیدا خواهد کرد. ایران‌شاهی و همکاران (Iranshahi et al., 2023) به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های آینده در ایستگاه‌های خرم‌شهر و الشتر پرداختند. بدین‌منظور از خروجی مدل گردش عمومی MRI-ESM2 و سناریوهای انتشار SSP1.2.6، SSP2.4.5، SSP3.7.0، SSP5.8.5 استفاده شد. نتایج آنان نشان داد که دمای بیشینه و دمای کمینه نسبت به دوره مشاهداتی در تمام سناریوهای SSP روند افزایشی و تغییرات دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه بیشتر خواهد بود. همچنین در آینده نزدیک (۲۰۶۲-۲۰۲۳) میانگین بارش سالانه ایستگاه الشتر بین ۰/۳ تا ۱۶ درصد و ایستگاه خرم‌آباد بین ۷ تا ۱۲ درصد تحت سناریوهای SSP کاهش خواهد داشت در آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۳) نیز میانگین بارش سالانه ایستگاه الشتر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد و ایستگاه خرم‌آباد بین ۱۲ تا ۲۴ درصد تحت سناریوهای SSP کاهش خواهد داشت. خواجه‌امیری خالدی و همکاران (Khajeh Amiri Khaledi et al., 2022) به ارزیابی دقت ۱۱ مدل اقلیمی از مجموعه مدل‌های CMIP 6 در بازتولید متغیرهای اقلیمی در سواحل مکران (چابهار و جاسک) طی دوره تاریخی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ پرداختند. نتایج نشان داد که متغیرهای دمایی (میانگین، بیشینه و کمینه) هم‌بستگی قابل قبولی با داده‌های مشاهداتی دارند، در حالی که متغیرهایی مانند بارش، باد و رطوبت نسبی از دقت پایین‌تری برخوردار بودند. همچنین، مدل‌های IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2-HR از میان مدل‌های ارزیابی‌شده، در زمره مدل‌های منتخب قرار گرفتند. در نهایت، مدل‌های همادی مبتنی بر میانگین وزنی نسبت به مدل‌های منفرد، عملکرد دقیق‌تری در بازتولید متغیرهای

در ادامه این تلاش‌ها، لانگه (Lange, 2020) نسخه پیشرفته‌تری از فرآیند اصلاح اریبی تحت عنوان ISIMIP3BASD را ارائه کرد. این نسخه برای داده‌های مدل‌های CMIP 6 طراحی شد و علاوه بر حفظ روند زمانی، بر حفظ ساختار مکانی و زمانی داده‌ها نیز تمرکز ویژه‌ای داشت. روش ISIMIP3BASD با بهبود الگوریتم Quantile Mapping، تلاش کرد ضمن کاهش اریبی آماری، انسجام بین متغیرهای اقلیمی مختلف و ارتباط مکانی آن‌ها را حفظ کند. این نوآوری موجب شد داده‌های اصلاح‌شده ISIMIP3b دقت بالاتری در مطالعات اقلیمی محلی و منطقه‌ای داشته باشد.

از مرور مطالعات مختلف در زمینه تغییرات اقلیمی و ارزیابی مدل‌های CMIP6، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات اقلیمی در ایران و سایر مناطق جهان تأثیرات قابل توجهی بر دما و بارش دارند. بیشتر مطالعات نشان‌دهنده روند افزایشی دما و کاهش بارش در آینده هستند که به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، به‌شدت ملموس است. مدل‌های CMIP6، اگرچه در شبیه‌سازی دما به‌دقت بالایی دست یافته‌اند، اما در شبیه‌سازی بارش‌ها، به‌ویژه در مقیاس‌های محلی و برای متغیرهایی مانند بارش، هنوز با چالش‌هایی همچون اریبی‌های آماری و ناهمگنی مکانی مواجه هستند.

همچنین، روش‌های ترکیبی و اصلاح اریبی مانند ISIMIP3b برای بهبود دقت مدل‌ها در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای توسعه یافته‌اند. به‌طور کلی، این مطالعات اهمیت استفاده از مدل‌های اقلیمی اصلاح‌شده برای پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات اقلیمی در آینده را نشان می‌دهند، به‌ویژه در مقیاس‌های محلی که متغیرهایی چون دما و بارش تغییرات بیشتری دارند. به همین منظور، هدف این پژوهش ارزیابی و مقایسه دقت مدل‌های اقلیمی جهانی IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2-HR در بازتولید متغیر دمای بیشینه ایستگاه هواشناسی طبس با

اقلیمی از خود نشان دادند، که بر ضرورت بهره‌گیری از روش‌های ترکیبی در تحلیل‌های اقلیمی تأکید می‌کند (Izadi et al., 2023). با هدف بررسی تغییرات دمای هوای شهرستان طبس و با استفاده از داده‌های مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و مدل اقلیمی CanESM از پروژه CMIP 6 با ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها از طریق مدل آماری SDSM و اعمال سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، نتیجه گرفتند تا پایان قرن حاضر میانگین دمای هوای طبس به‌ترتیب حدود ۳/۲ و ۴/۷ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در مدل‌سازی اقلیمی و استفاده گسترده از خروجی مدل‌های CMIP6 در مطالعات جهانی و منطقه‌ای، این مدل‌ها همچنان با چالش‌هایی مانند اریبی‌های آماری، ناهمگنی مکانی و ناهم‌آهنگی میان متغیرها به‌ویژه در مقیاس‌های محلی و برای متغیرهای حساس مانند دمای بیشینه مواجه‌اند. این اریبی‌ها می‌توانند منجر به تخمین‌های نادرست و تصمیم‌گیری‌های غیرکارآمد شوند. به همین منظور، پروژه بین‌المللی ISIMIP^۱ با هدف اصلاح اریبی داده‌های اقلیمی مدل‌های CMIP5 و CMIP6، توسعه یافت. در پاسخ به این نیاز لانگه (Lange, 2019) الگوریتمی با عنوان ISIMIP2bASD توسعه داد که مبتنی بر روش Quantile Mapping با حفظ روند زمانی طراحی شد. این الگوریتم با هدف کاهش سوگیری آماری خروجی مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 و در عین حال حفظ روندهای بلندمدت مانند گرمایش جهانی ارائه شد. داده‌های حاصل از این روش، بستر قابل اعتمادی را برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای فراهم کرد.

