



Analysis and Modeling of Maximum Temperature Variability in Northern Iran's Climatic Regions Using HadGEM and GFDL-ESM4 Models

Roghayeh Maleki¹ , Bromand Salahi²  

1. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Email: r.maleki@uma.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Email: salahi@uma.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

4 June 2025

Revised:

3 September 2025

Accepted:

9 October 2025

Available online:

11 November 2025

Keywords:

Maximum Temperature,
Climate Modeling,
Northern Iran.

ABSTRACT

This study analyzes and models maximum temperature variability across the diverse climatic regions of northern Iran. In the first stage, long-term trends in maximum temperature from 1994 to 2023 were examined using the Mann–Kendall test. Subsequently, maximum temperatures for the baseline period (1980–2010) were simulated with the LARS-WG weather generator and evaluated using statistical metrics including RMSE and MAPE. Under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios, the GFDL-ESM4 and HadGEM3-GC31-LL general circulation models were employed to project maximum temperature changes for 2041–2060. Spatial variability between the baseline and projected periods was mapped using ArcGIS software. The Mann–Kendall test results indicated that at all stations, the U and U' curves intersected in the positive region, reflecting an upward trend in annual maximum temperatures over the past three decades. This trend was not statistically significant at Sanandaj, Ardabil, and Qazvin, but reached significance at the 99% confidence level at the other stations. Modeling results suggest a consistent increase in maximum temperatures across both scenarios and models for the coming two decades. The greatest increases are projected for the colder seasons, from late autumn through early spring, with the most pronounced warming in the mountainous regions of northwestern Iran. Among the tested models, GFDL-ESM4 exhibited the lowest error under the SSP2-4.5 scenario, making it the most reliable for analysis. This model projects a temperature increase of 1.0–2.2 °C, providing a more realistic representation of future thermal conditions across the climatic zones of northern Iran. These findings underscore the substantial role of northern Iran's climatic regions in shaping prospective climate change dynamics.

Citation: Maleki, R., & Salahi, B. (2025). Analysis and Modeling of Maximum Temperature Variability in Northern Iran's Climatic Regions Using HadGEM and GFDL-ESM4 Models. *Geographical planning of space quarterly journal*, 15 (3), 101-119.
<http://doi.org/10.30488/gps.2025.517345.3839>



© The Author(s)

Publisher: Golestan University Press

This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract

Introduction

Climate change and global warming rank among the most pressing environmental challenges of the present era, exerting profound effects on weather patterns across the globe. The Earth's average surface temperature has already increased by about 1.0–1.5 °C, triggering shifts in temperature regimes, precipitation patterns, and broader atmospheric processes. Projections by leading international organizations indicate that this warming trajectory is likely to continue, with additional temperature increases expected in the coming decades.

Northern Iran, characterized by pronounced geographical and climatic diversity, is especially vulnerable to rising temperatures, particularly with respect to maximum heat extremes. Such changes are expected to exert far-reaching impacts on agriculture, water resources, public health, and urban infrastructure. Key consequences include more frequent and intense heat waves, reduced agricultural productivity, and heightened risks of desertification. Accordingly, the analysis and projection of temperature trends in these regions are of critical importance.

This study aims to investigate the long-term patterns of maximum temperature across northern Iran's climatic zones and to project future conditions using advanced modeling techniques, with the objective of providing a more accurate understanding of climate change dynamics in the region.

Methodology

This study examined long-term trends in maximum temperature at 12 meteorological stations across northern Iran over a 30-year period (1994–2023), applying the non-parametric Mann–Kendall test to identify statistically significant warming trends. Subsequently, maximum temperatures for the baseline period (1980–2010) were simulated using the LARS-WG weather generator for statistical downscaling, and the results were evaluated with RMSE and MAPE performance indices.

In addition, maximum temperatures for the period 2041–2060 were projected under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios using the GFDL-ESM4 and HadGEM3-

GC31-LL general circulation models. The outputs were visualized through maximum temperature distribution maps for both baseline and future periods, employing ArcGIS software to investigate spatial and temporal patterns of warming across northern Iran's diverse climatic zones. This methodological framework offers robust projections that can support evidence-based management strategies and policy decision-making.

Results and Discussion

An analysis of maximum temperature trends from 1994 to 2023 using the Mann–Kendall test showed that all monitored stations recorded positive values for both U and U' statistics. Statistically significant upward trends at the 99% confidence level were detected in Tehran, Tabriz, Rasht, Gorgan, Bojnourd, Mashhad, Urmia, Zanjan, and Semnan. By contrast, the stations in Ardabil, Qazvin, and Sanandaj displayed abrupt fluctuations rather than consistent long-term trends. These variations are likely shaped by regional topography, distinctive climatic characteristics, and localized meteorological phenomena.

Simulations performed with the LARS-WG downscaling model, validated against MAPE and RMSE indices, demonstrated high accuracy in reproducing maximum temperature data for the baseline period. This robust performance provides a reliable foundation for projecting future maximum temperature trends. Projections from the GFDL-ESM4 and HadGEM3-GC31-LL climate models under different greenhouse gas emission scenarios indicate a consistent rise in maximum temperatures across all stations for the period 2041–2060, with the most pronounced increases occurring during the colder seasons.

The greatest temperature increases are projected under the high-emission SSP5-8.5 scenario in the HadGEM3 model, potentially driven by intensified solar radiation, reduced snow cover, and altered atmospheric circulation patterns. Conversely, the smallest increases are projected during the warmer seasons, possibly because some regions are approaching their thermal saturation

thresholds. Geographically, the mountainous and colder stations in northwestern Iran—specifically Ardabil, Urmia, Tabriz, and Zanjan—are expected to experience the largest percentage increase in maximum temperatures relative to the historical baseline. This pattern, consistent with findings from global climate studies, underscores the heightened vulnerability of mountainous regions to climate change.

Comparative analysis showed that the GFDL-ESM4 model, under the intermediate SSP2-4.5 scenario, achieved the highest predictive accuracy, yielding the lowest error rates. A comparison of historical trends with future projections suggests a converging trajectory, in which the upward trend in maximum temperatures observed in the past is not only continuing but is also expected to intensify. Areas that experienced significant warming in the past are likely to undergo further temperature increases, while even regions with minor or negligible historical changes are projected to face substantial warming in the future, as indicated by the models.

Conclusion

Global research has confirmed a persistent rise in maximum temperatures, and the results of this study are consistent with these broader findings. However, the findings highlight a notable divergence, with temperature increases being more pronounced during the colder seasons of the year. This seasonal variation suggests that climatic factors, topography, and differing greenhouse gas emission scenarios play decisive roles in shaping the spatial and temporal patterns of warming.

