



Predicting changes in maximum temperatures in the mid-future period in Sistan and Baluchestan under SSP scenarios

Abdolreza Kashki¹✉ | Ghorban Jafari²

1. Corresponding Author, Department of Geography, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Iran. a.kashki@hsu.ac.ir
2. Department of Geography, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Iran. ghorban8591@gmail.com

Article Information

Research Paper

Vol:	16
No:	59
P:	105-124
Received:	2024-11-28
Revised:	2024-01-10
Accepted:	2024-01-11
Published:	2025-05-01

Keywords:

- Prediction
- Temperature changes
- Maximum temperature
- Sistan and Baluchestan
- CMIP6 model

Cite this Article:

Kashki, Abdolreza & Jafari, Ghorban. (2025). Predicting changes in maximum temperatures in the mid-future period in Sistan and Baluchestan under SSP scenarios. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 16(59): 105-124. doi: 10.22034/jargs.2025.491203.1163

Publisher: Hakim Sabzevari University

© The Author(s)



Abstract

Aim: Climate change, as a critical global issue, is primarily driven by human activities. This study aims to project changes in the mean maximum temperature across six meteorological stations in Sistan and Baluchestan province: Iranshahr, Chabahar, Zahedan, Zabol, Saravan, and Konarak. Projections were performed using CMIP6 models for the baseline period (1987–2014) and the middle future period (2051–2076).

Material & Method: To forecast temperature changes, CMIP6 models were applied under SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios using data from six meteorological stations. The SDSM method was used for statistical downscaling, and model performance was assessed with MAD, MAPE, and RMSE indices. The Mann-Kendall test analyzed trends in average maximum temperature. IDW interpolation in GIS was used to map spatial temperature changes. Paired-sample t-tests evaluated differences between baseline and mid-future periods.

Finding: The CanESM5 model performed best in predicting temperature changes. The highest increase (31.2°C) occurred in July at Iranshahr under SSP5-8.5, while the lowest (0.63°C) was in Zahedan under SSP1-2.6. Annually, Iranshahr saw the highest rise (1.75°C) and Zahedan the lowest (1.34°C). Seasonally, summer at Iranshahr recorded the highest increase (2.24°C) under SSP2-4.5, and winter at Zahedan the lowest (0.82°C) under SSP1-2.6.

Conclusion: The study predicts an increase in the average maximum temperature at all stations, with the highest rise in summer at Iranshahr and the lowest in winter at Zahedan. Geographical and climatic factors significantly influence temperature patterns. Continuous monitoring and improved management strategies are crucial for mitigating climate change.

Innovation: This study utilizes advanced CMIP6 models to predict changes in the mean maximum temperature in Sistan and Baluchestan Province and provides spatial maps of these changes using the IDW interpolation method in a GIS environment. Additionally, it analyzes the relationship between temperature changes and local geographical and climatic conditions, offering valuable data for resource management planning and adaptation to climate change.

Extended Abstract

1. Introduction

Climate change and global warming are among the most significant contemporary challenges, with widespread impacts across the globe. The Sistan and Baluchestan province of Iran is no exception, experiencing noticeable effects of these climatic changes. Assessing the future impacts of rising temperatures in this region requires utilizing advanced global climate models. The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) has made substantial progress in climate modeling through its various phases, including CMIP4, CMIP5, and CMIP6. The sixth phase of this project (CMIP6), launched in 2014, introduced new Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), higher spatial resolutions, and more precise simulations, enabling more accurate climate predictions and better management of uncertainties. Numerous studies have employed CMIP6 models to investigate temperature and precipitation changes in different regions worldwide. These studies consistently indicate that annual and seasonal mean temperatures are expected to rise significantly across most regions during the 21st century. In this research, the outputs of CMIP6 models and various SSP scenarios have been utilized to examine changes in the mean maximum temperature in the Sistan and Baluchestan province. The primary aim of this study is to provide precise information for designing appropriate management strategies and mitigating the adverse effects of climate change in this region.

2. Materials and methods

The study area, Sistan and Baluchestan Province covers 181,785 km² in southeastern Iran and is characterized by a desert climate with low annual precipitation (116.4 mm). It is the least densely populated province in Iran, with a population of 2,775,014. Daily data from six meteorological stations (Iranshahr, Chabahar, Zahedan, Zabol, Saravan, and Konarak) over the period of 1981-2014 were analyzed. Additionally, outputs from the CMIP6 model for the historical period (1979-2014) and future projections (2015-2100) were utilized. Three climate scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) were selected for the analysis. Three Global Climate Models (GCMs), CanESM5, MPI-ESM1-2-HR, and NorESM2-MM, were downscaled using the SDSM model. The models' performance was evaluated using error metrics (MAD, RMSE, MAPE), and the CanESM5 model was chosen for temperature simulation due to its higher accuracy. The trend of temperature changes was assessed using the Mann-Kendall test, and temperature maps were generated using IDW interpolation in GIS. Paired-sample t-tests were applied for mean comparisons, with a significance level set at $p < 0.05$.

3. Results and Discussion

The results indicate that the CanESM5 model outperformed other models in predicting temperature variations. The highest temperature increase was observed in July under the SSP5-8.5 scenario at Iranshahr station, while the lowest increase was recorded at Zahedan station under the SSP1-2.6 scenario. The seasonal trend analysis revealed that the most significant temperature rise will occur in summer, whereas the least increase is expected in winter. Statistical analyses demonstrated a significant difference between the mean maximum temperature in the baseline and mid-future periods. Furthermore, geographical and climatic factors such as elevation, vegetation cover, atmospheric humidity, and greenhouse gas effects play a crucial role in shaping the temperature variation patterns across the province. These findings underscore the necessity of precise planning and the development of management strategies to adapt to climate change and mitigate its adverse impacts.

4. Conclusion

This study investigates the climate changes in six meteorological stations in the Sistan and Baluchestan province, namely Iranshahr, Chabahar, Zahedan, Zabol, Saravan, and Konarak, during the base and mid-future periods. Data from three different General Circulation Models (GCMs), CanESM5, MPI-ESM1-2-HR, and NorESM2-MM, were used for the analysis. The results indicate that the CanESM5 model performed the best among the three. The projections show the highest increase in maximum temperature in July under the SSP5-8.5 scenario at the Iranshahr station, while the lowest increase is observed under the SSP1-2.6 scenario at the Zabol station. Additionally, the highest temperature increase in the summer season is projected to occur at the Iranshahr station under the SSP2-4.5 scenario, while the lowest increase is expected in the winter at the Zahedan station under the SSP1-2.6 scenario. Spatial analysis results indicate that factors such as latitude, elevation above sea level, atmospheric humidity, vegetation cover, and

greenhouse gas effects contribute to temperature variations across stations in the province. This research highlights the significant ongoing climate changes in the region, which are expected to continue.

5. Acknowledgement & Funding

- The authors would like to thank the anonymous reviewers for their valuable comments.
- The manuscript did not receive a grant from any organization

6. Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

پیش‌نگری تغییرات حداکثر دما در دوره آینده میانی سیستان و بلوچستان تحت سناریوهای SSP

عبدالرضا کاشکی^۱، قربان جعفری^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. a.kashki@hsu.ac.ir
۲- گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. ghorban8591@gmail.com

چکیده:

هدف: تغییرات اقلیمی به‌عنوان یک مسئله جهانی عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است. این تحقیق به پیش‌نگری تغییرات میانگین حداکثر دما در شش ایستگاه هواشناسی استان سیستان و بلوچستان شامل ایرانشهر، چابهار، زاهدان، زابل، سراوان و کنارک پرداخته است. پیش‌نگری با استفاده از مدل‌های CMIP6 در دوره‌های پایه (۱۹۸۷-۲۰۱۴) و آینده میانی (۲۰۷۶-۲۰۵۱) انجام شده است.

روش و داده‌ها: داده‌های هواشناسی از شش ایستگاه جمع‌آوری و مدل‌های CMIP6 در سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای پیش‌بینی تغییرات دما به کار گرفته شدند. برای کوچک مقیاس‌سازی داده‌های مدل، روش آماری SDSM و برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، شاخص‌های MAPE، RMSE و MAD استفاده شدند. همچنین، روند تغییرات میانگین دمای حداکثر با استفاده از روش تحلیل آزمون من-کندال مورد بررسی قرار گرفت. نقشه‌های مکانی تغییرات دما با روش درون‌یابی IDW در محیط GIS تهیه شده و آزمون t جفت نمونه‌ای برای بررسی تفاوت‌های معنی‌دار بین داده‌های دوره‌های پایه و آینده میانی استفاده شد.

یافته‌ها: مدل CanESM5 بهترین عملکرد را در پیش‌بینی تغییرات دما داشت. بیشترین افزایش دما در ماه ژوئیه و تحت سناریو SSP5-8.5 در ایستگاه ایرانشهر با ۲/۳۱ درجه سلسیوس و کمترین افزایش در ایستگاه زاهدان تحت سناریو SSP1-2.6 با ۰/۶۳ درجه سلسیوس پیش‌نگری شد. در مقیاس سالانه، ایستگاه ایرانشهر در سناریو SSP5-8.5 بیشترین افزایش دما را داشت. از نظر فصلی، بیشترین افزایش دما در فصل تابستان در ایرانشهر و کمترین افزایش در فصل زمستان در زاهدان رخ خواهد داد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش میانگین دمای حداکثر در تمامی ایستگاه‌های مطالعه شده پیش‌بینی شده است، با بیشترین افزایش در تابستان در ایرانشهر و کمترین در زمستان در زاهدان. عوامل جغرافیایی و اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر الگوهای دمایی دارند. پایش مستمر، تدوین برنامه‌های مدیریتی و ارتقاء زیرساخت‌ها برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی ضروری است.

نوآوری‌ها: این مطالعه با بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته CMIP6 به پیش‌بینی تغییرات میانگین دمای حداکثر در استان سیستان و بلوچستان پرداخته و نقشه‌های مکانی این تغییرات را با روش درون‌یابی IDW در محیط GIS ارائه کرده است. همچنین، با تحلیل دقیق رابطه میان تغییرات دما و شرایط محلی جغرافیایی و اقلیمی، داده‌های ارزشمندی برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع و سازگاری با تغییرات اقلیمی فراهم می‌آورد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره: ۱۶

دوره: ۵۹

صفحه: ۱۰۵-۱۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۸

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱

کلیدواژه‌ها:

- پیش‌نگری
- تغییرات دما
- حداکثر دما
- سیستان و بلوچستان
- مدل CMIP6

نحوه ارجاع به این مقاله:

کاشکی، عبدالرضا، جعفری، قربان. (۱۴۰۴). پیش‌نگری تغییرات حداکثر دما در دوره آینده میانی سیستان و بلوچستان تحت سناریوهای SSP. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۶(۵۹): ۱۰۵-۱۲۴.

doi: 10.22034/jargs.2025.491203.1163

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



© نویسنده(گان).