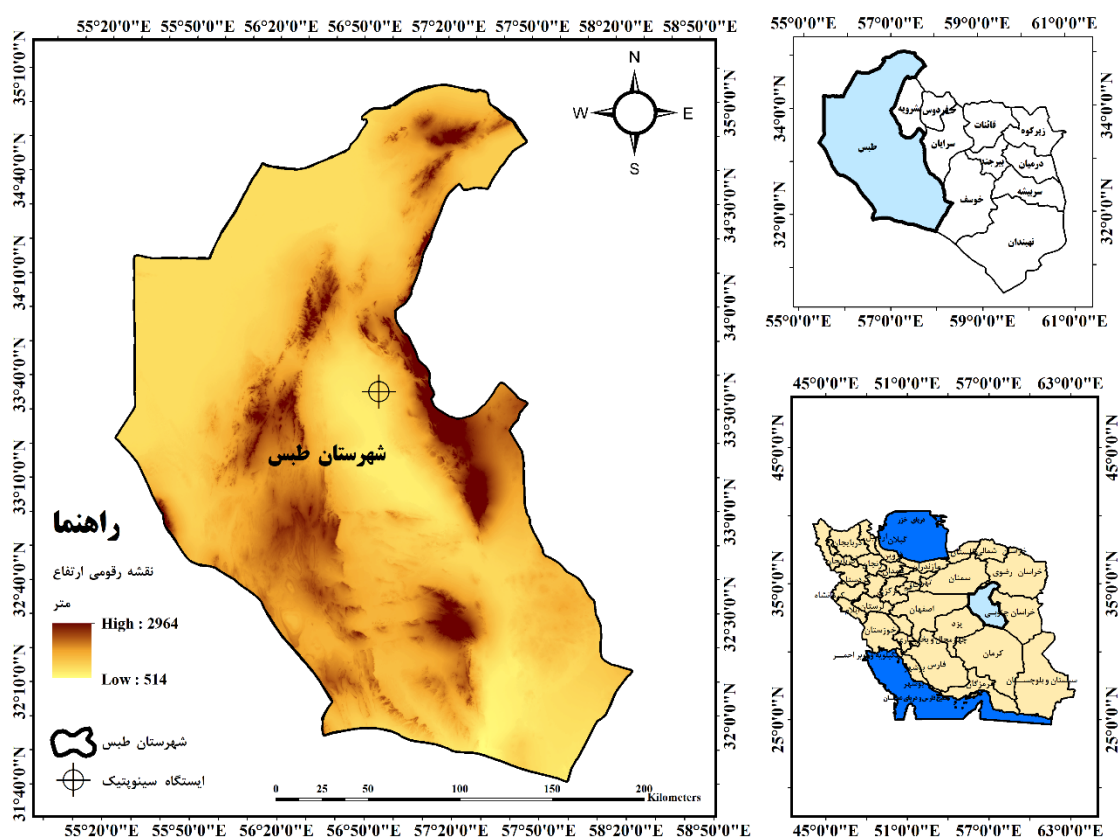
^۱ Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project

شهرستان طبس واقع در استان خراسان جنوبی با ۵۵۴۶۴ کیلومتر مربع وسعت در مدار ۳۳ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی و نصف‌النهار ۵۶ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی قرار گرفته و جزء مناطق کویری با آب و هوای خشک و قاره‌ای محسوب می‌شود. حداکثر درجه حرارت شهرستان طبس در تابستان ۴۹+ درجه سانتی‌گراد و در فصل زمستان تا ۵- درجه سانتی‌گراد کاهش میابد (Izadi et al., 2023). به‌منظور پیش‌برد اهداف این پژوهش از اطلاعات دمای ماهانه ایستگاه هواشناسی طبس در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره پایه استفاده شد. موقعیت جغرافیایی شهرستان طبس و مشخصات ایستگاه هواشناسی محدوده مورد مطالعه به‌ترتیب در جدول و شکل شماره ۱ نشان داده شده‌است.

بهره‌گیری از مجموعه داده‌های خام پروژه CMIP6 و داده‌های تصحیح‌شده پروژه ISIMIP3b می‌باشد. در این راستا، دقت شبیه‌سازی‌های مدل‌های مورد بررسی از طریق مقایسه داده‌های حاصل از این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی و تصحیح‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این پژوهش با استفاده از روش‌های نوین اصلاح اریبی، سعی در بهبود دقت پیش‌بینی‌های دما و فراهم آوردن نتایج دقیق‌تری در مقیاس‌های محلی دارد. همچنین، انتظار می‌رود که نتایج این تحقیق بتواند به بهبود استفاده از مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی تغییرات دمایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران کمک کند.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Location of The Study Area

جدول ۱. مشخصات ایستگاه هواشناسی طبس
Table 1. Tabas Weather Station Specifications

ایستگاه Station	طول جغرافیایی (درجه) Longitude (°)	عرض جغرافیایی (درجه) Latitude (°)	ارتفاع از سطح دریا (متر) Elevation (m a.s.l.)	میانگین سالیانه دمای بیشینه (گراد)(درجه سانتی Mean Annual Maximum Temperature (°C)	دوره آماری Statistical Period
طبس Tabas	56.55	33.36	711	13.29	1990-2014