Rising maximum temperatures are likely to exert far-reaching impacts on water resources, agriculture, energy demand, public health, and urban infrastructure. To address these challenges, policymakers and urban planners should prioritize climate adaptation strategies, including optimizing water use, developing heat-resilient agricultural practices, and integrating advanced technologies into energy management systems. Furthermore, expanding climate research to incorporate diverse models with broader spatial and temporal scales can improve predictive

accuracy and inform the development of more targeted policies.

By integrating analyses of historical trends with future projections, this study underscores the importance of sustained temperature monitoring and the urgent need for comprehensive strategies to mitigate the impacts of global warming, particularly in northern Iran.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



واکاوی و مدل سازی تغییرات دمای بیشینه در مناطق اقلیمی مختلف شمال ایران

بر اساس مدل های Had GEM و GFDL-ESM4

رقیه ملکی مرشت^۱، برومند صلاحی^۲۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: r.maleki@uma.ac.ir۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: salahi@uma.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>هدف پژوهش حاضر، واکاوی و مدل سازی تغییرات دمای بیشینه مناطق اقلیمی مختلف شمال ایران بود. بدین منظور، ابتدا، روند تغییرات دمای بیشینه ۳۰ سال اخیر (۲۰۲۳-۱۹۹۴) بر اساس آزمون Kendall- Mann واکاوی گردید. در مرحله بعد، با استفاده از ریزگردان LARS-WG، دمای بیشینه دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۱۰) شبیه سازی و با شاخص های آماری RMSE و MAPE ارزیابی شد و سپس تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دو مدل GFDL-ESM4 و HadGEM3-GC31-LL برای ۲۰ سال آینده (۲۰۴۰-۲۰۶۰) پیش بینی گردید. به منظور مقایسه تغییرات دمایی دو دوره، پراکندگی دمای بیشینه دوره پایه و پیش بینی شده، در نرم افزار Arc GIS پهنه بندی گردید. طبق نتایج آزمون من-کندال، در تمامی ایستگاه ها، منحنی های U و U' در ناحیه مثبت یکدیگر را قطع کرده اند که بیانگر وجود روند صعودی دمای بیشینه سالانه طی ۳۰ سال اخیر است. این روند صعودی در ایستگاه های سنندج، اردبیل و قزوین معنادار نبود اما در سایر ایستگاه، در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار بود. نتایج مدل سازی حاکی از افزایش دمای بیشینه ۲۰ سال آتی تحت سناریوهای هر دو مدل بود. بیشترین درصد افزایش دما در فصول سرد (اواخر فصل پاییز تا آغاز فصل بهار) و در مناطق کوهستانی شمال غرب ایران پیش بینی شد. بر اساس یافته ها، مدل GFDL-ESM4 تحت سناریوی SSP2-4.5 کمترین خطا را داشته و به عنوان مدل مناسب تر انتخاب شد. پیش بینی افزایش ۱ تا ۲/۲ درجه ای این مدل برای ۲۰ سال آتی، به عنوان برآوردی واقع بینانه تر از آینده حرارتی مناطق اقلیمی مختلف شمال ایران ارزیابی می شود. این یافته ها نشان دهنده تأثیرپذیری شدید مناطق مورد مطالعه از تغییرات اقلیمی آینده است.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷</p> <p>تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰</p> <p>واژگان کلیدی: دمای بیشینه، شمال ایران، مدل سازی.</p>
<p>استناد: ملکی مرشت، رقیه و صلاحی، برومند. (۱۴۰۴). واکاوی و مدل سازی تغییرات دمای بیشینه در مناطق اقلیمی مختلف شمال ایران بر اساس مدل های Had GEM و GFDL-ESM4. <i>مجله آمایش جغرافیایی فضا</i>، ۱۵ (۳)، ۱۱۹-۱۰۱.</p> <p>http://doi.org/10.30488/gps.2025.517345.3839</p>	
<p>ناشر: انتشارات دانشگاه گلستان</p>	<p>© نویسنده گان</p>

مقدمه

تغییر اقلیم و گرمایش جهانی منجر به افزایش دما و تغییر در الگوهای دمایی در اغلب نقاط جهان، از جمله ایران شده است. وقوع تغییر اقلیم به همراه افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت انسان، سبب افزایش دمای کره زمین به میزان ۱ درجه سلسیوس شده است (Bekele et al. 2019: 32). طبق گزارش ششم IPCC، دمای کره زمین در سال ۲۰۲۰-۲۰۱۱ در مقایسه با سال ۱۹۰۰-۱۸۵۰، یک و نیم درجه سلسیوس افزایش یافته است (IPCC, 2021). طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۹، تغییرات دما از جنوب به سمت شمال کشور، شدت بیشتری پیدا کرده است. طی این دوره، افزایش دمای حداکثر کلان‌شهرها، بسیار منظم‌تر از افزایش دمای حداقل در آن‌ها بوده است (Lashkari et al, 2020: 1). طبق پیش‌بینی انجام‌شده بر اساس مدل‌های CMIP6 از جمله مدل GFDL-ESM4، در آینده نزدیک بر اساس سناریوهای بدبینانه (SSP 3-7.0) و خیلی بدبینانه (SSP 5-8.5) میانگین دمای سالانه کشور به ترتیب ۱/۱۳ و ۱/۲۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت (زرین و داداشی رودبارس، ۱۴۰۰: ۷۵). مطالعات همچنین نشان داده‌اند؛ در آینده نزدیک، دمای حداکثر در غرب مازندران حدود ۱/۱ درجه سلسیوس، در شرق آن، ۰/۸۲ درجه و در آینده دور، در غرب مازندران ۱/۳۴ درجه و در شرق آن ۱/۱ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت (Vahdatifar et al, 2025: 1). دمای بیشینه، شاخصی با اهمیت استراتژیک است که تأثیر فراوانی بر کشاورزی، منابع آب، سلامت عمومی و زیرساخت‌ها دارد و افزایش چند درجه‌ای آن، موجب تشدید و طولانی‌تر شدن امواج گرمایی، افزایش مصرف انرژی برای سرمایش، کاهش منابع آب و تنش حرارتی در گیاهان، افت عملکرد محصولات حساس مانند گندم و برنج، افت کیفیت خاک و گسترش بیابان‌زایی خواهد شد. این اثرات در نواحی جلگه‌ای و کوهپایه‌ای شمال ایران که اقتصادی مبتنی بر کشاورزی و گردشگری دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص شمال ایران (وجود دریای خزر و کوه‌های مرتفع)، تغییرات دمایی، می‌تواند منجر به افزایش گرما در فصول گرم در مناطق ساحلی و کاهش سرمای زمستانی، ذوب زودهنگام برف و کاهش ذخایر برفی در ارتفاعات شود. کاهش روزهای یخبندان می‌تواند زمان‌بندی رشد و بهره‌وری کشاورزی را دگرگون کند و چرخه زیستی را مختل سازد. علاوه بر توضیحات ارائه‌شده، توجه ویژه پژوهش‌گران به بحث تغییر اقلیم و افزایش دما، اهمیت این مسئله را آشکارتر می‌سازد.