۱- مقدمه

تغییر اقلیم و افزایش دمای جهانی از مهم‌ترین چالش‌های عصر حاضر به شمار می‌رود که پیامدهای گسترده‌ای را در سراسر جهان به همراه داشته است. استان سیستان و بلوچستان نیز از این دگرگونی‌های اقلیمی متأثر شده و با تغییرات چشمگیری در الگوهای دما و بارش مواجه است. در این راستا، بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی جهانی ابزاری کارآمد برای ارزیابی پیامدهای آتی افزایش دما در این استان محسوب می‌شود. مدل‌های CMIP که به‌عنوان پروژه‌ای جامع در مقایسه مدل‌های جفت‌شده اقلیمی شناخته می‌شوند، در نسخه‌های مختلف خود از جمله CMIP4، CMIP5 و CMIP6 پیشرفت‌های قابل توجهی در شبیه‌سازی اقلیم جهانی داشته‌اند. در این میان، CMIP5 نسبت به نسخه پیشین خود، با بهبود شبیه‌سازی فرآیندهای اقیانوسی و جوی و ارائه تنوع بیشتری از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، از جمله RCPها، گام مؤثری در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی برداشته است. نسخه CMIP6، در ادامه این روند تکاملی، با ارائه سناریوهای جدید SSP، افزایش تفکیک‌پذیری فضایی و شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر، دقت بیشتری در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، CMIP6 با لحاظ کردن تعاملات پیچیده‌تر میان عوامل انسانی و طبیعی و همچنین مدیریت بهتر عدم قطعیت‌ها، نسبت به نسخه‌های پیشین خود پیشرفته‌تر و کارآمدتر عمل کرده است. این پیشرفت‌ها باعث بهبود دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی در این مدل‌ها شده است. پروژه مقایسه مدل‌های مشترک فاز ششم (CMIP6) در سال ۲۰۱۴ آغاز شد تا نواقص علمی باقی مانده در CMIP5 را پر کند و به چالش‌های جدیدی که در مدل‌سازی اقلیم ظاهر شده است، پرداخته شود (Eyring et al., 2016). تنوع سناریو CMIP6 شامل SSPها می‌شود و طیف گسترده‌تری از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای را فراهم می‌کند، که درک پاسخ‌های اقلیمی را افزایش می‌دهد (Hewitt & Dunne, 2024). در این پژوهش، از مدل CMIP6 و همچنین از سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده می‌شود تا تأثیر افزایش میانگین حداکثر دما را در استان سیستان و بلوچستان مورد بررسی قرار دهد.

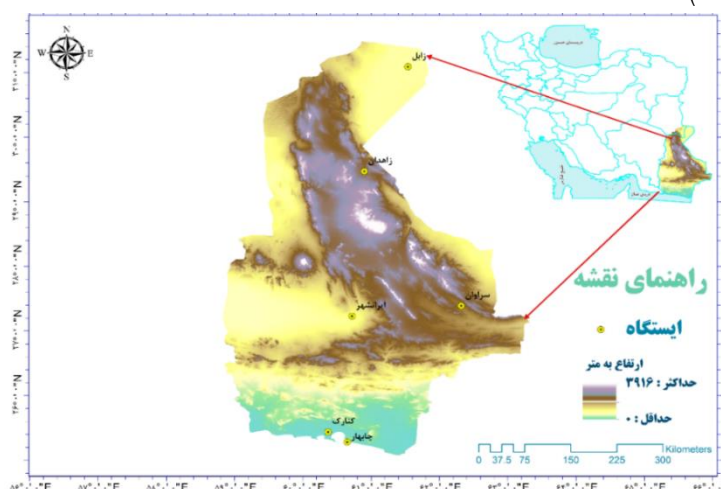
در مطالعه‌ای، به ارزیابی تغییرات بارش و دما در گزارش‌های CMIP5 و CMIP6 هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC1) برای دوره آینده (۲۰۱۵-۲۱۰۰) در شهر تبریز، شمال غرب ایران پرداخته است. نتایج نشان داد که دما در تمام ماه‌ها و سناریوها افزایش خواهد یافت (Ghazi & Jaihouni, 2022). در پژوهشی دیگر که تحلیل داده‌های ۲۷ مدل اقلیم جهانی از فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های هم‌زمان (CMIP6) را ارائه می‌دهد و تغییرات پیش‌نگری شده در دما و بارش بر روی قاره آفریقا طی قرن بیست و یکم را بررسی می‌کند. پیش‌نگری‌ها نشان می‌دهند که دمای میانگین سالانه در آفریقا و هشت منطقه فرعی آن طی قرن بیست و یکم به طور مداوم و قابل توجهی افزایش خواهد یافت (Almazroui et al., 2020). در مقاله‌ای، تحقیقاتی در مورد تغییرات دما و بارش در حوضه رودخانه یانگتسه و مناطق دیگر انجام شده است. به این نتیجه رسیدند که در دوران بلندمدت تحت سناریوهای SSP مختلف، با درجه‌ی معینی از عدم قطعیت در مورد مقادیر دقیق پیش‌بینی شده افزایش خواهد یافت (Y. Yue et al., 2021). در پژوهش دیگری شبیه‌سازی بهتری برای پیش‌بینی تغییرات دما با استفاده از پنج مدل CMIP6 نسبت به تغییرات بارش برای شمال غرب چین پیدا کردند که افزایش‌های قابل توجهی در متغیرهای دما و بارش در قرن بیست و یکم انتظار می‌رود (Qin et al., 2021). یک تحقیق دیگر به تحولات دماهای حداکثر و حداقل در مقیاس زمانی روزانه در بنگلادش به‌عنوان یک ناحیه با آب و هوای مونسونی پر خطر، با استفاده از مدل‌های CMIP6 می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد، دماهای حداکثر و حداقل در آینده در حال افزایش هستند (Das et al., 2023). در مقاله ارزیابی تغییرات دما در طول قرن بیست و یکم در ایران با استفاده از مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نتیجه گرفتند که تمام این شاخص‌ها نشان‌دهنده تشدید گرم‌شدگی در منطقه ایران نسبت به روندهای جهانی است. از تحلیل مکانی روندهای دما در سطح هوای سطحی بر پنج منطقه از ایران برای دوره‌های ۱۸۵۰-۲۰۱۴، ۱۹۶۰-۲۰۱۴، ۲۰۱۴-۲۰۵۰ و ۲۰۱۴-۲۱۰۰، مشخص شد که افزایش قابل توجهی در تمام روندها وجود دارد (Francisco et al., 2022). در مقاله دیگری از برون‌داد سه مدل از مجموعه مدل‌های ۱۰۰ کیلومتری CMIP6 برای دوره تاریخی و دوره آینده جهت بررسی دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه استفاده شده است. نتایج نشان داده که بی‌هنجاری دما در دهه‌های آتی در هر دو سناریو در ایران مثبت است و روند دما در ایران افزایشی است (Zarrin et al., 2020). مطالعه دیگری به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی در حوضه آبخیز سد طرق مشهد می‌پردازد. این مطالعه از ترکیب وزنی چهار مدل AOGCM از فاز ششم مدل‌های تغییر اقلیم (CMIP6) استفاده کرده است. نتایج نشان می‌دهد که تحت تمامی سناریوها، دما در دوره‌های آینده نسبت

به دوره پایه افزایش خواهد یافت (Dastourani et al., 2020). در مطالعه‌ای که تأثیرات تغییر اقلیم بر دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 بررسی شده است، نتایج نشان می‌دهد که میانگین تغییرات دما از ۱/۱۶ تا ۴/۰۹ درجه سلسیوس افزایش خواهد (Hamed et al., 2022). نتایج پژوهش بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 در ایستگاه بیرجند نشان داد که تغییرات حداکثر دما و حداقل در دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰) نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای روند افزایشی خواهد بود (Khashaei Sivuki et al., 2022). در یک تحقیق دیگر، متغیرهای اقلیمی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های CMIP6 تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در بازه‌های زمانی آینده مورد پیش‌بینی و ارزیابی قرار گرفتند، نتایج نشان دادند که دمای متوسط سالانه حوضه تحت همه سناریوها افزایش خواهد داشت (Abdollahzadeh et al., 2023). مطالعه‌ای در خصوص ارزیابی تغییرات پارامترهای دمای متوسط و بارش با استفاده از مدل‌های گزارش ششم IPCC (CMIP6) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 طی دوره ۲۰۲۲-۲۱۰۰ در دشت کاشان انجام شده که نتایج نشان داد دمای متوسط نیز در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. (Afshari-Nia et al., 2023). این پژوهش به منظور مطالعه اثرات تغییر اقلیم در این منطقه ارائه شده است تا برنامه‌های مدیریتی مناسب و کاهش تأثیرات منفی تغییرات دمایی و سازگاری با این تغییرات در استان سیستان و بلوچستان در آینده را تدوین کند.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان سیستان و بلوچستان با مساحتی معادل ۱۸۱,۷۸۵ کیلومتر مربع، حدود ۱۱/۳ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص می‌دهد و از این رو در زمره پهناورترین استان‌های ایران به شمار می‌آید (شکل ۱). این استان در موقعیت جغرافیایی خاصی قرار دارد، به‌گونه‌ای که از لحاظ عرض جغرافیایی بین ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و از نظر طول جغرافیایی بین ۵۸ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار مبدأ واقع شده است. این استان از شمال با استان خراسان جنوبی و کشور افغانستان، از شرق با کشورهای پاکستان و افغانستان (با مرز خاکی حدود ۱۲۶۰ کیلومتر)، از جنوب با آب‌های آزاد دریای عمان (با مرز آبی حدود ۳۰۰ کیلومتر) و از غرب با استان‌های کرمان و هرمزگان هم‌مرز است (Farzaneh, 2021). بر اساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، جمعیت استان سیستان و بلوچستان معادل ۲,۷۷۵,۰۱۴ نفر بوده است که این استان را به کم‌تراکم‌ترین استان کشور تبدیل می‌کند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). از نظر اقلیمی، این استان در ناحیه بیابانی و خشک طبقه‌بندی می‌شود. همچنین، توزیع دمای ماهانه در این استان یکنواخت نبوده و تفاوت دما میان مناطق سردسیر و گرمسیر آن به‌طور قابل توجهی مشاهده می‌شود. در نتیجه، اختلاف دمای میان این مناطق بسیار چشمگیر است. از لحاظ بارش، سیستان و بلوچستان به عنوان کم‌بارش‌ترین استان‌های کشور شناخته می‌شود، به‌طوری‌که میانگین بارش سالیانه این استان برابر با ۱۱۶/۴ میلی‌متر است که به‌طور قابل توجهی کمتر از میانگین بارش کشوری معادل ۲۰۱/۹ میلی‌متر قرار دارد (اداره کل هواشناسی استان سیستان و بلوچستان، ۱۴۰۰).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های همدیدی مورد مطالعه سیستان و بلوچستان (منبع: نگارندگان)

۲-۲- روش پژوهش

در این مطالعه از داده‌های روزانه شش ایستگاه، هواشناسی همدیدی ایرانشهر، چابهار، زاهدان، زابل، سراوان و کنارک با مشخصات موقعیتی (جدول ۱) در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۱۴ با توجه به انتهای داده‌های تاریخی گزارش ششم (CMIP6) استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در مطالعه

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه اعشاری)	عرض جغرافیایی (درجه اعشاری)	ارتفاع به متر	نوع ایستگاه
۱	ایرانشهر	۶۰/۷۲	۲۷/۲۳	۵۹۱/۱	همدیدی
۲	چابهار	۶۰/۶۵	۲۵/۲۸	۸	همدیدی
۳	زاهدان	۶۰/۹۰	۲۹/۴۷	۱۳۷۰	همدیدی
۴	زابل	۶۱/۵۴	۳۱/۰۹	۴۸۹/۲	همدیدی
۵	سراوان	۶۲/۳۲	۲۷/۳۹	۱۱۸۲	همدیدی
۶	کنارک	۶۰/۳۷	۲۵/۴۴	۳۰	همدیدی

(اداره کل هواشناسی استان سیستان و بلوچستان، ۱۴۰۰)

همچنین از داده‌های شبکه‌ای گزارش ششم (CMIP6) که متغیرهای پیش‌نگری روزانه از این مدل‌ها برای دوره زمانی تاریخی ۱۹۷۹-۲۰۱۴ و چندین مسیر اشتراکی اقتصادی (SSPs) برای دوره زمانی آینده ۲۰۱۵ - ۲۱۰۰ در دسترس است، استفاده شد. گزارش ششم ارزیابی هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) نتایج دمای پیش‌بینی شده را بر اساس پنج سناریو (بین ۱.۹ تا ۸.۵ وات بر مترمربع) که از چارچوب مسیرهای اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSPs) استخراج شده‌اند، ارزیابی کرده است. از سناریوهای ارزیابی شده در گزارش ششم IPCC، سه سناریو از آن‌ها در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند (جدول ۲)، مشخصات آن‌ها به شرح زیر است:

جدول ۲. مسیرهای اجتماعی- اقتصادی مشترک در گزارش ششم ارزیابی IPCC

سناریو (SSP)	نام سناریو	گرمایش تخمینی (2041-2060)	گرمایش تخمینی (2081-2100)	بازه خیلی محتمل (2081-2100) (°C)
SSP1-2.6	انتشار کم گازهای گلخانه‌ای: انتشار CO ₂ تا حدود سال ۲۰۷۵ به صفر خالص کاهش می‌یابد	1/7 °C	1/8 °C	1/3 - 2/4
SSP2-4.5	انتشار متوسط گازهای گلخانه‌ای: انتشار CO ₂ تا حدود ۲۰۵۰ در سطح فعلی باقی می‌ماند و سپس کاهش می‌یابد، اما تا سال ۲۱۰۰ به صفر خالص نمی‌رسد.	2/0 °C	2/7 °C	2/1 - 3/5
SSP5-8.5	انتشار بسیار بالا: انتشار CO ₂ تا حدود سال ۲۰۷۵ سه برابر می‌شود	2/4 °C	4/4 °C	3/3 - 5/7

(منبع: IPCC, 2021)

این سناریوها برای ارزیابی مسیرهای مختلف اقلیمی و تأثیرات احتمالی آن‌ها در آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند و نقش کلیدی در برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند (IPCC, 2021). مدل‌های GCM مورد استفاده شامل سه مدل CanESM5، MPI-ESM1-2-HR و NorESM2-MM هستند. روش کار بدین صورت است که داده‌های مدل‌های GCM برای منطقه مورد مطالعه استخراج شده و پس از ریزمقیاس‌سازی به وسیله نرم‌افزار SDSM با داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. داده‌های ورودی مدل SDSM شامل ۲۶ متغیر از داده‌های برون‌داد مدل CMIP 6 است که متغیرهایی که بیشترین همبستگی را داشتند، جهت مدل‌سازی از آن‌ها استفاده شد (جدول ۳). قابل ذکر است، روش یا مدل SDSM را نخستین بار ویلی و همکاران ارائه کردند (Wilby et al., 2002). در طی واسنجی مدل SDSM، بعضی از پارامترها از قبیل آستانه پیشامد، اریب تصحیح شده و تورم واریانس برای تعیین بهترین تطابق آماری بین متغیرهای اقلیمی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تعدیل می‌شوند.

جدول ۳. لیست متغیرهای پیش‌نگری‌کننده بزرگ مقیاس برای مدل SDSM

نام متغیر	علامت	ردیف	نام متغیر	علامت	ردیف
ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال	p500gl	۳	فشار متوسط سطح دریا	Mslpgl	۱
متوسط دما در ارتفاع ۲ متری	Tempgl	۴	سطحی سرعت نصف‌النهاری	p1_vgl	۲

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های گزارش ششم، از معیارهای خطاسنجی، میانگین قدر مطلق خطا (MAD)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۷) استفاده شد (معادله ۱ تا ۳). که این آمارها یا معیارهای خطاسنجی یا اعتبارسنجی، جزء متداول‌ترین معیارها محسوب می‌شود که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است (Ahmadi et al., 2018).

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad \text{(معادله ۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad \text{(معادله ۲)}$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad \text{(معادله ۳)}$$

در معادلات فوق A_t مقادیر مشاهداتی، F_t مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد داده‌ها است.

مقادیر محاسباتی شاخص‌ها و معیارهای خطاسنجی مورد استفاده برای ارزیابی هریک از سه مدل برون‌داد CMIP6 در (جدول ۴) نشان داده شده است.

جدول ۴. مقادیر سنج‌های آماری در دوره پایه برای متغیر میانگین حداکثر دما در ایستگاه‌های منتخب

ایستگاه	ایستگاه			معیار	ایستگاه			معیار	ایستگاه
	NorESM2-MM	MPI-ESM1-2-HR	CanESM5		NorESM2-MM	MPI-ESM1-2-HR	CanESM5		
ایران‌شهر	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	MAD	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	MAD	ایران‌شهر
	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	RMSE	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	RMSE	
	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۷	MAPE	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۸	MAPE	
چابهار	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	MAD	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲	MAD	چابهار
	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	RMSE	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	RMSE	
	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۱۱	MAPE	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۰۹	MAPE	
زاهدان	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	MAD	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	MAD	زاهدان
	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	RMSE	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	RMSE	
	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۲	MAPE	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۷	MAPE	

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

ضمن این‌که هر سه مدل در پیش‌نگری میانگین حداکثر دما تقریباً عملکرد مشابه از خود نشان دادند؛ ولی با توجه به مقالات متعددی که عملکرد بهتر مدل CanESM5 را تأیید می‌کنند، در این پژوهش از این مدل جهت شبیه‌سازی میانگین دما استفاده شد. در پژوهشی که با هدف بررسی کارایی مدل‌های اقلیمی در برآورد دمای ایران به انجام رسیده است، توانایی بالای مدل CanESM5 در برآورد دما را مثبت ارزیابی می‌کند (Zarrin & Dadashi Rudbari, 2020). در تحقیقی دیگر جهت صحت‌سنجی عملکرد برون‌داد مدل اقلیمی CMIP6 با داده‌های مشاهده‌ای کرانه‌های مکران انجام شد عملکرد خوب مدل CanESM5 را تأیید می‌کند (Khajeh Amiri Khaledi et al., 2023). همچنین روند تغییرات دمایی در این پژوهش با استفاده از آزمون من-کندال بررسی

شد. در نهایت نقشه‌های میانگین سالانه حداکثر دما هریک از ایستگاه‌ها در دوره پایه و سه سناریو SSP1-2.6، SSP 2-4.5، SSP 5-8.5 از طریق درون‌یابی IDW در GIS ترسیم گردید این نقشه‌ها پهنه‌بندی شده و تحلیل فضایی کامل بر روی آن‌ها انجام شد.

• مدل آماری t دو گروه وابسته (جفت گونه)

این آزمون زمانی انجام می‌شود که برای بررسی دو حالت یا متغیر از یک جامعه آماری (برای بررسی دو میانگین از یک جامعه) استفاده می‌شود. زمانی می‌توانیم از آزمون t وابسته استفاده کنیم که پیش‌فرض‌های زیر برقرار باشد:

۱- مقیاس متغیر وابسته باید کمی و در سطح فاصله‌ای/نسبی باشد. ۲- مقادیر دو متغیر باید جفت (وابسته) و از یک جامعه باشند. ۳- توزیع داده‌های متغیر وابسته باید نرمال باشد (Habibpour & Safari, 2011). در این پژوهش داده‌ها توسط نرم‌افزار SPSS و با استفاده از آمارهای توصیفی و تحلیلی و به وسیله آزمون آماری تی وابسته یا آزمون t جفت نمونه‌ای^۱ تجزیه تحلیل گردیدند، مقدار P کمتر از ۰/۰۵ عنوان سطح معنی‌داری در نظر گرفته شد. فرمول مورد استفاده برای به دست آوردن مقدار t به صورت معادله (۴) است:

$$t = \frac{\bar{x}d}{sd/\sqrt{n}} \quad \text{معادله (۴)}$$

در معادله فوق Xd = تفاوت میانگین‌ها، Sd = انحراف معیار میانگین‌ها و n = حجم نمونه است.

۳- یافته‌ها

۳-۱- تغییرات میانگین دمای سالانه و ماهانه

➤ تغییر در میانگین حداکثر دما سالانه و ماهانه تحت سناریو SSP1-2.6

جدول ۵ نشان می‌دهد که میانگین دمای سالانه ایستگاه‌های ایرانشهر، چابهار، زاهدان، زابل، سراوان و کنارک برای دوره زمانی ۲۰۷۶-۲۰۵۱ و تحت سناریو SSP1-2.6 ارائه شده است. با توجه به جدول، هر یک از ایستگاه‌ها در این دوره زمانی نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۸۷، افزایش میانگین دما را نشان داده‌اند. ایستگاه‌های ایرانشهر و کنارک با میزان افزایش حداکثر دمای سالانه به ترتیب ۱/۶۷، ۱/۶۵ درجه سلسیوس دارای بیشترین افزایش هستند. ایستگاه‌های چابهار و سراوان نیز با میزان افزایش حدود ۱/۵۳ درجه سلسیوس افزایش دمایی مشابه به خود را نشان داده‌اند. در نهایت، ایستگاه زاهدان و زابل به ترتیب با میزان افزایش ۱/۳۴ و ۱/۴۴ درجه سلسیوس همچنان دارای کمترین افزایش میانگین حداکثر دما در این دوره زمانی است. با توجه به این جدول، می‌توان فهمید که ایستگاه‌های مختلف در دوره زمانی ۲۰۷۶-۲۰۵۱ تحت سناریو SSP1-2.6 با افزایش گازهای گلخانه‌ای درگیر با تغییر اقلیم هستند و میزان افزایش دمای هوا در هر منطقه می‌تواند با توجه به شرایط مجاورتی و ویژگی‌های آن منطقه، متفاوت باشد.

با توجه به نتایج مدل‌سازی، نشان داده شده که میانگین دمای ماهانه در دوره مورد بررسی از سال ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۶ تحت سناریو SSP1-2.6 برای همه ایستگاه‌ها در حال افزایش است. در این میان، کمترین افزایش میانگین دما مربوط به ایستگاه زاهدان در ماه ژانویه با نرخ تغییر ۰/۶۳ درجه سلسیوس بوده است. به طور مشابه، بیشترین افزایش میانگین دما را در ایستگاه ایرانشهر در ماه‌های اوت، ژوئن، ژوئیه و مه مشاهده می‌کنیم. این افزایش به ترتیب ۲/۱۸، ۲/۱۴، ۲/۱۱ و ۲/۰۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۴ است. نتایج جدول فوق نشان می‌دهد که حداکثر دما در سال‌های آینده (دوره میانی) در حال افزایش است و ایستگاه‌های مورد مطالعه در این افزایش تغییرات متفاوتی دارند.

جدول ۵. تغییر میانگین دمای حداکثر ماهانه و سالانه ایستگاه‌های مطالعاتی تحت سناریو SSP1-2.6