یکی از رایج‌ترین این روش‌ها، نگاشت چارکی (Quantile Mapping) است که با هم‌ترازسازی توزیع مقادیر مدل و مشاهدات، خطاها را کاهش می‌دهد (Maraun, 2016; Gudmundsson et al., 2012). خروجی مدل‌های CMIP6 از نظر ماهیت، داده‌های خامی با تفکیک مکانی پایین ارائه می‌دهند که به دلیل خطاهای سیستماتیک نیاز به پردازش جهت اصلاح این خطاها دارند. در مقابل، مدل‌های ISIMIP نسخه‌های اصلاح‌شده CMIP6 هستند که با تصحیح اریبی و بهبود تفکیک مکانی، داده‌هایی دقیق‌تر و سازگارتر با مشاهدات محلی فراهم می‌کنند. این ویژگی‌ها مدل‌های ISIMIP را برای تحلیل‌های محلی و منطقه‌ای مناسب‌تر می‌سازد (Lange, 2020). هم‌چنین لازم به ذکر است که داده‌های اقلیمی مورد نیاز برای CMIP6 از سایت <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6> و گروه ISIMIP از سایت <https://www.isimip.org> استخراج گردید. جدول شماره ۲ مشخصات این مدل‌ها را نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی و مقایسه توانایی مدل‌های اقلیمی جهانی IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2-HR در بازتولید متغیر دمای بیشینه از مجموعه داده‌های خام پروژه CMIP6 و مجموعه داده‌های اصلاح شده مرتبط با پروژه ISIMIP استفاده شد. این دو مدل اقلیمی جهانی به دلیل عملکرد مناسب در بازتولید پارامترهای دمایی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، بر پایه‌ی مطالعات پیشین از جمله پژوهش (Khajeh Amiri Khaledi et al., 2022) انتخاب گردید. مدل‌های اقلیمی به دلیل محدودیت در نمایش فرآیندهای فیزیکی جو و هم‌چنین به‌کارگیری تقریب‌ها و داده‌های اولیه، اغلب دچار خطاهای سیستماتیک هستند؛ یعنی مقادیر شبیه‌سازی‌شده به‌طور پیوسته بیش یا کم از مقادیر مشاهداتی انحراف دارند. برای کاهش این خطاها از روش‌های آماری تحت عنوان تصحیح اریبی استفاده می‌شود. این روش‌ها با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی در یک دوره مشترک، انحرافات را اصلاح کرده و داده‌های مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌سازند.

جدول ۲. مشخصات مدل‌های IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2-HR
Table 2. Specifications of IPSL-CM6A-LR and MPI-ESM1-2-HR models

ردیف Row	مدل Model	قدرت تفکیک (درجه) Resolution	محدوده جغرافیایی Geographical Coverage	توسعه‌دهنده Developer	حوزه مطالعاتی Study Area
1	CMIP6 -IPSL-CM6A-LR	1.25×1.25	جهانی Global	مؤسسه پیر سیمون لاپلاس Pierre-Simon Laplace Institute	پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، وضعیت دما و بارش Climate change projections, temperature and precipitation

شبه‌سازی تغییرات اقلیمی، مدل‌سازی جهانی Climate change simulation, global modeling	مؤسسه ماکس پلانک Max Planck Institute	جهانی Global	0.25×0.25	CMIP6-MPI-ESM1-2-HR	2
تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب Climate change impacts on water resources	پیر سیمون لاپلاس Pierre-Simon Laplace Institute	جهانی Global	1.87×1.87	ISIMIP- IPSL-CM6A-LR	3
شبه‌سازی‌های هیدرولوژیک و ارزیابی ریسک‌های اقلیمی Hydrological simulations and climate risk assessment	مؤسسه ماکس پلانک Max Planck Institute	جهانی Global	0.5×0.5	ISIMIP-MPI-ESM1-2-HR	4

سیاست‌های مؤثر زیست‌محیطی است که منجر به افزایش سریع غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو می‌شود پیامد چنین روندی، افزایش قابل توجه دمای جهانی تا پایان قرن بیست‌ویکم و بروز آثار اقلیمی شدید از جمله موج‌های گرمای طولانی‌تر، خشکسالی‌های شدیدتر و تغییرات شدید در الگوهای بارش خواهد بود. این سناریو اغلب در مطالعات آسیب‌پذیری و مخاطرات اقلیمی به‌عنوان حالت بدبینانه مورد استفاده قرار می‌گیرد و امکان تحلیل حداکثری اثرات تغییر اقلیم در صورت عدم مداخله سیاستی را فراهم می‌سازد.

تصحیح اریبی

در این پژوهش، برای کاهش اریبی سیستماتیک مدل‌های اقلیمی در بازتولید دمای بیشینه از روش نگاشت چارکی (Quantile Mapping) و با استفاده از الگوریتم نگاشت قطعه‌ای بهره گرفته شد. در این رویکرد، توزیع آماری مقادیر مدل اقلیمی به‌صورت گام‌به‌گام در چارک‌های مختلف با توزیع داده‌های مشاهداتی هم‌تراز می‌شود. به‌عبارت دیگر هدف آن است که برای هر مقدار

اگرچه جدول ۲ ویژگی‌های عمومی مدل‌های اقلیمی را نشان می‌دهد، اما توجه به نقاط قوت و محدودیت‌های آن‌ها به‌ویژه در شرایط اقلیمی ایران حائز اهمیت است. به‌عنوان نمونه، مدل‌های CMIP6 با وجود پوشش گسترده زمانی و مکانی، به‌دلیل تفکیک مکانی نسبتاً پایین و وجود خطاهای سیستماتیک، نیازمند روش‌های اصلاح اریبی پیشرفته هستند. در مقابل، داده‌های پروژه ISIMIP به‌دلیل اعمال اصلاح اریبی و بهبود تفکیک مکانی، همخوانی بیشتری با مشاهدات محلی در ایستگاه‌هایی مانند طبس دارند. با این حال، این داده‌ها نیز به‌طور کامل از عدم قطعیت مصون نیستند و استفاده از آن‌ها در تحلیل‌های محلی باید همراه با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها صورت گیرد.