طبق یافته‌های دیمری و همکاران^۱ (۲۰۱۸) تحت سناریوهای RCP دمای حداکثر و حداقل در منطقه هیمالیا به‌طور میانگین در هر دهه به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۲۳ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. شيفرا و همکاران^۲ (۲۰۱۸) به شبیه‌سازی شرایط اقلیمی آینده در شمال اسیایی پرداختند. نتایج مطالعات آنان، حاکی از افزایش ۴/۷ دمای حداکثر بوده است. نلوار و ویکار^۳ (۲۰۱۹) تغییرات دما و بارش هند را تحت دو سناریوی RCP بررسی نمودند. طبق یافته‌های آنان دما و بارش این منطقه تحت هر دو سناریو افزایش خواهد یافت. فونج و همکاران^۴ (۲۰۲۰) به پیش‌بینی آثار تغییر اقلیم بر داده‌های اقلیمی حوضه رودخانه ووجیا سوبون در کشور ویتنام پرداختند و به این نتیجه دست‌یافتند که طی دهه ۲۰۸۰ دمای بیشینه تا ۳/۹ °C افزایش خواهد یافت. سانگ و همکاران^۵ (۲۰۲۱) تغییر اقلیم قرن ۲۱ را بر اساس مدل‌های CMIP6 پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش آنان حاکی از افزایش دمای جهانی به میزان ۱/۹۲ تا ۵/۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه است. عرب سالگار و همکاران^۶ (۲۰۲۲) به بررسی تغییر اقلیم در حوضه آبخیز دز پرداخته، افزایش

1. Dimri et al.
2. Shiferaw
3. Nilawar & Waikar
4. Phuong et al
5. Sung
6. Arab Salghar et al.

دمای حداکثر و حداقل را پیش‌بینی نموده‌اند. مو و همکاران^۱ (۲۰۲۳) به بررسی روند خشک‌سالی حوضه رودخانه چنگی تحت سناریوهای SSP مدل‌های GCM پرداختند. نتایج پژوهش آنان افزایش دما را در دوره‌های آتی تأیید کرده است. ترکمان و همکاران (۱۳۹۴) به اعتبارسنجی پیش‌بینی مدل‌های HadGEM2-es و GFDL-ESM2g بر اساس بیشینه و کمینه دما پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها ضمن تأیید دقت دو مدل، حاکی از افزایش دما طی سال‌های ۲۰۴۹-۲۰۲۵ بوده که بیشترین افزایش دما در مدل GFDL-ESM2g و HadGEM2-es تحت سناریوی RCP8.5، به ترتیب به میزان ۱/۶۹ و ۲/۶۴ درجه سلسیوس پیش‌بینی شده است. شاهکویی و همکاران (۱۳۹۶) ناهنجاری‌های دوره سرد استان مازندران را با بهره‌گیری از آزمون‌های من-کندال و رگرسیون درختی بررسی کرده و وجود روند معنی‌دار افزایشی در فراوانی ناهنجاری‌های رخ داده در اکثر ایستگاه‌ها را تأیید کرده‌اند. حلبیان و همکاران (۱۳۹۶) به ارزیابی تغییر دمای بیشینه و کمینه فصلی ایران پرداخته‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است، دمای بیشینه شمال غرب ایران و جنوب شرق در هر چهار فصل بدون روند بوده و در فصل زمستان کمترین پهنه را قسمت شمال شرقی ایران به خود اختصاص داده است. کونانی و همکاران (۱۳۹۹) جهت ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز رحیم‌آباد لرستان، از مدل HadCEM3 و دو ریز گردان LARS-WG و SDSM بهره گرفته‌اند. نتایج هر دو مدل، حاکی از افزایش دما در منطقه مورد مطالعه بوده است. روشنی و حمیدی (۱۴۰۰) اثر سناریوهایی تغییر اقلیم بر دما و بارش ایستگاه ساری را بر اساس مدل‌های CMIP6 از جمله مدل HadGEM3 بررسی نموده و نتیجه‌گیری کرده‌اند که طی دوره‌های (۲۰۶۰-۲۰۴۱) و (۲۰۸۱-۲۱۰۰)، میانگین دمای این ایستگاه ۱/۱۶ تا ۴/۹ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. حشمتی و رضانی (۱۴۰۰) به پیش‌بینی تغییر اقلیم آبی کرمانشاه با مدل LARS-WG تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند. یافته‌های آنان ضمن تأیید عملکرد مدل LARS-WG، افزایش دمای حداکثر را در این منطقه پیش‌بینی نموده‌اند. فاتحی و شاهوئی (۱۴۰۰) تأثیر تغییر اقلیم بر دمای حداقل و حداکثر شهر سنج با بهره‌گیری از مدل CanESM2 پیش‌بینی نمودند. طبق یافته‌های آنان میانگین دمای حداکثر در دوره‌های آتی افزایش خواهد یافت که این افزایش اغلب در ماه‌های گرم خواهد بود. زارعیان (۱۴۰۱) اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 بررسی نمودند. طبق یافته‌های آنان، در تمامی سناریوهای انتشار، دمای سالانه در ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۲ تا ۰/۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. اکبرزاده و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از رویکرد مدل‌های گردش عمومی جو در استان‌های غربی کشور پرداختند و چنین نتیجه‌گیری کردند که در بازه زمانی ۲۰۳۵-۲۰۲۱ دمای بیشینه ۰/۲ تا ۰/۸۹ درجه سلسیوس و در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۳۶ نیز ۰/۸۶ تا ۰/۸۹ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. رزمخواه و همکاران (۱۴۰۲) آثار تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی را در ایستگاه آباد با استفاده از مدل LARS-WG ارزیابی نمودند. طبق نتایج پژوهش آن‌ها، دو پارامتر دمای حداکثر و دمای حداقل با افزایش مواجه خواهند شد. کدخدا و همکاران (۱۴۰۳) به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر متغیرهای اصلی اقلیم ایران با استفاده از ۵ مدل CMIP6 پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در کل ایران به دلیل کاهش تندی باد و افزایش دما، تنش گرمایی به‌طور چشمگیر افزایش خواهد یافت.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مطالعات مختلفی درباره تغییرات دمایی در ایران و سایر نقاط جهان انجام شده، اما تاکنون پژوهشی که هم‌زمان به تحلیل روند بلندمدت دمای حداکثر دهه‌های اخیر در گستره‌ای وسیع از شهرهای نیمه شمالی کشور و پیش‌بینی آینده آن با استفاده از ترکیب مدل‌های اقلیمی HadGEM3 و GFDL-ESM4