ایستگاه	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	میانگین
ایرانشهر	دوره پایه	۲۱/۰	۲۳/۸	۲۸/۷	۳۵/۰	۴۰/۹	۴۴/۰	۴۴/۳	۴۳/۱	۴۰/۵	۳۵/۳	۲۸/۹	۲۳/۴	۳۴/۱
	دوره میانی	۲۲/۱	۲۵/۰	۲۹/۸	۳۶/۸	۴۲/۹	۴۶/۲	۴۶/۴	۴۵/۳	۴۲/۴	۳۷/۰	۳۰/۴	۲۴/۶	۳۵/۷
	مقدار تغییر	۱/۰۷	۱/۲۱	۱/۱۱	۱/۸۴	۲/۰۲	۲/۱۴	۲/۱۱	۲/۱۸	۱/۹۴	۱/۶۹	۱/۵۱	۱/۱۸	۱/۶۷
چابهار	دوره پایه	۲۴/۲	۲۴/۹	۲۷/۰	۳۰	۳۲/۷	۳۳/۶	۳۲/۴	۳۱/۱	۳۱/۰	۳۱/۲	۲۹/۰	۲۶/۱	۲۹/۴
	دوره میانی	۲۵/۲	۲۶/۰	۲۸/۵	۳۱/۷	۳۴/۵	۳۵/۳	۳۳/۹	۳۲/۶	۳۲/۷	۳۲/۸	۳۰/۵	۲۷/۵	۳۰/۹
	مقدار تغییر	۱/۰۹	۱/۱۱	۱/۴۷	۱/۷۳	۱/۸۶	۱/۷۲	۱/۵۸	۱/۵۶	۱/۷۲	۱/۷۲	۱/۴۷	۱/۳۸	۱/۵۲
زاهدان	دوره پایه	۱۴/۳	۱۷/۲	۲۲/۲	۲۸/۲	۳۲/۹	۳۶/۲	۳۷/۱	۳۵/۹	۳۲/۸	۲۸/۰	۲۲/۱	۱۶/۸	۲۷/۰
	دوره میانی	۱۴/۹	۱۷/۹	۲۳/۱	۲۹/۹	۳۴/۷	۳۷/۹	۳۸/۹	۳۷/۴	۳۴/۴	۲۹/۴	۲۳/۳	۱۷/۹	۲۸/۳
	مقدار تغییر	۰/۶۳	۰/۷۷	۰/۹۳	۱/۷۵	۱/۷۳	۱/۷۸	۱/۸۶	۱/۵۳	۱/۵۹	۱/۳۶	۱/۱۱	۱/۰۷	۱/۳۴
زابل	دوره پایه	۱۵/۴	۱۸/۶	۲۴/۹	۳۲/۰	۳۷/۱	۴۰/۹	۴۲/۱	۴۰/۶	۳۶/۷	۳۰/۷	۲۳/۵	۱۷/۳	۳۰/۰
	دوره میانی	۱۶/۱	۱۹/۶	۲۶/۰	۳۳/۶	۳۹/۰	۴۲/۸	۴۴/۱	۴۲/۶	۳۸/۳	۳۲/۲	۲۴/۸	۱۸/۲	۳۱/۴
	مقدار تغییر	۰/۶۶	۱/۰۳	۱/۱۱	۱/۵۶	۱/۸۷	۱/۹۰	۲/۰۰	۱/۹۶	۱/۵۸	۱/۴۸	۱/۲۴	۰/۸۸	۴۴/۱
سراوان	دوره پایه	۱۷/۳	۲۰/۲	۲۵/۰	۳۰/۹	۳۶/۰	۳۸/۸	۳۹/۵	۳۸/۳	۳۵/۲	۳۰/۲	۲۴/۴	۱۹/۵	۲۹/۶
	دوره میانی	۱۸/۳	۲۱/۲	۲۶/۳	۳۲/۶	۳۷/۷	۴۰/۸	۴۱/۴	۴۰/۴	۳۷/۰	۳۱/۷	۲۵/۶	۲۰/۸	۳۱/۱
	مقدار تغییر	۱/۰۰	۱/۰۲	۱/۳۳	۱/۷۱	۱/۷۴	۱/۹۳	۱/۹۹	۲/۰۱	۱/۷۳	۱/۴۶	۱/۲۰	۱/۲۷	۱/۵۳
کنارک	دوره پایه	۲۵/۴	۲۶/۹	۳۰/۳	۳۴/۸	۳۸/۰	۴۲/۹	۴۵/۵	۴۲/۷	۳۳/۷	۲۵/۰	۲۱/۵	۲۷/۵	۳۲/۶
	دوره میانی	۲۶/۶	۲۸/۴	۳۱/۸	۳۶/۶	۴۰/۰	۴۳/۸	۴۶/۲	۴۵/۶	۳۶/۱	۳۶/۸	۳۲/۹	۲۸/۹	۳۴/۲
	مقدار تغییر	۱/۲۷	۱/۴۶	۱/۵۰	۱/۷۹	۱/۹۷	۱/۸۸	۱/۷۱	۱/۹۰	۱/۶۷	۱/۸۱	۱/۴۳	۱/۴۳	۱/۶۵

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

➤ تغییر در میانگین دمای حداکثر سالانه و ماهانه تحت سناریو SSP2-4.5

جدول ۶ میانگین دمای سالانه ایستگاه‌های ایرانشهر، چابهار، زاهدان، زابل، سراوان و کنارک در دوره زمانی ۲۰۷۶-۲۰۵۱ تحت سناریو SSP 2-4.5 را نشان می‌دهد. افزایش میانگین حداکثر دما برای هر یک از ایستگاه‌ها در این دوره زمانی نسبت به دوره پایه ۱۹۸۱-۲۰۱۴ بیان شده است. با توجه به جدول می‌توان مشاهده کرد که ایستگاه‌های کنارک، ایرانشهر، چابهار و سراوان با میزان افزایش میانگین حداکثر دما سالانه به ترتیب ۱/۷۳، ۱/۶۸ و ۱/۵۱ درجه سلسیوس دارای بیشترین افزایش هستند. ایستگاه‌های زاهدان و زابل نیز با میزان افزایش به ترتیب ۱/۳۵ و ۱/۴۴ درجه سلسیوس، افزایش دمایی، دارای کمترین افزایش میانگین حداکثر دما در این دوره زمانی است. بنابراین، این جدول نشان می‌دهد که در دوره زمانی ۲۰۵۱-۲۰۶۶ تحت سناریو SSP 2-4.5، ایستگاه‌های مختلف با افزایش گازهای گلخانه‌ای درگیر با تغییر اقلیم هستند و میزان افزایش دما در هر منطقه می‌تواند با توجه به شرایط محیطی و ویژگی‌های آن منطقه، متفاوت باشد.

جدول ۶. تغییر میانگین دمای حداکثر ماهانه و سالانه ایستگاه‌های مطالعاتی تحت سناریو SSP2-4.5

ایستگاه	دوره پایه		دوره ۲۰۵۱-۲۰۶۶											
	میانگین	دسامبر	ژانویه	اکتبر	سپتامبر	اوت	ژوئیه	ژوئن	مه	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	
ایرانشهر	دوره پایه	۲۱/۰	۲۳/۸	۲۸/۷	۳۵/۰	۴۰/۹	۴۴/۰	۴۴/۳	۴۳/۱	۴۰/۵	۳۵/۳	۲۸/۹	۲۳/۴	۳۴/۱
	دوره میانی	۲۲/۰	۲۴/۷	۳۰/۲	۳۶/۹	۴۲/۹	۴۶/۲	۴۶/۶	۴۵/۴	۴۲/۳	۳۶/۸	۳۰/۵	۲۴/۷	۲۵/۸
	مقدار تغییر	۱/۰۴	۰/۹۰	۱/۵۲	۱/۸۶	۱/۹۷	۲/۱۱	۲/۳۴	۲/۲۷	۱/۸۸	۱/۴۸	۱/۵۸	۱/۲۲	۱/۶۸
چابهار	دوره پایه	۲۴/۲	۲۴/۹	۲۷/۰	۳۰	۳۲/۷	۳۲/۶	۳۲/۴	۳۱/۱	۳۱/۰	۳۱/۲	۲۹/۰	۲۶/۱	۲۹/۴
	دوره میانی	۲۵/۵	۲۶/۲	۲۸/۴	۳۱/۶	۳۴/۴	۳۵/۳	۳۴/۰	۳۲/۷	۳۲/۶	۳۲/۷	۳۰/۴	۲۷/۴	۳۰/۹
	مقدار تغییر	۱/۳۲	۱/۲۸	۱/۴۳	۱/۶۱	۱/۷۱	۱/۶۷	۱/۶۳	۱/۶۰	۱/۶۱	۱/۵۴	۱/۴۳	۱/۳۱	۱/۵۱
زاهدان	دوره پایه	۱۴/۳	۱۷/۲	۲۲/۲	۲۸/۲	۳۲/۹	۳۶/۲	۳۷/۱	۳۵/۹	۳۲/۸	۲۸/۰	۲۲/۱	۱۶/۸	۲۷/۰
	دوره میانی	۱۴/۹	۱۸/۱	۲۲/۹	۲۹/۸	۳۴/۶	۳۸/۱	۳۸/۸	۳۷/۶	۳۴/۴	۲۹/۷	۲۳/۲	۱۷/۸	۲۸/۳
	مقدار تغییر	۰/۶۴	۰/۹۱	۰/۶۷	۱/۶۲	۱/۶۳	۱/۷۱	۱/۷۴	۱/۷۰	۱/۶۳	۱/۷۲	۱/۰۷	۰/۹۲	۱/۳۵
زابل	دوره پایه	۱۵/۴	۱۸/۶	۲۴/۹	۳۲/۰	۳۷/۱	۴۰/۹	۴۲/۱	۴۰/۶	۳۶/۷	۳۰/۷	۲۳/۵	۱۷/۳	۳۰/۰
	دوره میانی	۱۶/۱	۱۹/۶	۲۶/۰	۳۳/۶	۳۹/۰	۴۲/۸	۴۴/۱	۴۲/۶	۳۸/۳	۳۲/۲	۲۴/۸	۱۸/۲	۳۱/۴
	مقدار تغییر	۰/۶۷	۱/۰۳	۱/۱۱	۱/۵۷	۱/۸۷	۱/۹۰	۲/۰۰	۱/۹۷	۱/۵۸	۱/۴۸	۱/۲۵	۰/۸۹	۱/۴۴
سراوان	دوره پایه	۱۷/۳	۲۰/۲	۲۵/۰	۳۰/۹	۳۶/۰	۳۸/۸	۳۹/۵	۳۸/۳	۳۵/۲	۳۰/۲	۲۴/۴	۱۹/۵	۲۹/۶
	دوره میانی	۱۸/۱	۲۱/۱	۲۶/۵	۳۲/۴	۳۷/۸	۴۰/۸	۴۱/۴	۴۰/۳	۳۶/۹	۳۱/۷	۲۵/۹	۲۰/۵	۳۱/۱
	مقدار تغییر	۰/۸۵	۰/۹۱	۱/۴۷	۱/۵۳	۱/۸۵	۱/۹۶	۲/۰۰	۱/۹۰	۱/۶۴	۱/۵۰	۱/۴۶	۱/۰۰	۱/۵۱

۳۲/۶	۳۷/۵	۳۱/۵	۳۵/۰	۳۴/۴	۳۳/۷	۳۵/۵	۳۷/۹	۳۸/۰	۳۴/۸	۳۰/۳	۲۶/۹	۲۵/۴	دوره پایه	ب ۱
۲	۳	۴	۵	۸	۶	۳	۴	۵	۷	۲	۵	۱	دوره	
۳۴/۳	۲۹/۰	۳۳/۱	۳۶/۷	۳۶/۳	۳۵/۷	۳۷/۳	۳۹/۹	۳۹/۹	۳۶/۸	۳۱/۸	۲۸/۴	۲۶/۶	میانی	
۵	۵	۴	۶	۳	۶	۸	۵	۹	۴	۹	۲	۹	مقدار تغییر	
۱/۷۳	۱/۵۲	۱/۶۱	۱/۷۱	۱/۸۶	۲/۰۰	۱/۸۴	۲/۰۱	۱/۹۴	۱/۹۷	۱/۵۷	۱/۴۷	۱/۲۸		

(منبع: نگارنگان، ۱۴۰۳)

با توجه به نتایج مدل سازی، مشخص شده است که میانگین حداکثر دما ماهانه در دوره زمانی ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۶ تحت سناریو SSP 2-4.5، در همه ایستگاه‌ها در حال افزایش است. برای بررسی دقیق‌تر، کمترین افزایش میانگین دما در ایستگاه‌های زابل و زاهدان در ماه ژانویه مورد بررسی قرار گرفته است. در این ماه، ایستگاه زاهدان با نرخ تغییر ۰/۶۴ درجه سلسیوس و ایستگاه زابل با نرخ تغییر ۰/۶۷ درجه سلسیوس کمترین افزایش میانگین حداکثر دما ماهانه را نشان می‌دهند. در مقابل، بیشترین افزایش میانگین دما در ایستگاه ایرانشهر در ماه‌های ژوئیه، اوت و ژوئن مشاهده می‌شود. این افزایش به ترتیب با نرخ ۲/۳۴، ۲/۲۷ و ۲/۱۱ درجه سلسیوس نسبت به دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۴ است. این نتایج نشان می‌دهند که در ماه‌های گرم، ایستگاه ایرانشهر با تغییرات بیشتری در میانگین دمای بیشینه روبه‌رو است (شکل ۳). به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که در دوره زمانی ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۶ تحت سناریو SSP 2-4.5، افزایش دمای ماهانه در ایستگاه‌ها در حال رخ دادن است. ممکن است تأثیرات این افزایش دما بر روی شرایط آب و هوایی منطقه و تغییرات زیستی در آن‌ها ایجاد تغییراتی را نیز به همراه داشته باشد.