سناریوهای انتشار SSP

در این پژوهش، از سناریوی اقلیمی SSP5.8.5 به‌عنوان نماینده‌ای از مسیرهای شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده شد. این سناریو بیانگر جهانی با رشد اقتصادی بالا، اتکای شدید به سوخت‌های فسیلی، و نبود

Q_s ، پارامتر شبیه‌سازی شده‌است (Fouladi Nasrabad et al., 2024).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_o - Q_s)^2} \quad (2)$$

شاخص KGE

شاخص کلینگ^۱ و گوپتا^۲ (KGE) یکی از جدیدترین شاخص‌های ارزیابی می‌باشد که توسط گوپتا و همکاران (Gupta et al., 2009) ارائه گردیده و در حقیقت تغییر یافته شاخص نش‌ساتکلیف می‌باشد. رابطه (۳) نحوه محاسبه شاخص KGE را نشان می‌دهد، که در آن cc ضریب هم‌بستگی خطی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، α نسبت انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و β نسبت میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده به میانگین داده‌های مشاهداتی می‌باشد. همان‌طور که از رابطه مشخص است مقدار ایده‌آل این معیار برابر یک می‌باشد و هر چه از یک دورتر باشد بیانگر عملکرد پایین مدل می‌باشد.

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (3)$$

به‌منظور اعمال وزن‌دهی و تعیین مدل برتر، پس از محاسبه مقادیر شاخص‌های ارزیابی به رتبه‌بندی مدل‌ها براساس برتری در هر یک از شاخص‌های ارزیابی پرداخته و در پایان به‌منظور تعیین وزن نهایی هر مدل از رابطه (۴) استفاده گردید (Dowlatabadi et al., 2022).

$$1 - \frac{(\text{مجموع رتبه شهرهای مدل})}{(\text{تعداد شاخص‌های ارزیابی} \times \text{تعداد مدل‌ها})} = \text{وزن هر مدل} \quad (4)$$

نتایج و بحث

به‌منظور بررسی و تحلیل عملکرد مدل‌های اقلیمی جهانی، داده‌های ماهانه دمای بیشینه ایستگاه هواشناسی طبس طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ مورد استفاده قرار گرفت.

شبیه‌سازی شده توسط مدل، مقدار متناظر آن در توزیع مشاهداتی استخراج شود تا رفتار آماری مدل به واقعیت نزدیک‌تر گردد. ساختار ریاضی این فرایند به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{obs}^{-1}(F_{mod}(X_{mod})) = X_{corr} \quad (1)$$

که در آن F_{obs}^{-1} تابع صدک معکوس مربوط به توزیع داده‌های مشاهداتی، F_{mod} تابع توزیع تجمعی تجربی برای مقادیر مدل، X_{mod} مقدار اولیه شبیه‌سازی شده توسط مدل اقلیمی و X_{corr} مقدار نهایی اصلاح شده که جایگزین مقدار اولیه مدل می‌گردد.

با اعمال این نگاشت، ساختار آماری خروجی مدل اقلیمی به داده‌های واقعی نزدیک‌تر شده و دقت بازتولید مقادیر اقلیمی افزایش می‌یابد. برای بهبود تطابق آماری میان داده‌ها، از تابع انتقال نمایی نامتقارن (expasymp) استفاده شد که برای مدل‌سازی دقیق داده‌هایی با توزیع چوله -مانند دما- مناسب‌تر است. همچنین، تابع هزینه‌ی مورد استفاده برای برازش، مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها (RSS) انتخاب گردید تا برازش بهینه و با کمترین خطای ممکن بین توزیع‌های مدل و مشاهدات حاصل شود و نگاشت چارکی با گام‌بندی دقیق ۰/۰۱ (یک درصدی) انجام شد. در مرحله نهایی، پس از برازش، از روابط حاصل برای تبدیل داده‌های مدل به مقادیر اصلاح‌شده استفاده شد، به‌گونه‌ای که ساختار آماری آن‌ها با داده‌های مشاهده‌ای منطبق گردد، در حالی که روند زمانی و انسجام مکانی داده‌ها حفظ شود (Lange, 2020).

شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در پژوهش

به‌منظور ارزیابی کارایی مدل‌های اقلیمی در بازتولید دمای بیشینه مدل‌ها ایستگاه هواشناسی طبس از شاخص‌های ارزیابی RMSE و KGE استفاده شد. روابط این معیارها به‌ترتیب در رابطه‌های شماره ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است.

شاخص RMSE

مقدار ایده‌آل این شاخص برابر صفر می‌باشد و بیانگر این است که مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده هیچ اختلافی ندارند. رابطه شماره (۲) نحوه محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد که در آن Q_o مقدار مشاهداتی و

^۱Kling

^۲Gupta

شاخص‌های آماری RMSE و KGE مورد سنجش قرار گرفت و در نهایت، مدل برتر از طریق روش وزن‌دهی انتخاب شد. جدول ۳ نتایج ارزیابی و وزن‌دهی مدل اقلیمی‌های را در بازتولید متغیر دمای بیشینه را در دوره واسنجی ارائه می‌دهد.