تحت دو سناریوی متفاوت پردازد، انجام نشده است. لذا در پژوهش حاضر، جهت واکاوی و مدل‌سازی تغییرات دمای بیشینه در مناطق اقلیمی مختلف شمال ایران و درک بهتر آثار بالقوه این تغییرات، بر اکوسیستم‌ها و فعالیت‌های انسانی، سعی بر آن است تا از به‌روزترین نسخه مولد آب و هوایی LARS-WG و دو مدل معتبر گردش عمومی جو (HadGEM و GFDL-ESM4) در چارچوب دو سناریوی انتشاری (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5) استفاده شود. به‌کارگیری این مدل‌ها و سناریوهای متفاوت، امکان بررسی طیفی از شرایط محتمل آینده را فراهم کرده، دقت تحلیل الگوهای مکانی و زمانی گرمایش را افزایش می‌دهد. این رویکرد، پایه‌ای علمی برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و حمایت از برنامه‌ریزی‌های سازگاری و مدیریت ریسک ناشی از تغییرات اقلیمی فراهم می‌سازد. دلیل انتخاب نیمه شمالی ایران، اهمیت ویژه این منطقه از لحاظ تراکم جمعیت، اقتصاد گردشگری، کشاورزی و تنوع اقلیمی آن است که مطالعه دقیق حوزه‌ای و منطقه‌ای آثار تغییر اقلیم بر دمای بیشینه در این منطقه را ضروری می‌نماید. نوآوری پژوهش حاضر، در ترکیب تحلیل گذشته‌نگر آماری با مدل‌سازی آینده‌نگر، بهره‌گیری از دو مدل جدید تحت دو سناریو بدبینانه و بینابین و تمرکز بر دمای بیشینه به‌عنوان شاخص بحرانی اقلیمی در بخش وسیعی از شهرهای مهم نیمه شمالی ایران است.

مبانی نظری

تغییر اقلیم

تغییر اقلیم به تغییر در وضعیت آب و هوایی اطلاق می‌شود که می‌تواند برای دوره زمانی طولانی و معمولاً یک دهه یا بیش‌تر تداوم یابد (IPCC, 2013).

مدل‌های گردش عمومی (GCMs)

مدل‌های گردش عمومی (GCMs) ابزاری اساسی جهت بررسی تغییر اقلیم هستند. هدف پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP) درک تغییر اقلیم گذشته و پیش‌بینی عدم قطعیت اقلیم آینده است، طی دهه‌های اخیر، از مدل‌های فاز سوم و پنجم پروژه CMIP (CMIP3 و CMIP5) به‌طور وسیع استفاده می‌شود و کارایی آن‌ها تأیید شده است (Taylor et al, 2012: 485). در فاز ششم (CMIP6) که مدل‌های آن چند سالی است که در دسترس قرار گرفته، تعداد ۱۱۲ مدل گردش عمومی از ۳۳ مؤسسه در سراسر جهان مشارکت داشته‌اند. مهم‌ترین تفاوت CMIP6 با CMIP5 استفاده از سناریوهای جدید SSPs است (O'Neill et al, 2016: 3461).

ریزگردان (LARS-WG)

پارامترهای شبیه‌سازی شده اقلیمی نیاز به مقیاس مکانی بالاتر از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو دارد. ریزمقیاس‌نمایی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مولدهای مصنوعی جو^۱ انجام می‌گیرد. این مولدها اغلب از روش توزیع نیمه تجربی و زنجیره مارکوف بهره می‌گیرند. LARS-WG جزء مولدهایی است که از توزیع نیمه تجربی استفاده می‌کند و نتایج قابل‌قبولی ارائه می‌دهد (رزمخواه و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۶). در واقع این ریزگردان، برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های GCM، با بهره‌گیری از توزیع نیمه تجربی، دوره‌های خشک و مرطوب را شبیه‌سازی می‌نماید (گودرزی، ۱۳۹۴: ۲۷۹). بنابراین ریزگردان LARS-WG، ابزاری جهت پیش‌بینی اقلیم آینده نیست. بلکه به‌منظور ارزیابی آثار تغییر اقلیم و شرایط آب و هوایی دهه‌های آتی به کار می‌رود (شاهی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۲: ۷۳۵).

مدل HadGEM^۱

مدل HadGEM که توسط مرکز هادلی بریتانیا توسعه یافته، از مدل های پیشرفته شبیه سازی اقلیم جهانی است. این مدل با تفکیک مکانی حدود $1^\circ \times 1^\circ$ و قابلیت خروجی گیری روزانه، عملکرد مطلوبی در بازتولید دما و بارش، به ویژه در مقیاس های منطقه ای، نشان داده است. توانایی آن در نمایش دقیق بازخوردهای ابر-تابش و فرایندهای جوی-اقیانوسی، موجب شده است در بسیاری از مطالعات تغییر اقلیم، به عنوان یکی از مدل های مرجع انتخاب شود (Collins et al., 2011, 1051).

مدل GFDL-ESM4^۲

مدل GFDL-ESM4 نسل جدید مدل سامانه زمین مرکز GFDL است که علاوه بر اجزای جوی و اقیانوسی، فرایندهای بایوژئوشیمیایی و چرخه کربن را نیز شبیه سازی می کند. این مدل با تفکیک مکانی جوی حدود 1° درجه و اقیانوسی حدود 0.5° درجه و بهبود شبیه سازی دینامیک اقیانوس، بازخوردهای اقلیمی و چرخه کربن، نسبت به بسیاری از GCM ها دقت بیشتری در پیش بینی روندهای دما دارد (Dunne et al., 2020: 12).