➤ تغییر در میانگین حداکثر دما سالانه و ماهانه تحت سناریو SSP5-8.5

بر اساس جدول شماره ۷ و در دوره ۲۰۵۱-۲۰۷۶ تحت سناریو سخت‌گیرانه SSP5-8.5، حداکثر دمای سالانه ایستگاه‌های ایرانشهر، چابهار و زاهدان افزایش یافته است. ایستگاه ایرانشهر با افزایش حدود ۱/۷۵ درجه سلسیوس، ایستگاه چابهار با افزایش حدود ۱/۵۳ درجه سلسیوس و دمای سالانه ایستگاه زاهدان با افزایش حدود ۱/۴۱ درجه سلسیوس، نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. به همین ترتیب، ایستگاه‌های زابل، سراوان و کنارک نیز بیشینه دمای سالانه آن‌ها افزایش یافته است. با مقدار حدود ۱/۴۳ درجه سلسیوس، ایستگاه زابل، سپس ایستگاه سراوان با افزایش حدود ۱/۵۷ درجه سلسیوس و ایستگاه کنارک با افزایش حدود ۱/۶۷ درجه سلسیوس افزایش دما داشته‌اند. با توجه به این وضعیت، می‌توان نتیجه گرفت که در دوره مورد بررسی تحت سناریو SSP5-8.5، همه ایستگاه‌ها درگیر افزایش دما هستند، اما ایستگاه‌های ایرانشهر و کنارک بیشترین افزایش دما را نسبت به دوره پایه تجربه کرده‌اند، در حالی که ایستگاه زاهدان کمترین افزایش بیشینه دمای سالانه را نشان داده است. با توجه به این تحلیل، می‌توان نتیجه گرفت که تحت سناریوی SSP5-8.5، افزایش دما و تغییرات اقلیمی ممکن است تأثیرات جدی و عمیقی بر شرایط اقلیمی منطقه داشته باشد. این تغییرات می‌توانند منجر به پیامدهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف زیست‌محیطی و اقتصادی شوند و ضرورت برنامه‌ریزی برای مقابله با این اثرات را افزایش دهند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در دوره زمانی ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۶ تحت سناریو SSP5-8.5، بیشینه دمای ماهانه همه ایستگاه‌ها افزایش خواهد یافت. در ایستگاه‌های زاهدان و زابل کمترین افزایش بیشینه دما در ماه دسامبر و ژانویه مشاهده می‌شود و نرخ تغییر به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۸۷ درجه سلسیوس است. قابل ذکر است که این افزایش نسبت به دوره زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۴ است. همچنین، بیشترین افزایش حداکثر دما در ایستگاه ایرانشهر در ماه‌های اوت، ژوئیه، مه و سپتامبر مشاهده می‌شود و نرخ تغییر در این ماه‌ها به ترتیب ۲/۳۱، ۲/۲۴، ۲/۱۸ و ۲/۰۸ درجه سلسیوس است. نتایج نشان می‌دهد که ایستگاه ایرانشهر در ماه‌های گرم با تغییرات بیشتری در حداکثر دما روبه‌رو خواهد بود. به طور کلی، نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهند که در دوره زمانی ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۶ تحت سناریو SSP5-8.5، افزایش دمای ماهانه در تمامی ایستگاه‌ها رخ خواهد داد.

جدول ۷. تغییر میانگین دمای ماهانه و سالانه ایستگاه‌های مطالعاتی تحت سناریو SSP5-8.5

ایستگاه	دوره ماه‌ها	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	میانگین
ایرانشهر	دوره پایه	۲۱/۰۵	۲۳/۸	۲۸/۷۲	۳۵/۰۴	۴۰/۹۵	۴۴/۰۹	۴۴/۳	۴۳/۱۳	۴۰/۵	۳۵/۳۷	۲۸/۹۲	۲۳/۴۸	۳۴/۱۱
	دوره میانی	۲۱/۹۲	۲۵	۳۰/۳۶	۳۶/۹	۴۳/۱۳	۴۵/۹۶	۴۶/۵۳	۴۵/۴۴	۴۲/۵۸	۳۷/۱	۳۰/۴۳	۲۴/۹۶	۳۵/۸۶
	مقدار تغییر	-۰/۸۷	۱/۲۰	۱/۶۴	۱/۸۶	۲/۱۸	۱/۸۷	۲/۲۴	۲/۳۱	۲/۰۸	۱/۷۳	۱/۵۰	۱/۴۸	۱/۷۵
فصل بهار	دوره پایه	۲۴/۲	۲۴/۹۲	۲۷/۰۳	۳۰	۳۲/۷۲	۳۳/۶۲	۳۲/۴	۳۱/۱۲	۳۱/۰۷	۳۱/۲۲	۲۹/۰۶	۲۶/۱۴	۲۹/۴۶
	دوره میانی	۲۵/۴۱	۲۶/۳۶	۲۸/۴۸	۳۱/۶	۳۴/۴۳	۳۵/۲۶	۳۴/۰۷	۳۲/۷۴	۳۲/۶۹	۳۲/۷۷	۳۰/۵۷	۲۷/۴۶	۳۰/۹۹
	مقدار تغییر	۱/۲۱	۱/۴۴	۱/۴۵	۱/۶۰	۱/۷۲	۱/۶۴	۱/۶۷	۱/۶۳	۱/۶۲	۱/۵۵	۱/۵۱	۱/۳۲	۱/۵۳
زاهدان	دوره پایه	۱۴/۳۳	۱۷/۲۲	۲۲/۲۵	۲۸/۲۳	۳۲/۹۷	۳۶/۲۱	۳۷/۱	۳۵/۹	۳۲/۸۶	۲۸/۰۴	۲۲/۱۹	۱۶/۸۹	۲۷/۰۱
	دوره میانی	۱۵/۱۹	۱۸/۴۸	۲۳/۱۸	۲۹/۷۳	۳۴/۶۵	۳۷/۹۶	۳۸/۸۹	۳۷/۷۴	۳۴/۴۹	۲۹/۵۲	۲۳/۴۹	۱۷/۷۴	۲۸/۴۲
	مقدار تغییر	-۰/۸۶	۱/۲۵	-۰/۹۳	۱/۴۹	۱/۶۸	۱/۷۵	۱/۷۹	۱/۸۴	۱/۶۳	۱/۴۸	۱/۳۱	-۰/۸۵	۱/۴۱
زابل	دوره پایه	۱۵/۴۳	۱۸/۶۵	۲۴/۹۲	۳۲/۰۳	۳۷/۱۵	۴۰/۹۹	۴۲/۱۲	۴۰/۶۶	۳۶/۷۳	۳۰/۷۲	۲۳/۵۹	۱۷/۳۵	۳۰/۰۳
	دوره میانی	۱۶/۳	۱۹/۶	۲۵/۹۳	۳۳/۶۹	۳۹/۱۱	۴۲/۷۲	۴۲/۱۲	۴۲/۵۵	۳۸/۳۶	۳۲/۰۱	۲۴/۸۲	۱۸/۳	۳۱/۴۶
	مقدار تغییر	-۰/۸۷	-۰/۹۶	۱/۰۲	۱/۶۶	۱/۹۶	۱/۷۴	۱/۹۹	۱/۸۹	۱/۶۳	۱/۲۹	۱/۲۳	-۰/۹۵	۱/۴۳
سراوان	دوره پایه	۱۷/۳۲	۲۰/۲۲	۲۵/۰۲	۳۰/۹۱	۳۶/۰۴	۳۸/۸۷	۳۹/۵	۳۸/۳۹	۳۵/۲۹	۳۰/۲۶	۲۴/۴۵	۱۹/۵۶	۲۹/۶۵
	دوره میانی	۱۸/۵۱	۲۱/۷۱	۲۶/۰۵	۳۲/۵۴	۳۸/۰۲	۴۰/۷۱	۴۱/۴۴	۴۰/۳	۳۷/۰۷	۳۱/۶۸	۲۵/۸۸	۲۰/۷۳	۳۱/۲۲
	مقدار تغییر	۱/۱۹	۱/۴۹	۱/۰۳	۱/۶۳	۱/۹۸	۱/۸۴	۱/۹۴	۱/۹۱	۱/۷۷	۱/۴۲	۱/۴۳	۱/۱۸	۱/۵۷
کنارک	دوره پایه	۲۵/۴۱	۲۶/۹۵	۳۰/۳۲	۳۴/۸۷	۳۸/۰۵	۳۷/۹۴	۳۵/۵۳	۳۳/۷۶	۳۴/۴۸	۳۵/۰۵	۳۱/۵۴	۲۷/۵۳	۳۲/۶۲
	دوره میانی	۲۶/۶۵	۲۸/۴	۳۱/۹۹	۳۶/۶۱	۳۹/۹۹	۳۹/۹۳	۳۷/۲۴	۳۵/۶۴	۳۶/۲۶	۳۶/۸	۳۳/۱۳	۲۸/۸۵	۳۴/۲۹
	مقدار تغییر	۱/۲۴	۱/۴۴	۱/۶۷	۱/۷۵	۱/۹۴	۱/۹۹	۱/۷۰	۱/۸۷	۱/۷۸	۱/۷۵	۱/۵۹	۱/۳۱	۱/۶۷

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

➤ تغییرات فصلی میانگین حداکثر دما بر اساس سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP5-8.5

با توجه به نتایج جدول ۸، در دوره مدل‌سازی ۲۰۷۶-۲۰۵۱، مشخص شد که در همه مناطق، حداکثر دما افزایش یافته است؛ اما این افزایش در سطح مناطق و فصول مختلف متفاوت بوده است. برای مثال، در فصل زمستان و تحت سناریو میانه SSP2-4.5، ایستگاه چابهار با یک نرخ افزایش بالا به دمای ۱/۴۲ درجه سلسیوس رسیده است.