این بازه زمانی به دو دوره واسنجی (۱۹۹۰-۲۰۰۷) و اعتبارسنجی (۲۰۰۸-۲۰۱۴) تقسیم شد. در این راستا، برای اصلاح اربیبی مدل‌ها از روش نگاشت چارکی با استفاده از کدنویسی در محیط نرم‌افزار R و به کمک بسته نرم‌افزاری Qmap بهره گرفته شد. سپس، کارایی مدل‌ها با

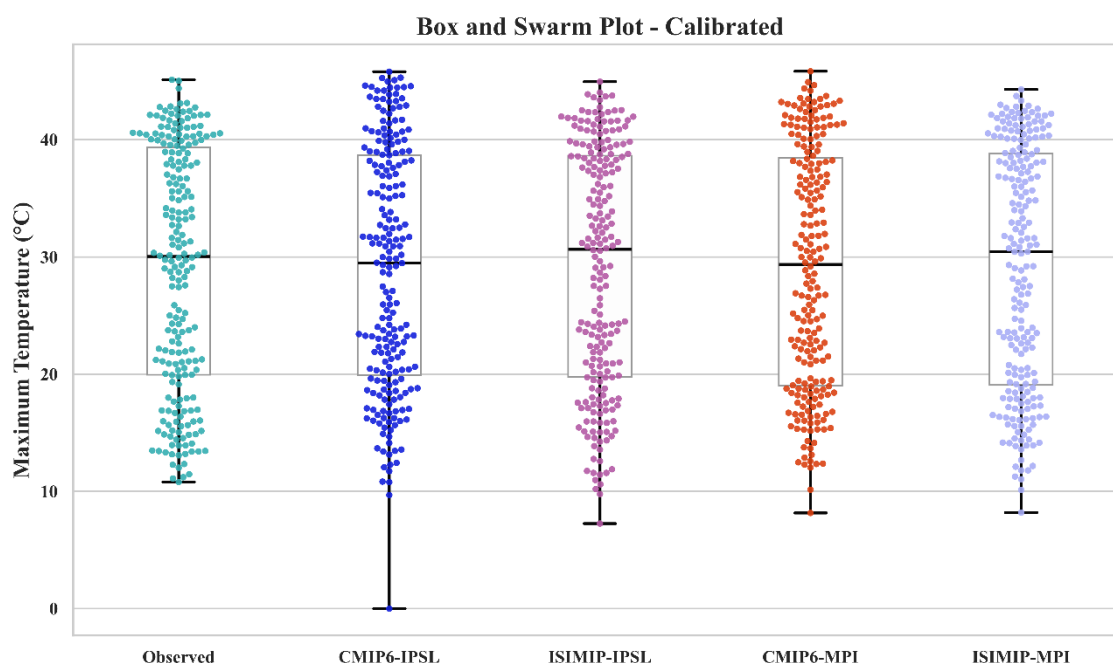
جدول ۳. نتایج وزن‌دهی ارزیابی عملکرد مدل‌های ISIMIP-MPI، ISIMIP-IPSL، CMIP6-MPI و CMIP6-IPSL در دوره واسنجی

Table 3. Weighting results of performance evaluation of ISIMIP-IPSL, ISIMIP-MPI, CMIP6-IPSL, and CMIP6 models in the Calibration period

واسنجی Calibration	RMSE	KGE	رتبه ۱ Rank 1	رتبه ۲ Rank 2	وزن Weight
CMIP6-MPI	2.66	0.97	2	1	0.25
ISIMIP-MPI	2.55	0.97	1	1	0.5
CMIP6-IPSL	3.04	0.96	2	2	2
ISIMIP-IPSL	2.59	0.97	1	1	0.5

وزن‌دهی نیز نشان دهنده آن است که مدل ISIMIP-IPSL با کسب بیشترین وزن ۰/۵، بهترین عملکرد را در میان مدل‌ها در دوره واسنجی به خود اختصاص داده است.

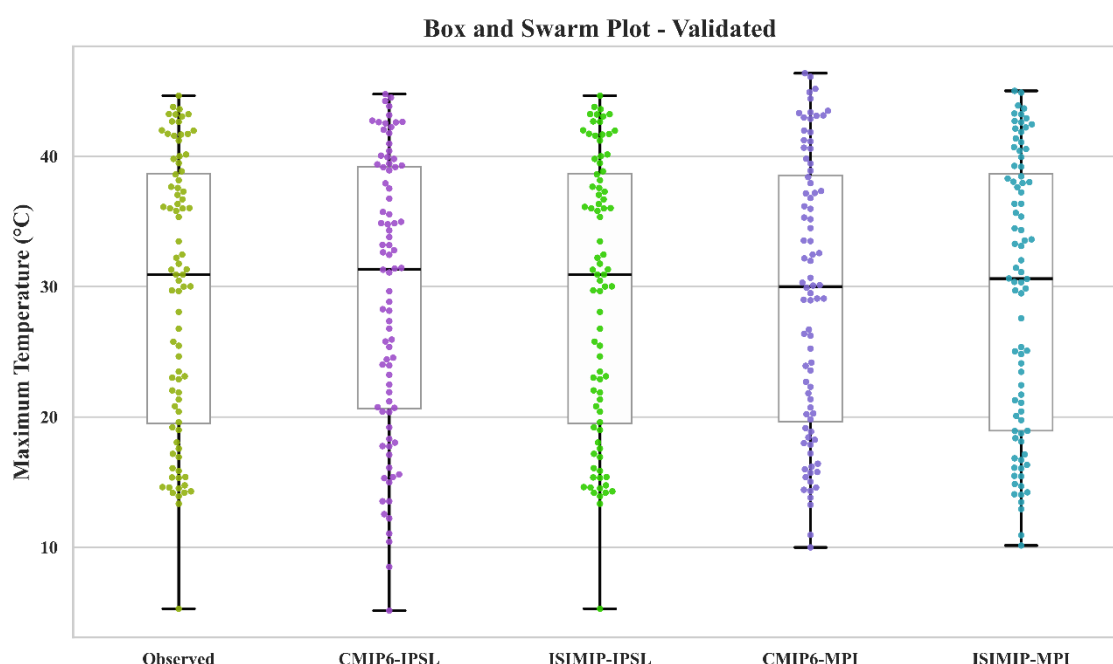
بررسی عملکرد مدل‌ها در دوره واسنجی نشان می‌دهد که در شاخص‌های ارزیابی بهترین عملکرد متعلق به مدل‌های ISIMIP-MPI و ISIMIP-IPSL می‌باشد. نتایج



شکل ۲. ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در بازتولید متغیر دمای بیشینه (نمودار جعبه‌ای و پراکندگی نقطه‌ای) در دوره واسنجی
Fig 2. Comparison of Observed and Simulated Maximum Temperature Distributions During The Calibration Period (Box and Swarm Plot)

پراکندگی کمتری در دامنه بین چارکی خود دارند. از نظر گرایش مرکزی، مدل ISIMIP-MPI با انطباق تقریباً کامل میانه خود با میانه داده‌های مشاهده‌شده، برترین عملکرد را در میان تمامی مدل‌ها به نمایش می‌گذارد. در ادامه ارزیابی جامع مدل‌ها، عملکرد آن‌ها در دوره صحت‌سنجی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی در جدول ۴ و شکل ۳ ارائه شده است.