سناریوهای SSP^۳

سناریوهای SSP، سناریوهای جدیدی هستند که شامل: SSP1-1.9، SSP4-3.4، SSP3-7.0 می باشد و چهار سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP4-6.0، SSP5-8.5 نیز به روز شده سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 موجود در CMIP5 هست (Gupta et al, 2020: 590). در سناریوی متوسط (SSP2-4.5) پیش بینی می شود که انتشار جهانی از الگوهای فعلی پیروی کند. در سناریوی بدینانه (SSP5-8.5)، توسعه اقتصادی بر آثار زیست محیطی اولویت دارد و در این صورت مقابله با آثار تغییر اقلیم دشوار است (Jiménez-Navarro et al, 2021: 1803).

روش پژوهش

روند یابی دمای بیشینه با آزمون نا پارامتری من-کندال

در پژوهش حاضر به منظور روند یابی دمای بیشینه ۳۰ سال اخیر (۲۰۲۳-۱۹۹۴) در ایستگاه های منتخب نیمه شمالی ایران شامل: اردبیل، تبریز، ارومیه، زنجان، سمنان، تهران، بجنورد، مشهد، رشت، گرگان، سنجند و قزوین، از آزمون من-کندال بهره گرفته شد. چراکه برای روند یابی، در مواقعی که توزیع داده ها مشخص نباشد، نتایج آزمون های نا پارامتری همچون آزمون من-کندال، معتبرتر است؛ بنابراین، در تعیین معناداری روند، زمانی که سری زمانی دارای توزیع نرمال نیست، به منظور تأیید صحت نتایج، بهتر است علاوه بر رگرسیون، از آزمون های نا پارامتری استفاده شود. در صورت وجود روند، داده ها غیر تصادفی بوده و به منظور تعیین تصادفی بودن داده ها از روابط ۱ تا ۳ استفاده می شود:

$$t = \sum_i n_i \quad (1)$$

در فرض صفر، توزیع t در حد نرمال بوده که مقدار قابل انتظار و واریانس مرتبط، طبق معادلات ۲ و ۳ برآورد می شود:

$$E(t_i) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (2)$$

$$var(t) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (3)$$

1. Hadley Centre Global Environmental Model
2. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model

در صورت وجود روند، فرضیه صفر با مقادیر بالای قدر مطلق $u(t)$ بر اساس معادله ۴ رد خواهد شد:

$$U(t) = \frac{|t-E(t)|}{\sqrt{Var(t)}} \quad (۴)$$

طبق رابطه فوق $U(t) > 0$ روند مثبت و در حالت عکس، $U(t) < 0$ روند در سری مشاهدات منفی خواهد بود. در پژوهش حاضر، سطح اطمینان در حد ۹۵ و ۹۹ درصد در نظر گرفته شد و اصل فوق برای سری‌های زمانی معکوس نیز بر اساس معادله (۵) محاسبه گردید:

$$ui\Box = -u(t_i) \quad (۵)$$

در مدل‌های گرافیکی تولیدشده، محل تلاقی منحنی‌های ui و $ui\Box$ نقطه شروع تغییرات، شناسایی روندهای جزئی و کوتاه‌مدت، نقاط جهش و نقاط شروع تغییرات، شناسایی روند سری زمانی را در مشاهدات نشان می‌دهد. اگر منحنی‌ها چندین بار روی هم قرار گیرند، روند و یا تغییری وجود ندارد. در صورتی که نمودارهای U و U' در محدوده 1.96 و -1.96 باهم تلافی کرده و یکدیگر را قطع نمایند و خلاف جهت هم حرکت کنند، به این نقطه برخورد، نقطه جهش گفته می‌شود. در حالتی که سری ایستا باشد، دو دنباله به صورت موازی عمل کرده و یا چند بار برخورد خواهد داشت که به تغییر جهش آن‌ها منجر نخواهد شد. اگر منحنی U در خطوط بالا و پایین معنادار تلاقی کنند ولی از این خطوط خارج نشوند، به معنای تغییر ناگهانی در میانگین (و نه وجود روند) است. مبنای مقایسه برای سطح ۰/۰۵ برابر با 1.96 و -1.96 و برای سطح ۰/۰۱ برابر 2.58 و -2.58 است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۸: ۴۱).

شبیه‌سازی و پیش‌نمایی دمای بیشینه با ریز گردان LARS- WG8

برای شبیه‌سازی و پیش‌نمایی دمای بیشینه، به داده‌های روزانه دمای حداکثر، دمای حداقل، ساعات آفتابی و بارش ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب نیاز بود که از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. جهت ریزمقیاس نمایی، از به‌روزترین نسخه ریز گردان LARS-WG که LARS-WG8 است بهره گرفته شد. این نسخه، به داده‌های گزارش ششم (CMIP6) استناد می‌کند و مشکلات و محدودیت‌های موجود در نسخه‌های قبلی را ندارد و ۱۵ مدل از سری مدل‌های CMIP6 را شامل می‌شود. برای صحت سنجی خروجی ریز گردان LARS-WG، عملکرد فایل test تولیدشده توسط ریز گردان LARS-WG، با بهره‌گیری از آزمون کولموگروف اسمیرنوف (k-s) بررسی می‌گردد. همچنین با این روش، مقادیر میانگین، انحراف معیار و توزیع آماری داده‌های موجود مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، جهت بررسی سازگاری سری داده‌های مشاهداتی و تولیدشده در توزیع فصلی سری‌های تر و خشک، توزیع دمای بیشینه استفاده می‌شود. آزمون t- student به منظور بررسی معناداری میانگین ماهانه دمای بیشینه روزانه به کار می‌رود (شاهی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۲: ۷۳۵). به منظور پیش‌نگری دمای بیشینه ایستگاه‌های مورد مطالعه، ابتدا دقت و کارایی ریز گردان LARS-WG در شبیه‌سازی دمای بیشینه مورد ارزیابی قرار گرفت (روابط ۶ و ۷)، سپس تغییرات پارامتر مذکور برای هر یک از ایستگاه‌ها، با استفاده از ۲ مدل GFDL-ESM4 و HadGEM3-GC31-LL که از سری مدل‌های CMIP6 هستند، تحت دو سناریوی (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5) برای ۲۰ سال آتی پیش‌بینی شد. مدل HadGEM3 با عملکرد بسیار دقیق، قادر است تغییرات دما و تابش خورشیدی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران با دقت بسیار بالا شبیه‌سازی کند (Bagheri Khaneghahi et al, 2025: 32). همچنین در خصوص مدل GFDL-ESM4، ارزیابی‌های اخیر نشان داده‌اند که GFDL-ESM4 کمترین درصد خطای باباس (PBIAS) را در مقیاس ملی به خود اختصاص داده و مقادیر کم‌برآورد/ بیش‌برآورد آن تنها در حدود ۱ تا ۱,۹ درصد بوده است. این یافته‌ها، دقت و قابلیت اعتماد این مدل را در شبیه‌سازی و پیش‌بینی دمای ایران به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید

می‌نماید (Kamangar et al., 2025: 1265). مدل GFDL_ESM4 برای منطقه البرز و حوزه آبریز کوهستانی شمالی نیز مناسب ارزیابی شده و کمترین خطا را در بین مدل‌های مختلف گردش عمومی جو در شبیه‌سازی دما داشته است (Motiee, 2024: 25). این مدل همچنین برای پیش‌بینی دمای حداکثر ایستگاه‌های استان مازندران استفاده شده است (وحدتی‌فر و همکاران، ۲۰۲۵). بر اساس ویژگی‌های فنی HadGEM3 و GFDL-ESM4 و نتایج مطالعاتی که روی ایران انجام شده، این دو مدل برای محدوده‌ای که هم شامل مناطق خشک داخلی مثل سمنان و هم مناطق مرطوب ساحلی همچون رشت می‌باشد، انتخاب نسبتاً مناسبی هستند و با توجه به نقاط قوت هر یک از این مدل‌ها در شبیه‌سازی دمای منطقه‌ای، ترکیب خروجی‌های آن‌ها می‌تواند موجب افزایش دقت و اطمینان‌پذیری نتایج پیش‌بینی دمای بیشینه گردد.

اعتبارسنجی داده‌های تولیدشده توسط ریز گردان LARS-WG8

به منظور اعتبارسنجی داده‌های تولیدشده در ریز گردان LARS-WG و انتخاب سازگارترین مدل GCM با داده‌های مشاهداتی، از شاخص‌های آماری؛ ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شد که بر اساس روابط ۶ و ۷ حاصل می‌گردند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad (7)$$

در معادلات فوق، A_t داده‌های مشاهده شده، F_t داده‌های شبیه‌سازی شده و N تعداد داده‌ها را نشان می‌دهند.

پهنه‌بندی دمای بیشینه دوره پایه و پیش‌بینی شده

جهت ارائه ملموس و عینی یافته‌ها و مقایسه شرایط دمایی منطقه مورد مطالعه در دوره‌های گذشته و آینده، نقشه پراکندگی میانگین دمای بیشینه دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) و پیش‌بینی شده بر اساس سناریوهای دو مدل HadGEM و GFDL-ESM4 (۲۰۴۱-۲۰۶۰) در نرم‌افزار Arc GIS ترسیم شد. بدین منظور، پس از فراخوانی داده‌های میانگین دمای سالانه دو دوره (مشاهداتی و پیش‌بینی شده بر اساس سناریوهای دو مدل) در محیط ArcGIS دمای منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، پهنه‌بندی گردید. روش IDW بر اساس این اصل عمل می‌کند که نقاط مکانی نزدیک‌تر به یکدیگر، مقادیر مشابه‌تری دارند و بدین ترتیب امکان برآورد دقیق مقادیر دما در فواصل بین ایستگاه‌ها و تولید نقشه پیوسته تغییرات دما فراهم می‌گردد. دلیل انتخاب IDW سادگی، کارایی و دقت مناسب آن در مطالعات اقلیمی منطقه‌ای است.

محدوده مورد مطالعه

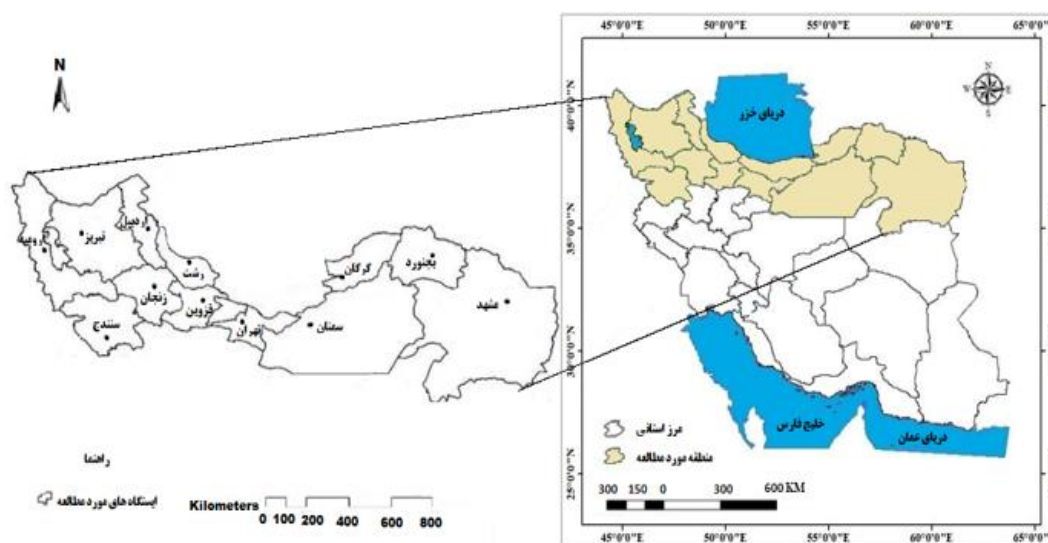
به منظور واکاوی و مدل‌سازی تغییرات دمای بیشینه در مناطق اقلیمی مختلف شمال ایران، مراکز استان‌های واقع در ۳۵ درجه عرض جغرافیایی و بالاتر، به‌عنوان ایستگاه‌های منتخب پژوهش، در نظر گرفته شدند. نیمه شمالی ایران، با توجه به وسعت منطقه، توپوگرافی خاص، در برگرفتن کوه‌ها و قله مرتفع نظیر دماوند، سبلان و سهند، همچنین دریاچه وسیع خزر و سایر دریاچه‌های داخلی، دارای اقلیم متنوع خشک و نیمه‌خشک شرقی و شمال شرقی، سرد شمال غربی و غربی و اقلیم بارانی مرطوب شمالی است و تغییرات دمای بیشینه در این منطقه، می‌تواند پیامدهای فراوانی داشته باشد.

در شکل (۱) نقشه محدوده مورد مطالعه و در جدول (۱) موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب ارائه شده است.