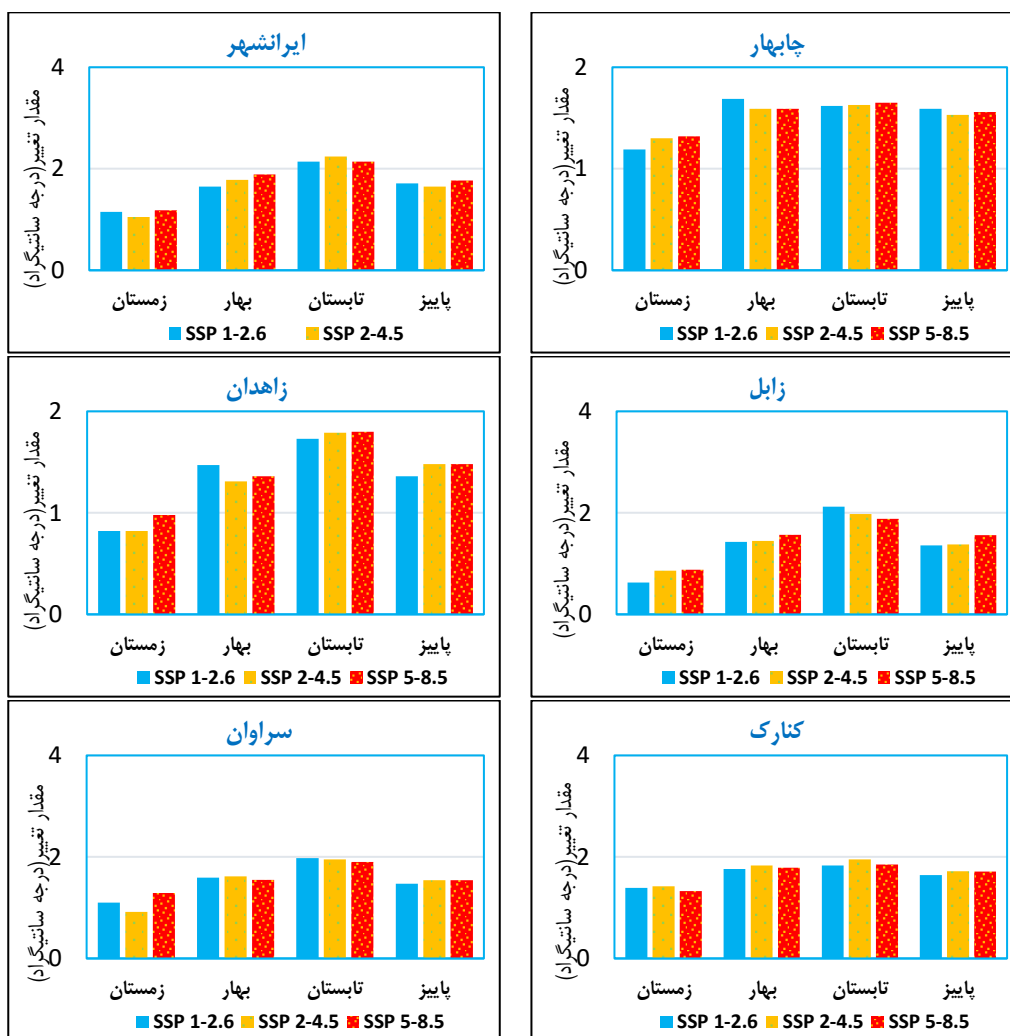
در فصل بهار و پاییز تحت سناریو خیلی بدبینانه SSP5-8.5، افزایش بیشینه دما را در ایستگاه ایرانشهر به ترتیب با نرخ ۱/۸۹ و ۱/۷۷ درجه سلسیوس شاهد هستیم و در فصل تابستان، تحت سناریو میانه SSP2-4.5 در ایستگاه ایرانشهر با نرخ ۲/۲۴ درجه سلسیوس به دمای بالایی دست یافته است. علاوه بر این، کمترین افزایش دما در سطح مناطق مربوط به فصل زمستان و تحت سناریو SSP1-2.6 بوده که در ایستگاه زابل صورت گرفته است. در فصل تابستان و پاییز با نرخ تغییر میانگین به ترتیب ۱/۶۲ و ۱/۳۱ درجه سلسیوس تحت سناریو SSP1-2.6 به ترتیب در ایستگاه‌های زابل و سراوان روی داده است.

با توجه به شکل ۲، مشاهده می‌شود که در دوره ۲۰۷۶-۲۰۵۱، میانگین حداکثر دما در همه ایستگاه‌ها افزایش یافته است. ولی تغییرات بیشینه دما در طول دوره به دلیل سناریوهای مختلف، فصل و ایستگاه متفاوت بوده است.

جدول ۸. پیش‌نگری فصلی میانگین حداکثر دما بر اساس سناریوهای SSP 5-8.5، SSP 2-4.5، SSP1-2.6 در دوره ۲۰۵۱-۲۰۷۶

ردیف	ایستگاه	دوره‌ها و سناریوها	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	ردیف	ایستگاه	دوره‌ها و سناریوها	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
1	ایرانشهر	1987-2014	۱۷/۱۴	۳۱/۳۷	۴۱/۲۶	۳۰/۳۵	4	زابل	1987-2014	۲۲/۷۸	۳۴/۹۱	۴۳/۸۴	۳۴/۹۳
		ssp1-2.6	۱۷/۷۷	۳۲/۸۰	۴۳/۳۸	۳۱/۷۱			۲۳/۹۳	۳۶/۵۶	۴۵/۹۸	۳۶/۶۴	
		ssp2-4.5	۱۸/۰۰	۳۲/۸۲	۴۳/۲۴	۳۱/۷۳			۲۳/۸۳	۳۶/۶۹	۴۶/۰۸	۳۶/۵۸	
		ssp5-8.5	۱۸/۰۲	۳۲/۹۴	۴۳/۱۴	۳۱/۹۱			۲۳/۹۶	۳۶/۸۰	۴۵/۹۸	۳۶/۷۰	
2	چابهار	1987-2014	۱۹/۰۳	۳۰/۶۶	۳۸/۹۲	۳۰/۰۰	5	سراوان	1987-2014	۲۵/۰۹	۲۹/۹۱	۳۲/۳۸	۳۰/۴۵
		ssp1-2.6	۲۰/۱۳	۳۲/۲۵	۴۰/۹۰	۳۱/۴۷			۲۶/۲۸	۳۱/۶۰	۳۴/۰۰	۳۲/۰۴	
		ssp2-4.5	۱۹/۹۵	۳۲/۲۸	۴۰/۸۷	۳۱/۵۴			۲۶/۳۹	۳۱/۵۰	۳۴/۰۱	۳۱/۹۸	
		ssp5-8.5	۲۰/۳۲	۳۲/۲۱	۴۰/۸۲	۳۱/۵۴			۲۶/۴۱	۳۱/۵۰	۳۴/۰۳	۳۲/۰۱	
3	زاهدان	1987-2014	۲۶/۶۳	۳۴/۴۱	۳۵/۷۵	۳۳/۶۹	6	کنارک	1987-2014	۱۶/۱۵	۲۷/۸۲	۲۶/۴۰	۲۷/۶۹
		ssp1-2.6	۲۸/۰۲	۳۶/۱۷	۳۷/۵۸	۳۵/۳۳			۱۶/۹۷	۲۹/۲۹	۳۸/۱۳	۲۹/۰۵	
		ssp2-4.5	۲۸/۰۵	۳۶/۲۴	۳۷/۷۰	۳۵/۴۱			۱۶/۹۷	۲۹/۱۳	۳۸/۱۹	۲۹/۱۷	
		ssp5-8.5	۲۷/۹۶	۳۶/۲۰	۳۷/۶۰	۳۵/۴۰			۱۷/۱۳	۲۹/۱۸	۳۸/۲۰	۲۹/۱۷	

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)



شکل ۲. پیش‌نگری فصلی تغییرات میانگین حداکثر دما بر اساس سناریوهای SSP 5-8.5، SSP 2-4.5، SSP1-2.6 (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

۳-۲- اختلاف میانگین دمای حداکثر بین دوره‌ها

➤ آزمون تی وابسته یا آزمون t جفت نمونه‌ای (Paired sample t test)

همان‌گونه که نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد، چون مقدار معنی‌داری یعنی Sig همه ایستگاه‌های تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 کوچک‌تر از سطح آزمون، یعنی ۰/۰۵ شده است، فرضیه صفر را رد می‌کنیم. به عبارت دیگر خروجی آزمون t نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری در میانگین داده‌های پایه (۱۹۸۷-۲۰۱۴) و دوره آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۶) وجود دارد. در قسمت (Upper و Lower) این جدول به ترتیب کران‌های پایین و بالای یک فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین اختلاف دو متغیر است، چون اختلاف میانگین همه ایستگاه‌های تحت سناریوهای مذکور با ۹۵٪ اطمینان اختلاف در فاصله بازه کمترین و بیشترین سطح اطمینان قرار می‌گیرد و صفر در این فاصله اطمینان وجود ندارد، بنابراین فرضیه صفر که نشان از عدم تغییر یا افزایش میانگین حداکثر دما در آینده میانی تحت سناریوهای مورد بررسی است، رد خواهد شد. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اظهار داشت که میانگین حداکثر دما در دوره آینده میانی با میانگین حداکثر دما دوره پایه تفاوت معنی‌داری دارد. قابل ذکر است سطح معنی‌داری به صورت سالانه محاسبه شده است.

جدول ۹. سطح معنی‌داری و فاصله اطمینان میانگین حداکثر دما بر اساس سناریوهای SSP با آزمون t جفتی

سناریو ها	آزمون تی وابسته	ایرانشهر	چابهار	زاهدان	زابل	سراوان	کنارک	
SSP1-2.6	میانگین	1/67	1/52	1/34	1/44	1/54	1/65	
	فاصله اطمینان بازه ۹۵٪	کران‌های پایین	1/39	1/37	1/07	1/16	1/3	1/51
		کران‌های بالا	1/94	1/67	1/61	1/73	1/77	1/8
	آماره تی (t)	13/37	22/11	10/87	11/11	14/45	25/36	
	مقدار معنی‌داری (Sig. (2-tailed)	0	0	0	0	0	0	
SSP2-4.5	میانگین	1/68	1/51	1/35	1/44	1/51	1/73	
	فاصله اطمینان بازه ۹۵٪	کران‌های پایین	1/39	1/42	1/05	1/16	1/25	1/58
		کران‌های بالا	1/98	1/61	1/64	1/73	1/76	1/88
	آماره تی (t)	12/44	34/59	9/99	11/11	12/91	24/88	
	مقدار معنی‌داری (Sig. (2-tailed)	0	0	0	0	0	0	
SSP5-8.5	میانگین	1/75	1/53	1/41	1/43	1/57	1/67	
	فاصله اطمینان بازه ۹۵٪	کران‌های پایین	1/47	1/43	1/17	1/16	1/36	1/52
		کران‌های بالا	2/02	1/62	1/64	1/7	1/78	1/82
	آماره تی (t)	13/9	35/33	13/37	11/59	16/54	24/66	
	مقدار معنی‌داری (Sig. (2-tailed)	0	0	0	0	0	0	

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

۳-۳- روند تغییرات دمایی با استفاده از آزمون من-کندال

نتایج تحلیل روند با استفاده از آزمون من-کندال نشان می‌دهد که در اکثر ایستگاه‌ها، روند صعودی معناداری در تغییرات میانگین دمای حداکثر در دوره‌های پایه و آینده میانی وجود دارد (جدول ۱۰). این روند در سطح اطمینان ۹۹٪ ($P < 0.01$) و ۹۵٪ ($P < 0.05$) معنادار بوده و نشان‌دهنده افزایش چشمگیر دما در برخی ایستگاه‌ها است. روند صعودی در سناریوی SSP5-8.5، که بیانگر بالاترین سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای است، بیشترین شدت را نشان می‌دهد. در مقابل، روندهای نزولی دما در تمامی ایستگاه‌ها غیرمعنادار بوده و بیانگر عدم کاهش دما در منطقه است. در این میان، ایستگاه کنارک در هیچ یک از دوره‌های مورد بررسی، روند معناداری (صعودی یا نزولی) در سطوح اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪ نداشته است.

سطوح معناداری در جدول فوق به وسیله ستاره مشخص شده‌اند: یک ستاره (*) نشان‌دهنده سطح اطمینان ۹۵٪ ($P < 0.05$) است، که به معنای وجود روند معنادار با احتمال خطای کمتر از ۵٪ است. دو ستاره (**) نشان‌دهنده سطح اطمینان ۹۹٪ ($P < 0.01$) بوده و بیانگر وجود روند معنادار با احتمال خطای کمتر از ۱٪ است. روندهای معنادار در این سطوح بیانگر تأثیر جدی تغییرات اقلیمی

بر افزایش دما در منطقه هستند. این نتایج، پیامدهای مهمی برای برنامه‌ریزی‌های اقلیمی و مدیریت منابع کشاورزی داشته و نیاز به اقدامات انطباقی برای مقابله با تغییرات اقلیمی را تأکید می‌کنند.