نتایج دوره واسنجی نشان می‌دهد (شکل شماره ۲) که داده‌های مشاهداتی دامنه‌ای بین ۱۱ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد را پوشش می‌دهند و میانه آن‌ها حدوداً ۳۰ درجه سانتی‌گراد است. در مقایسه خروجی مدل‌های CMIP6، به‌ویژه CMIP6-IPSL دامنه‌ی دمایی وسیع‌تری را با گرایش به سمت مقادیر پایین‌تر در توزیع خود نشان می‌دهد که حاکی از تخمین کمتر مقادیر مرکزی می‌باشد. این در حالی است که مدل‌های ISIMIP



شکل ۳. ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در بازتولید متغیر دمای بیشینه (نمودار جعبه‌ای و پراکندگی نقطه‌ای) در دوره صحت‌سنجی
Fig 3. Comparison of Observed and Simulated Maximum Temperature Distributions During The Validation Period (Box and Swarm Plot)

بیشینه تمامی ابعاد توزیع آماری از جمله میانه، چارک‌ها و مقادیر حدی، به‌شکلی بی‌نقص بر داده‌های مشاهداتی را منطبق کند.

به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های اقلیمی در بازتولید متغیر دمای بیشینه در دوره صحت‌سنجی شاخص‌های آماری میانگین، میانه، انحراف معیار برای خروجی چهار مدل اقلیمی محاسبه و با داده‌های مشاهداتی مقایسه گردید. نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

عملکرد مدل‌های اقلیمی در دوره صحت‌سنجی (شکل ۳) نشان دهنده آن است که مدل‌های CMIP6-IPSL و ISIMIP-IPSL بازتولید گسترده‌ای مشابه از پراکندگی دما را به نمایش می‌گذارند که انعکاسی دقیق از دامنه تغییرات مشاهده‌شده می‌باشد. اگرچه که مدل CMIP6-MPI میانه به‌درستی بازتولید کرده است اما توزیع داده‌های خروجی آن بیش از حد متراکم است که این مانع از نمایش صحیح دامنه کامل تغییرات دما می‌شود در نهایت مدل ISIMIP-MPI توانست در باز تولید دمای

جدول ۴. مقایسه شاخص‌های آماری دمای بیشینه مشاهداتی و خروجی مدل‌ها در دوره صحت‌سنجی

Table 4. Comparison of statistical indicators for observed and simulated maximum temperature data during the validation period

های آماری شاخص Statistical Indices	مشاهداتی Observed	ISIMIP		CMIP6	
		IPSL	MPI	IPSL	MPI
میانگین Mean	28.96	97.28	28.97	28.9	28.97
میانه Median	30.03	30.66	30.45	29.5	29.36
انحراف معیار Standard Deviation (SD)	10.3	10.24	10.26	10.34	10.23

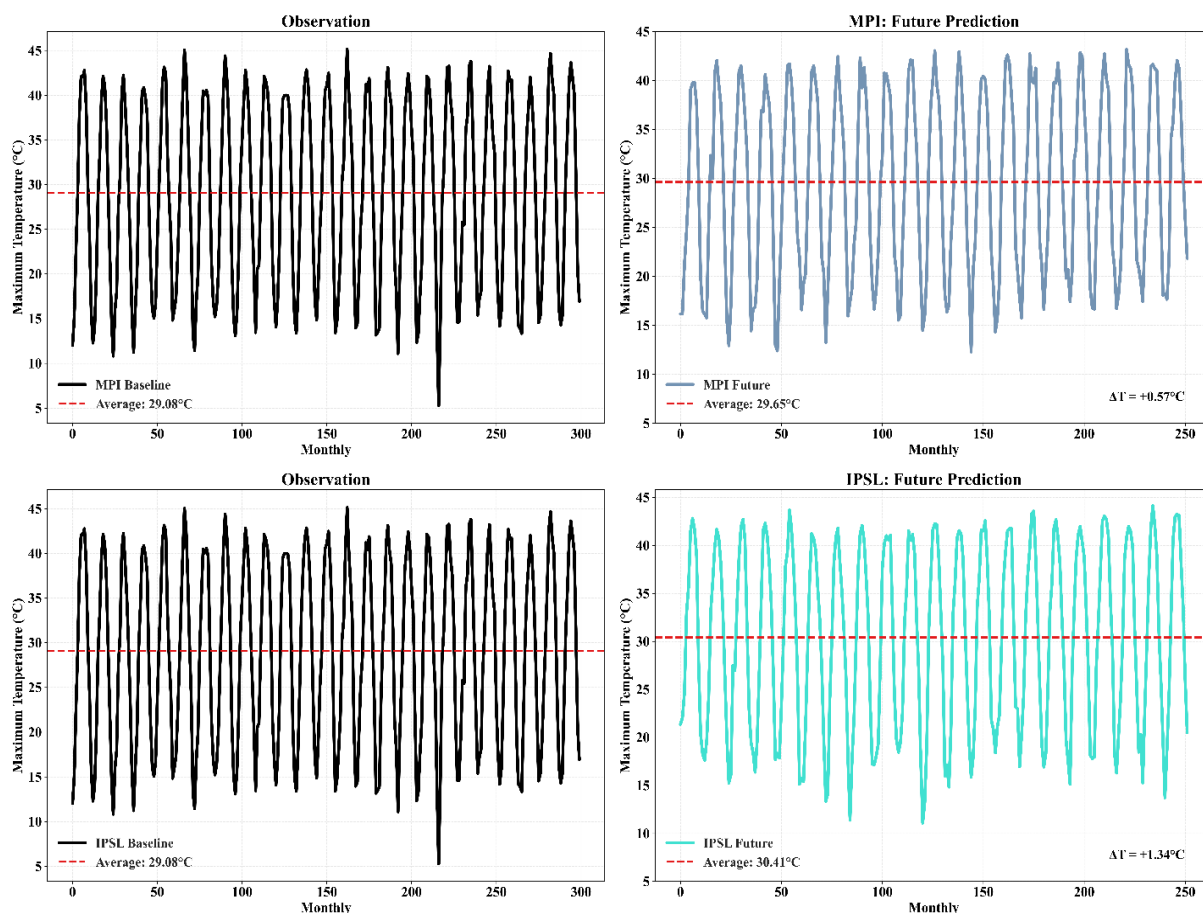
به‌منظور پیش‌برد این هدف از مدل برتر ISIMIP برای شبیه‌سازی تغییرات دمای بیشینه در دوره زمانی آتی ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰، تحت سناریوی SSP5.8.5 بهره گرفته شد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۴ ارائه شده است.