جدول ۱۰. روند تغییرات میانگین دمای حداکثر با استفاده از آزمون من-کندال

ایستگاه	دوره‌ها	Z-Value	روند صعودی P- (Value)	روند نزولی P- (Value)	ایستگاه	دوره‌ها	Z-Value	روند صعودی P- (Value)	روند نزولی P- (Value)
ایرانشهر	دوره پایه	۲/۷۸۶	۰/۰۰۳(**)	۰/۹۹۷	زاهدان	دوره پایه	۲/۷۸۶	۰/۰۰۳(**)	۰/۹۹۷
	SSP1-2.6	۲/۰۷۸	۰/۰۱۹(*)	۰/۹۸۱		SSP1-2.6	۲/۰۷۸	۰/۰۱۹(*)	۰/۹۸۱
	SSP2-4.5	۱/۹۳۸	۰/۰۲۶(*)	۰/۹۷۳		SSP2-4.5	۱/۹۳۸	۰/۰۲۶(*)	۰/۹۷۳
	SSP5-8.5	۴/۴۶۰	۰/۰۰۰(**)	۱/۰۰۰		SSP5-8.5	۴/۴۶۰	۰/۰۰۰(**)	۱/۰۰۰
شیراز	دوره پایه	۲/۵۶۹	۰/۰۰۵(**)	۰/۹۹۵	مشهد	دوره پایه	۲/۵۶۹	۰/۰۰۵(**)	۰/۹۹۵
	SSP1-2.6	۲/۶۸۶	۰/۰۰۴(**)	۰/۹۹۶		SSP1-2.6	۲/۶۸۶	۰/۰۰۴(**)	۰/۹۹۶
	SSP2-4.5	۲/۶۹۰	۰/۰۰۴(**)	۰/۹۹۶		SSP2-4.5	۲/۶۹۰	۰/۰۰۴(**)	۰/۹۹۶
	SSP5-8.5	۳/۸۰۷	۰/۰۰۰(**)	۰/۹۹۹		SSP5-8.5	۳/۸۰۷	۰/۰۰۰(**)	۰/۹۹۹
زرت	دوره پایه	۳/۷۳۴	۰/۰۰۰(**)	۰/۹۹۹	کرمان	دوره پایه	۱/۴۱۷	۰/۰۷۸	۰/۹۲۲
	SSP1-2.6	۳/۸۰۶	۰/۰۰۰(**)	۰/۹۹۹		SSP1-2.6	۱/۱۹۱	۰/۱۱۶	۰/۸۸۳
	SSP2-4.5	۱/۶۵۸	۰/۰۴۸(*)	۰/۹۵۱		SSP2-4.5	-۰/۳۵۰	۰/۶۳۶	۰/۳۶۳
	SSP5-8.5	۴/۰۴۰	۰/۰۰۰(**)	۰/۹۹۹		SSP5-8.5	۱/۲۳۸	۰/۱۰۷	۰/۸۹۲

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

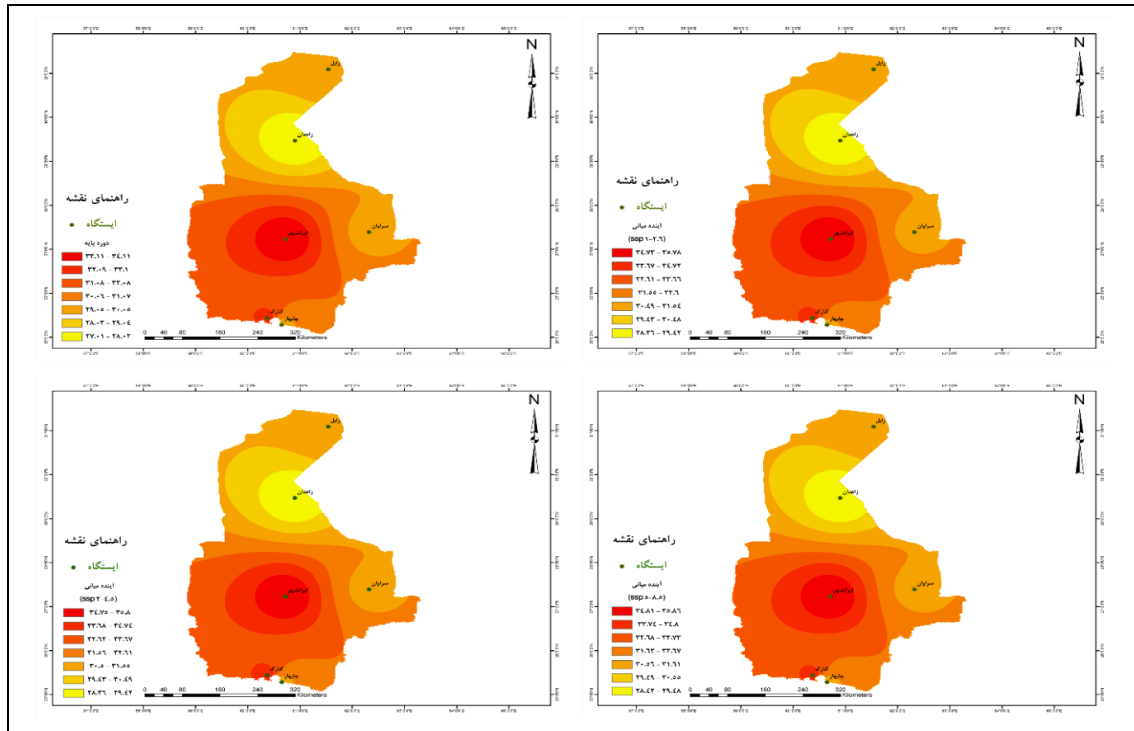
۳-۴- تحلیل فضایی تغییرات میانگین سالانه دمای حداکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه

در شکل ۳، تغییرات فضایی میانگین سالانه حداکثر دما با استفاده از رنگ‌های گرم (زرد تا قرمز) نمایش داده شده است. در دوره مطالعاتی، میانگین سالانه حداکثر دما در سطح استان سیستان و بلوچستان تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه با پژوهش فرزانه و همکاران همراستا است (Farzane et al., 2023). با این حال، میزان این افزایش در نقاط مختلف استان متفاوت خواهد بود. نقشه‌های پهنه‌بندی نشان می‌دهد که افزایش دما در نواحی مرکزی استان، به ویژه در ایستگاه ایرانشهر، بیشتر خواهد بود. در مقابل، نواحی شمالی استان، مانند ایستگاه زاهدان به علت قرار گرفتن در منطقه نیمه‌بیابانی و ارتفاع بالاتر میانگین حداکثر دما سالانه در این ایستگاه، افزایش کمتری نسبت به دوره پایه خواهد داشت. واقع شدن در منطقه بیابانی، عرض جغرافیایی پایین‌تر و ارتفاع کمتر از سطح دریا (ایستگاه ایرانشهر) و همچنین نزدیکی به دریا و رطوبت بالای جو که باعث ایجاد شرایط گلخانه‌ای می‌شود موجب افزایش میانگین حداکثر دما خواهد بود. نتایج تحقیق حاضر با نتایج پژوهش صابر و سبحانی همخوانی دارد (Saber & Sobhani, 2018). به طور کلی، این نتایج نشان‌دهنده اهمیت توجه به تفاوت‌های منطقه‌ای در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری برای مقابله با تغییرات اقلیمی است.

۳-۵- بحث

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که در سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش میانگین حداکثر دما در ایستگاه‌های مختلف استان سیستان و بلوچستان به‌طور قابل ملاحظه‌ای پیش‌نگری می‌شود. به‌ویژه در سناریو SSP5-8.5 که بالاترین سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای و کمترین اقدامات کاهش را در نظر می‌گیرد، ایستگاه‌های ایرانشهر و کنارک با بیشترین افزایش دما روبه‌رو خواهند بود. این افزایش دما در ایرانشهر ممکن است به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی این منطقه، از جمله دوری از منابع آبی و ویژگی‌های توپوگرافی باشد. در کنارک نیز با وجود نزدیکی به منابع رطوبتی دریای عمان، افزایش دما به دلیل تغییرات در الگوهای جوی، گرمایش آب‌های سطحی دریا و کاهش اثرات تعدیل‌کننده دریا ممکن است رخ دهد که این مسئله می‌تواند منجر به تشدید دما در مناطق ساحلی شود. در مقابل، ایستگاه زاهدان که در ارتفاع بالاتری قرار دارد و احتمالاً به همین دلیل کمتر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته، کمترین افزایش دما را تجربه خواهد کرد. این افزایش دما می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای بر اقلیم منطقه داشته

باشد، از جمله تشدید خشکسالی‌ها، کاهش منابع آبی و تأثیرات منفی بر کشاورزی و معیشت ساکنان محلی. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده نیاز فوری به تدوین و اجرای استراتژی‌های مدیریتی و سازگاری برای مقابله با اثرات احتمالی تغییرات اقلیمی است تا از تأثیرات منفی این تغییرات بر اکوسیستم‌ها و جوامع محلی کاسته شود.



شکل ۳. نقشه‌های میانگین سالانه حداکثر دما دوره پایه و سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP5-8.5، (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی تغییرات اقلیمی شش ایستگاه هواشناسی ایرانشهر، چابهار، زاهدان، زابل، سراوان و کنارک در استان سیستان و بلوچستان در دوره‌های پایه و آینده میانی پرداخته‌ایم. از سه مدل GCM مختلف استفاده کرده‌ایم که شامل CanESM5، NorESM2-MM و MPI-ESM1-2-HR هستند. داده‌های ارائه شده توسط CMIP6 برای دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۱۴) و دوره آینده میانی (۲۰۱۵-۲۰۷۶) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های میانگین مربعات خطا، ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل CanESM5 بهترین عملکرد را دارد. در نتایج به دست آمده، افزایش میانگین حداکثر دما در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه مشاهده شده است. پیش‌نگری‌ها نشان می‌دهد که بیشترین افزایش میانگین حداکثر دما در ماه ژوئیه تحت سناریو SSP5-8.5 در ایستگاه ایرانشهر رخ خواهد داد، در حالی که کمترین افزایش دما تحت سناریو SSP1-2.6 در ایستگاه زابل مشاهده می‌شود. در مقیاس سالانه، ایستگاه ایرانشهر تحت سناریو SSP5-8.5 و زاهدان تحت سناریو SSP1-2.6 بیشترین و کمترین افزایش دما را خواهند داشت. علاوه بر این، با توجه به افزایش میانگین فصلی حداکثر دما، بیشترین افزایش دما در فصل تابستان تحت سناریو SSP2-4.5 در ایستگاه ایرانشهر رخ خواهد داد. در عین حال، کمترین افزایش مقدار دما در فصل زمستان، تحت سناریو SSP1-2.6 در ایستگاه زاهدان اتفاق خواهد افتاد و همچنین نتایج تحلیل فضایی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، رطوبت جو، پوشش گیاهی، اثر گلخانه‌ای جو و... عواملی هستند که باعث ایجاد اختلاف و افزایش میانگین حداکثر دما در ایستگاه‌های مختلف استان شده و احتمال رویداد آن در دوره آینده وجود دارد. با توجه به انطباق نتایج این تحقیق با پژوهش پگاه‌فرد که به بررسی تغییرات حداکثر دما در دوره نزدیک پرداخته است (Pegahfard, 2022) و همچنین مطالعه‌ای که توسط حمیدیان‌پور و حجازی‌زاده در خصوص تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو

در استان سیستان و بلوچستان انجام شده و نشان‌دهنده افزایش دما در دوره‌های آتی است (Hamidian Pour & Hajazi Zadeh, 2012)؛ می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات اقلیمی قابل توجهی در این منطقه رخ داده و در آینده نیز ادامه خواهد یافت. افزایش دمای آینده نیز ممکن است منجر به تأثیرات گسترده‌ای در این منطقه شود. لذا ارزیابی مداوم و پایش تغییرات اقلیمی و آب و هوایی در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از مدل‌های اقلیمی جهانی جدیدتر و تکمیل داده‌های مشاهداتی به منظور بهبود دقت پیش‌نگری‌ها ضروری است. همچنین، تدوین برنامه‌های مدیریتی و راهکارهای سازگاری متناسب با الگوی تغییرات دمایی پیش‌نگری شده در این منطقه برای کاهش اثرات سوء تغییرات اقلیمی بر جوامع محلی و محیط زیست اهمیت زیادی دارد.