این نمودار، به وضوح چرخه فصلی منظم دما را نشان می‌دهد که در آن، دما به‌طور متناوب بین حداقل حدود ۱۳ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد و حداکثر حدود ۴۵ تا ۴۸ درجه سانتی‌گراد در نوسان است. با بررسی دقیق‌تر، یک روند افزایشی جزئی در دماهای بیشینه در طول دوره شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که می‌تواند بیانگر تداوم گرمایش اقلیمی در دهه‌های آتی باشد.

این نتایج، دورنمایی از افزایش دما و تغییر در الگوهای حرارتی منطقه را تحت سناریوی شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSP5.8.5) ارائه می‌دهد. پژوهش ایزدی و همکاران (Izadi et al., 2023) نیز نشان دهنده افزایش دما در شهرستان طبس تا پایان قرن حاضر می‌باشد این یافته‌ها هم‌سو با نتایج شبیه‌سازی این پژوهش است که تداوم روند افزایشی دمای بیشینه را تحت سناریوی SSP5.8.5 پیش‌بینی می‌کند.

در شاخص آماری میانگین، مدل‌های ISIMIP-MPI و ISIMIP-IPSL مقدار ۲۸/۹۷ درجه سانتی‌گراد را بازتولید کردند که با میانگین مشاهداتی مطابقت بسیار نزدیکی دارد، در حالی که مدل CMIP6-IPSL با مقدار ۲۸/۹۰ درجه سانتی‌گراد دچار انحراف به سمت پایین شده است. در خصوص میانه نیز مدل‌های ISIMIP دقت بالاتری در بازتاب نقطه مرکزی توزیع نسبت به مدل‌های CMIP6 داشته‌اند. بررسی انحراف معیار نشان داد که مدل‌های ISIMIP-MPI به مقدار مشاهداتی نزدیک‌تر عمل کرده‌اند این در حالی است که CMIP6-IPSL با مقدار ۱۰/۳۴ دامنه پراکندگی بیشتری نشان داده و تا حدی از مقدار واقعی فاصله گرفته است. مقایسه شاخص‌های آماری میان مدل‌ها نشان می‌دهد که ISIMIP-MPI در بازتولید ویژگی‌های آماری دمای بیشینه عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته و می‌توان آن را دقیق‌ترین مدل در این ارزیابی معرفی کرد، هم‌چنین پیش‌بینی دقیق این متغیر، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر شهرستان طبس، از اهمیت حیاتی برخوردار است. چرا که تغییرات در دمای بیشینه، منجر به وقوع پدیده‌هایی همچون افزایش تنش‌های حرارتی، افزایش تبخیر و تعرق و پیامدهای گسترده بر منابع آبی و کشاورزی می‌شود.

Comparison of MPI and IPSL Models: Baseline vs. Future



شکل ۴. مقادیر دمای بیشینه پیش‌بینی شده تحت سناریوی انتشار SSP5-8.5 با استفاده از مدل برتر ISIMIP

Fig 4. Estimated Maximum Temperature Values Under The SSP5-8.5 Emission Scenario Using The Best-Performing ISIMIP Model

مدل‌ها در این ارزیابی با ثبت مقادیر بالای KGE (نزدیک به ۱)، همخوانی قابل توجهی با نتایج پژوهش حاضر دارد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور بازتولید متغیر دمای بیشینه عملکرد مدل‌های اقلیمی جهانی IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2-HR ذیل دو پروژه مختلف CMIP 6 و ISIMIP مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی نشان داد که مدل ISIMIP، به‌ویژه نسخه MPI-ESM1-2-HR، از توانمندی بالایی در بازتولید دمای بیشینه در مناطق خشک و نیمه‌خشک برخوردار است. به تبع این نتایج، شبیه‌سازی تغییرات دمای بیشینه برای دهه‌های آتی

این هم‌سویی، اعتبار پیش‌بینی‌های مدل برتر ISIMIP-MPI، را در مورد گرمایش آتی منطقه تقویت می‌کند. در پژوهش ایزدی و همکاران از مدل CanESM پروژه CMIP6 استفاده شده که این امر نشان می‌دهد حتی نسخه‌های خام مدل‌های CMIP6 نیز روند کلی گرمایش را به‌درستی نشان می‌دهند، اما دقت بازتولید آن‌ها در مقیاس محلی ممکن است به اندازه مدل‌های تصحیح‌شده ISIMIP نباشد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2020) در پژوهشی که با استفاده از مدل‌های ISIMIP انجام و با شاخص‌هایی از جمله KGE ارزیابی شد، نشان دادند که افزایش قابل توجهی در فرکانس و شدت امواج گرمایی وجود دارد. عملکرد خوب