ارتقا و توسعه زیرساخت‌های مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی در حوزه‌های مختلف مانند کشاورزی، آب و انرژی در استان سیستان و بلوچستان باید در اولویت قرار گیرد. افزایش آگاهی عمومی و آموزش جوامع محلی در زمینه تغییرات اقلیمی و چگونگی سازگاری با آن نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نهایت، همکاری میان سازمان‌های دولتی، بخش خصوصی و جامعه محلی برای اجرای برنامه‌های مقابله با تغییرات اقلیمی در استان سیستان و بلوچستان ضروری است.

۵- سپاس‌گزاری

از حمایت‌های معنوی دانشگاه حکیم سبزواری در انجام این پژوهش تشکر می‌گردد.

۶- فهرست منابع

- اداره کل هواشناسی استان سیستان و بلوچستان. (۱۴۰۰). واحد آمار و اطلاعات <https://sbmeteo.ir>
- احمدی، حمزه، فلاح قاهری، غلامعباس، با عقیده، محمد. (۱۳۹۷). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر الگوی انباشت گرمایی مناطق کشت درخت سیب در ایران در دوره آینده. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲، ۳۵-۵۴. <https://doi.org/10.29252/jsaeh.5.2.35>
- افشاری نیا، مهدیه، پناهی، فاطمه، احترام، محمد. (۱۴۰۲). ارزیابی تغییرات اقلیمی با استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: دشت کاشان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۴ (۲)، ۲۳۷-۲۵۶. <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.383176.1704>
- خواجه امیری خالدی، چکاوک، خسروی، محمود، طاوسی، تقی، حمیدیان پور، محسن، کیانی مقدم، منصور. (۱۴۰۱). صحت‌سنجی عملکرد برون‌داد مدل اقلیمی CMIP6 با داده‌های مشاهداتی کرانه‌های مکران. نشریه هواشناسی و علوم جو، جلد ۵، شماره (۱)، صفحات ۲۲-۴۱. <https://doi.org/10.22034/jmas.2023.379448.1193>
- حبیب پور، کرم، صفری، رضا. (۱۳۸۸). راهنمای جامع کاربرد SPSS در تحقیقات پیمایشی. تهران: نشر لویه.
- حمیدیان پور، محسن، حجازی زاده، زهرا. (۱۳۹۱). بررسی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل گردش عمومی جو، نمونه موردی استان سیستان و بلوچستان، همایش ملی شهرهای مرزی و امنیت، چالش‌ها و رهیافت‌ها. ۳۸۰-۳۹۰. <https://www.sid.ir/paper/818413/fa>
- زرین، آذر، داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده مرحله ششم (CMIP6)، فیزیک زمین و فضا، ۴۶ (۳): ۶۰۲-۵۸۳. <https://doi.org/10.30488/ccr.2022.340823.1078>
- درگاه ملی آمار (خانه-اطلاعات استانی). بایگانی‌شده از اصلی در ۱۸ فوریه ۲۰۱۲. دریافت شده در ۲۰ فوریه ۲۰۱۲.
- سرابی، مجتبی، دستورانی، محمد تقی، زرین، آذر. (۱۳۹۹). بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی آینده بر وضعیت دما و بارش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد طرق مشهد). هواشناسی و علوم جو، ۳، ۱۱۲۹-۱۱۲۹. <https://doi.org/10.22034/jmas.2021.278862.1129>
- صابر، مهناز، سبحانی، بهروز. (۲۰۱۸). بررسی تغییرات زمانی و مکانی متوسط حداکثر دما در ایران طی سال‌های ۲۰۱۵-۱۹۹۱. اندیشه جغرافیا، ۹(۱۸)، ۴۵-۶۸. https://geonot.znu.ac.ir/article_31612.html
- عبدالعلی‌زاده، فیروز، خورشیددوست، علی محمد، جهانخوش، سعید. (۱۴۰۲). پیش‌نگری چشم‌انداز آتی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه مبتنی بر مدل‌های CMIP6. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۵، شماره (۱)، صفحات ۹۵-۱۱۲. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.352727.1007737>

فرزانه، مهسا، ملبوسی، شراره، حمیدیان پور، محسن. (۱۴۰۱). پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی استان سیستان و بلوچستان تحت شرایط سناریوهای واداشت تابشی RCP. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۱(۵۱)، ۱۴۸-۱۳۹. https://clima.irimo.ir/article_148317.html

فرزانه، مهسا. (۱۴۰۰). سیستان و بلوچستان جغرافیای تمدن، ایران، انتشارات: نگاران سبز

مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵، سرشماری عمومی نفوس و مسکن استان سیستان و بلوچستان www.amar.org.ir

نیرومندفرد، فریبا، خاشعی سیوکی، عباس، هاشمی، سید رضا، قربانی، خلیل. (۲۰۲۲). بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های (CMIP6 مطالعه موردی: ایستگاه بیرجند). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۹)، ۲۰۰۹-۲۰۲۶. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343936.669284>

وکیلی، نیما. (۱۳۹۸). بررسی تاثیر شبکه‌های اجتماعی بر کیفیت کیفیت گردشگری استان سیستان و بلوچستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مدیریت و اقتصاد، رشته مدیریت، زاهدان.

References

- Abdollahzadeh, Firouz, Khorshiddoost, Ali Mohammad, Jahanbakhsh, Saeed. (2023). Forecasting the Future Temperature and Precipitation Outlook for the Urmia Lake Watershed Based on CMIP6 Models. *Journal of Natural Geography Research*, 55 (1), 112-95. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.352727.1007737>
- Afshari-Nia, Mahdieh, Panahi, Fatemeh, Ehteram, Mohammad. (2023). Climate Change Assessment Using CMIP6 Model Outputs (Case Study: Kashan Plain). *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering Research*, 14 (2), 237-256. <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.383176.1704>
- Ahmadi, Hamzeh, Fallah Qalehri, Gholamabbas, Baqideh, Mohammad. (2018). Study of the Effects of Climate Change on the Heat Accumulation Pattern of Apple Orchard Areas in Iran in the Future Period. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 2, 54-35. <https://doi.org/10.29252/jsaeh.5.2.35>. [In Persian]
- Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Nazrul Islam, M., Ismail, M., Klutse, N. A. B., & Siddiqui, M. H. (2020). Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4, 455-475. doi.org/10.1007/s41748-020-00161-x
- Das, S., Islam, A. R. M. T., & Kamruzzaman, M. (2023). Assessment of climate change impact on temperature extremes in a tropical region with the climate projections from CMIP6 model. *Climate Dynamics*, 60(1), 603-622. doi.org/10.1007/s00382-022-06416-9
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016, 2016.
- Farzaneh, Mahsa, Malboosi, Sharareh, Hamidian Pour, Mohsen. (2023). Forecasting Climate Variables of Sistan and Baluchestan Province under RCP Radiative Forcing Scenarios. *Climatic Research*, 1401 (51), 148-129.
- Farzaneh, Mahsa. (2021). *Sistan and Baluchestan: Geography of Civilization*, Iran, Green Writers Publishing.
- Francisco, b, u, d · Teymouri, m · Chatterjee, u, Assessment of temperature changes over Iran during the twenty-first century using CMIP6 models under SSP1-26, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios, *Arabian Journal of Geosciences*, Volume 15, article number 416, (2022). doi.org/10.1007/s12517-022-09709-9
- General Directorate of Meteorology of Sistan and Baluchestan Province (2021). *Statistics and Information Unit* <https://sbmeteo.ir>
- Ghazi, b, Jeihouni, e. Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, Volume 15, article number 621, (2022). DOI:10.1007/s12517-022-09848-z. [In Persian]
- Habibpour, Karam, Safari, Reza. (2011). *Comprehensive Guide to Using SPSS in Survey Research*. Tehran: Loya Publishing. [In Persian]
- Hamed, M. M., Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2022). Inter-comparison of historical simulation and future projections of rainfall and temperature by CMIP5 and CMIP6 GCMs over Egypt. *International Journal of Climatology*, 42(8), 4316-4332. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-718538/v1>
- Hamidian Pour, Mohsen, Hajazi Zadeh, Zahra. (2012). Study of Temperature and Precipitation Changes Using General Circulation Model: A Case Study of Sistan and Baluchestan Province. *National Conference on Border Cities and Security, Challenges and Approaches*, 390-380. <https://www.sid.ir/paper/818413/fa>. [In Persian]

- Hewitt, H., & Dunne, J. (2024). Evolving The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) To Better Support The Climate Community And Future Climate Assessments (No. EGU24-6364). Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-6364>
https://clima.irimo.ir/article_148317.html
<https://doi.org/10.22034/jmas.2021.278862.1129>
- Iran Statistical Center, 2016. General Census of Population and Housing in Sistan and Baluchestan Province. www.amar.org.ir
- Khajeh Amiri Khaledi, Chikavak, Khosravi, Mahmoud, Tavousi, Taghi, Hamidian Pour, Mohsen, Kiani Moghaddam, Mansour. (2023). Validation of CMIP6 Climate Model Outputs with Observational Data of the Makran Coast. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 5 (1), 22-41. <https://doi.org/10.22034/jmas.2023.379448.1193> . **[In Persian]**
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA , pp. 3–32, (2021) . doi:10.1017/9781009157896.001
- National Statistical Portal (Home- Provincial Information). Archived from the original on February 18, 2012. Retrieved on February 20, 2012.
- Niroomandfard, Fariba, Khashai Siouki, Abbas, Hashemi, Seyed Reza, Ghorbani, Khalil. (2022). Climate Change Forecasting on Temperature and Precipitation Parameters Using CMIP6 Models (Case Study: Birjand Station). *Iranian Water and Soil Research*, 53 (9), 2009-2026. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343936.669284> . **[In Persian]**
- Pegahfard , n , Assessment of Climate change Over Sistan-and-Baluchestan Province of Iran using CMIP6 GCMs; In,terms of Precipitation and Surface Air Temperature, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, 4885-7428,(2022). DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1252589/v1> . **[In Persian]**
- Qin, J., Su, B., Tao, H., Wang, Y., Huang, J., & Jiang, T. (2021). Projection of temperature and precipitation under SSPs-RCPs Scenarios over northwest China. *Frontiers of Earth Science*, 15, 23-37 <https://doi.org/10.1007/s11707-020-0847-8>
- Saber, Mahnaz, Sobhani, Behrooz. (2018). Temporal and Spatial Changes of Maximum Average Temperature in Iran during 1991-2015. *Geographical Thought*, 9 (18), 45-68. https://geonot.znu.ac.ir/article_31612.html. **[In Persian]**
- Sarabi, Mojtaba, Dastourani, Mohammad Taghi, Zarrin, Azar. (2020). Study of Future Climate Change Effects on Temperature and Precipitation (Case Study: Torgh-e Mashhad Watershed). *Meteorology and Atmospheric Sciences*, 3. **[In Persian]**
- Vakili, Nima. (2019). Investigating the Impact of Social Networks on the Quality of Tourism in Sistan and Baluchestan Province. Master's Thesis, University of Sistan and Baluchestan, Faculty of Management and Economics, Department of Management, Zahedan.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., Barrow, E.M., (2002). SDSM- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Journal of Environmental Modeling and Software*, V 17, Pp 147-159. <http://www.cdc.noaa.gov/>
- Y. Yue, D. Yan, Q. Yue, G. Ji, Z. Wang, Future changes in precipitation and temperature over the Yangtze River Basin in China based on CMIP6 GCMs, *Atmos. Res.* (2021), 105828, DOI:10.1016/j.atmosres.2021.105828,
- Zarrin, Azar, Dadashi Rudbari, Abbasali. (2020). Long-Term Temperature Forecast of Iran Based on the CMIP6 Coupled Model Outputs. *Earth and Space Physics*, 46 (3), 602-583. <https://doi.org/10.30488/ccr.2022.340823.1078>. **[In Persian]**