- 30-45. doi: 10.22034/iwm.2024.2013786.1109. (In Persian).
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383-3390.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F. (2009). Decomposition of the mean-squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91. (In Persian).
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Iranshahi, M., Ebrahimi, B., Yousefi, H., and Moridi, A. (2023). Investigating the Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation Using Neural Network and CMIP6 (Case Study: Aleshtar and Khorramabad Stations). *Water and Irrigation Management*, 12(4), 821-845. doi: 10.22059/jwim.2022.346796.1009.52. (In Persian).
- Khajeh amiri, C., Khosravi, M., Tavousi, T., Hamidianpour, M., and kiani moghadam, M. (2022). An analysis of the output performance of CMIP6 climate models in comparison with the observational data of the Makran coast. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 5(1), 22-41. doi: 10.22034/jmas.2023.379448.1193. (In Persian).
- Lange, S. (2019a). Bias correction of climate model outputs for ISIMIP: A standardised approach. *Earth System Dynamics Discussions*, 10(1), 123–145.
- Lange, S. (2020). ISIMIP3b bias adjustment methods. *Geoscientific Model Development*, 13(4), 1599–1612.
- Zareian, M. (2022). Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation in Yazd Province Based on Combined Output of CMIP6 Models. *Journal of Hydrology and Soil Science*, 26(2), 91-105. (In Persian).
- Maraun, D. (2016). Reply to Comment on ‘Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue. *Journal of Climate*, 29(23), 8669-8671.
- Mianabadi, A., Bateni, M. M., and Mohammadi, S. (2023). Projection of Change in the Distribution of Precipitation and Temperature Using Bias-Corrected Simulations of CMIP6 Climate Models (Case Study: Kerman Synoptic Station). *Climate Change Research*, 4(14), 65-84. doi: 10.30488/ccr.2023.399780.1139. (In Persian).
- Pedersen, J. T. S., van Vuuren, D., Gupta, J., Santos, F. D., Edmonds, J., & Swart, R. (2022). IPCC emission scenarios: How did critiques affect

(۲۰۵۰ تا ۲۰۳۰) با استفاده از مدل برتر ISIMIP تحت سناریوی SSP5.8.5 انجام پذیرفت. این شبیه‌سازی نشان از تداوم روند افزایشی دمای بیشینه در منطقه بوده که می‌تواند پیامدهایی جدی از جمله افزایش تنش‌های حرارتی، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش تغذیه آبخوان و در نهایت افت سطح آب زیرزمینی را به دنبال داشته باشد. در شرایطی که بررسی رفتار دما و پایش تغییرات اقلیم به یکی از اولویت‌های اصلی مدیریت منابع و برنامه‌ریزی منطقه‌ای تبدیل شده است، نتایج این مطالعه می‌تواند نقطه اتکایی برای توسعه سناریوهای آینده، تحلیل اثرات گرمایش جهانی و طراحی راهکارهای مقابله با تغییر اقلیم در مناطق حساس اقلیمی باشد.

منابع

- Abdolzadeh, F., Mohammad Khorshiddoust, A., and Jahanbakhsh, S. (2022). Assessment of the performance of the CMIP6 model for the analysis of temperature and precipitation in the Urmia Lake basin. *Climate Change Research*, 3(11), 17-30. doi: 10.30488/ccr.2022.361233.1093. (In Persian).
- Amirabadizadeh, M., Yaghoobzadeh, M., Hashemi, S., & Khozaymehnezhad, H. (2019). Assessment of linear and data-driven models in the downscaling of precipitation and temperature in South Khorasan Province. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 2(1), 68-82. (In Persian).
- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M., and Farokhnia, A. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in Iran's basins in the next 20 years based on the output of the CMIP6 model. *Iranian Water Research Journal*, 16(1), 11-24. doi: 10.22034/iwrj.2022.11204. (In Persian).
- Dowlatabadi, S., Amirabadizadeh, M., and Zarei, M. (2022). Evaluation of WetSpass-M Model for Estimation of Hydrological Response of Neyshabur-Rookh Watershed to Climate Change of Future Years. *Water and Soil*, 36(5), 629-644. doi: 10.22067/jsw.2022.78598.1199. (In Persian).
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate change on the maximum and minimum temperatures in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3), 1539-1562. (In Persian).
- Fouladi Nasrabad, M., Amirabadizadeh, M., and Dastourani, M. (2024). Performance Evaluation of Two General Circulation Models for Downscaling Average Temperature in Birjand County. *Integrated Watershed Management*, 4(1),

their quality and relevance, 1990–2022. *Global Environmental Change*, 75, 10253.

Rahimzadeh, F., Asgari, A., & Fattahi, E. (2019). Trends in maximum and minimum temperature series in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. (In Persian).

Razzaghian, H., Shahedi, K., and Habib Nejad Roshan, M. (2017). Evaluation of the climate change effect on Babol-rood watershed runoff using the IHACRES model. *Irrigation and Water Engineering*, 7(2), 159-172. (In Persian).

Sharafati A. Nabaei S. and Shahid S. 2020. Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology*. 40(3), 1864-1884. (In Persian).

Yang, Y., Jin, C., & Ali, S. (2020). Projection of heat wave in China under global warming targets of 1.5° C and 2° C by the ISIMIP models. *Atmospheric Research*, 244, 105057.

Zarrin, A., Dadashi-Rodbari, A., and Salehabadi, N. (2021). Projected temperature anomalies and trends in different climate zones in Iran based on CMIP6. *Iranian Journal of Geophysics*, 15(1), 35-54. doi: [10.30499/ijg.2020.249997.1292](https://doi.org/10.30499/ijg.2020.249997.1292). (In Persian).

Zhang, X., Hua, L., Jiang, D. 2021. Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang, China, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 15(11):1001.