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی ۱۲ ایستگاه منتخب نیمه شمالی ایران

ارتفاع (m)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام ایستگاه	ارتفاع (m)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام ایستگاه
۱۳۳۵	۲۸° ۲۱'	۴۸° ۳۲'	اردبیل	۱۰۶۵	۳۷° ۴۸'	۵۷° ۳۰'	بجنورد
۱۳۶۱	۳۸° ۱۲'	۴۶° ۲۳'	تبریز	۹۹۹	۳۶° ۲۳'	۵۹° ۶۳'	مشهد
۱۳۲۸	۳۷° ۶۵'	۴۸° ۰۵'	ارومیه	۰	۳۶° ۹۰'	۵۴° ۴۱'	گرگان
۱۲۷۹	۳۶° ۲۴'	۵۰° ۰۴'	قزوین	۱۱۲۷	۳۵° ۵۸'	۵۳° ۴۲'	سمنان
۱۶۵۹	۳۶° ۶۶'	۴۸° ۵۲'	زنجان	۱۱۹۱	۳۵° ۶۹'	۵۱° ۳۰'	تهران
۱۳۷۳	۳۵° ۲۵'	۴۷° ۰۱'	سندج	-۸	۳۷° ۳۲'	۴۹° ۶۲'	رشت

منبع: (سازمان هواشناسی کشور)



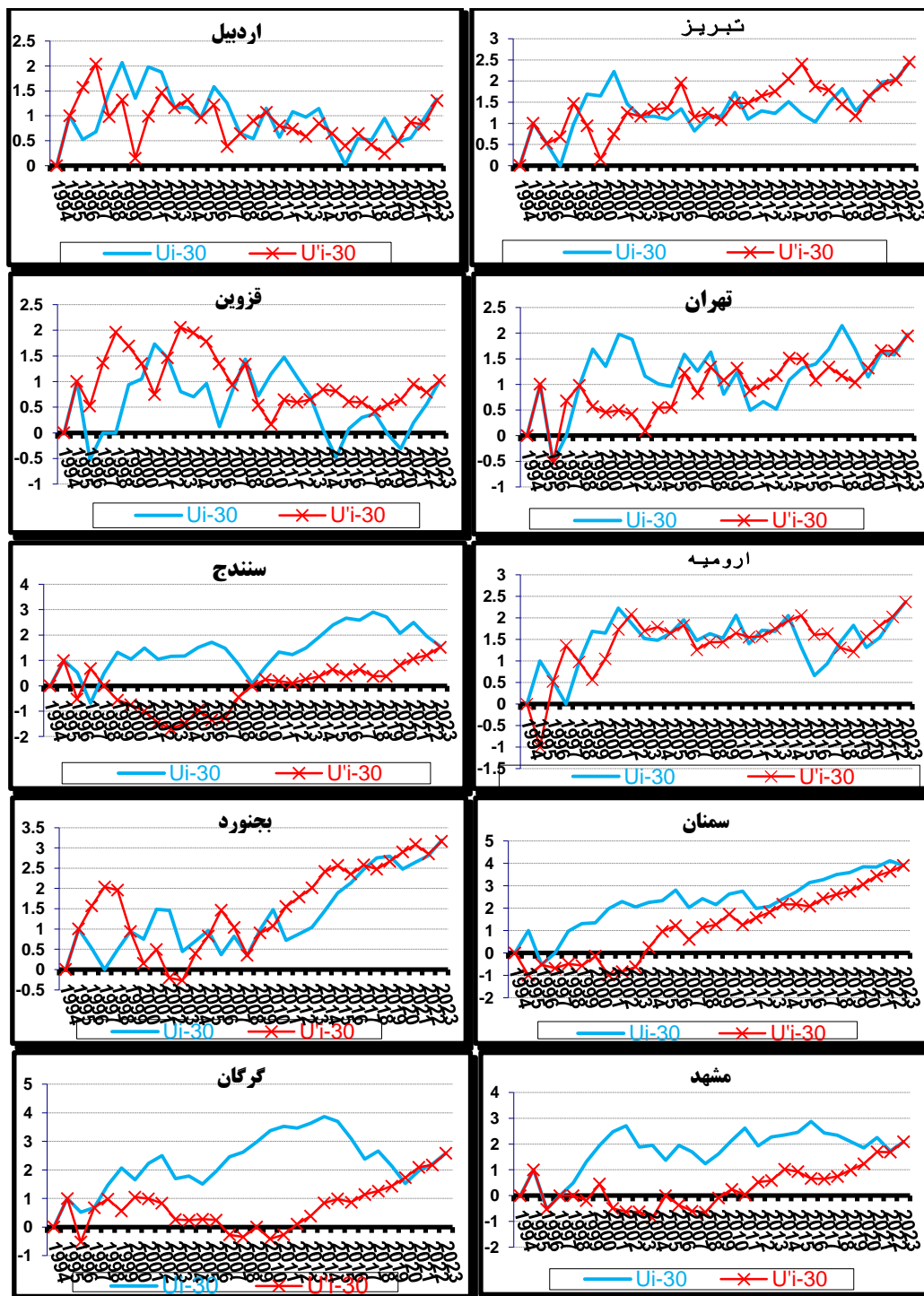
شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه

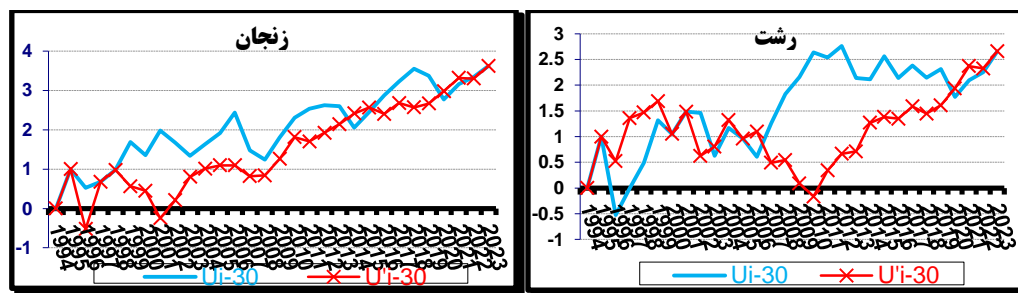
یافته‌ها

نتایج واکاوی روند و نقاط جهش از میانگین دمای بیشینه به روش Mann-Kendall

به منظور تحلیل روند میانگین دمای حداکثر، طی ۳۰ سال اخیر (۲۰۲۳-۱۹۹۴)، آزمون نا پارامتریک من-کندال برای هر یک از ۱۲ ایستگاه منتخب، در مقیاس سالانه محاسبه و نتایج حاصل در قالب نمودار، در شکل (۲) ارائه گردید. این نمودارها نشان می‌دهند که در سری میانگین دمای حداکثر سالانه، در هر ۱۲ ایستگاه، منحنی U در بازه مثبت حرکت کرده و به عبارتی دو منحنی U و U' در بازه مثبت یکدیگر را قطع کرده‌اند؛ بنابراین طی سال‌های اخیر دمای حداکثر در همه ایستگاه‌ها افزایش داشته است که این روند صعودی ممکن است در آینده نیز تداوم یابد. طی دوره آماری مورد مطالعه، مؤلفه‌های U و U' میانگین دمای حداکثر سالانه به غیر از ایستگاه‌های مشهد، سمنان و گرگان در سایر ایستگاه‌ها، تغییرات و جهش‌های زیادی داشته و دو منحنی به‌طور متوالی، باهم برخورد کرده‌اند که محل تلاقی شاخص‌های U و U' نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی در میانگین سری زمانی است. همچنان که در نمودارهای ارائه شده در شکل (۲) مشهود است، ایستگاه‌های اردبیل، قزوین و سندج کمترین و سمنان و زنجان بیشترین روند صعودی را طی ۳۰ سال اخیر تجربه کرده‌اند. در سندج، اردبیل و قزوین دو منحنی در محدوده بحرانی ± 1.96 یکدیگر را قطع کرده‌اند

که نشانگر آغاز تغییرات ناگهانی دمای حداکثر در این سه ایستگاه می‌باشد اما روند صعودی معنادار نبوده است. این در حالی است که در ایستگاه‌های گرگان، رشت، بجنورد، مشهد، تبریز، ارومیه، زنجان، سمنان و تهران، دو منحنی خارج از محدوده بحرانی یکدیگر را قطع نموده و مقادیر Z بالاتر از 2.58 می‌باشد. این شرایط، حاکی از وجود روند صعودی معنادار دمای حداکثر، در سطح اطمینان ۹۹ درصد در ایستگاه‌های مذکور است. وجود این روند مثبت معنادار، می‌تواند بازتابی از گرمایش منطقه‌ای و تغییر در رژیم‌های اقلیمی محلی باشد.





شکل ۲. روند و نقاط جهش از میانگین سری زمانی ۳۰ ساله دمای بیشینه (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

نتایج شبیه‌سازی و پیش‌نمایی دمای بیشینه ایستگاه‌های مورد مطالعه

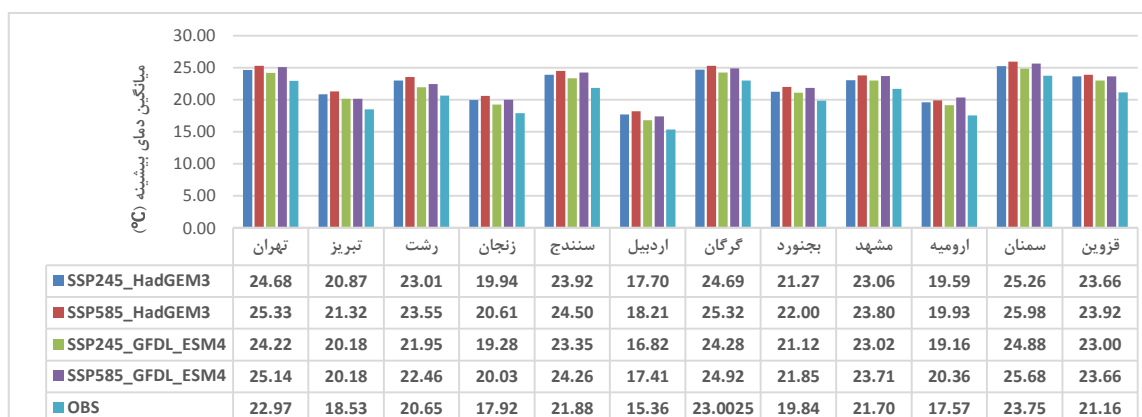
پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی و اطمینان از همگنی آن‌ها، شبیه‌سازی دمای بیشینه برای ۱۲ ایستگاه منتخب در ریزگردان LARS-WG اجرا گردید. در ادامه به منظور ارزیابی دقت این ریزگردان در شبیه‌سازی دمای بیشینه دوره پایه، خروجی نرم‌افزار، با بهره‌گیری از دو شاخص خطاسنجی MAPE و RMSE واکاوی گردید (جدول ۲). لازم به ذکر است که مقادیر حاصل از اعمال این دو شاخص، هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد خطای ریزگردان کمتر و دقت آن بیشتر است. طبق توضیحات ارائه‌شده و با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۲)، ریزگردان LARS-WG در شبیه‌سازی و پیش‌بینی دمای بیشینه، از دقت بالایی برخوردار بوده و عملکرد آن مطلوب ارزیابی می‌گردد.

جدول ۲. ارزیابی دقت ریزگردان LARS-WG در شبیه‌سازی دمای بیشینه دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۱۰)

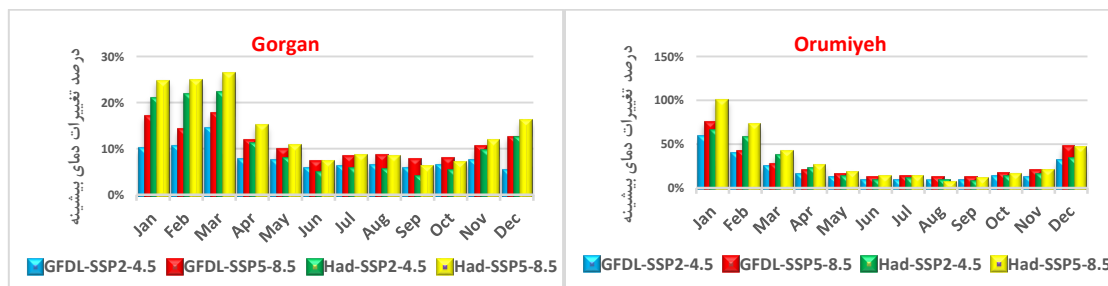
ایستگاه	MAPE	RMSE	ایستگاه	MAPE	RMSE
بجنورد	۰/۱۷	۰/۰۸	قزوین	۰/۰۹	۰/۰۷
مشهد	۰/۱۰	۰/۰۷	زنجان	۰/۰۹	۰/۰۸
گرگان	۰/۰۷	۰/۰۷	سنندج	۰/۱۵	۰/۰۸
سمنان	۰/۱۲	۰/۰۸	اردبیل	۰/۳۹	۰/۰۷
تهران	۰/۱۱	۰/۰۷	تبریز	۰/۱۱	۰/۰۵
رشت	۰/۱۳	۰/۰۹	ارومیه	۰/۱۰	۰/۰۵

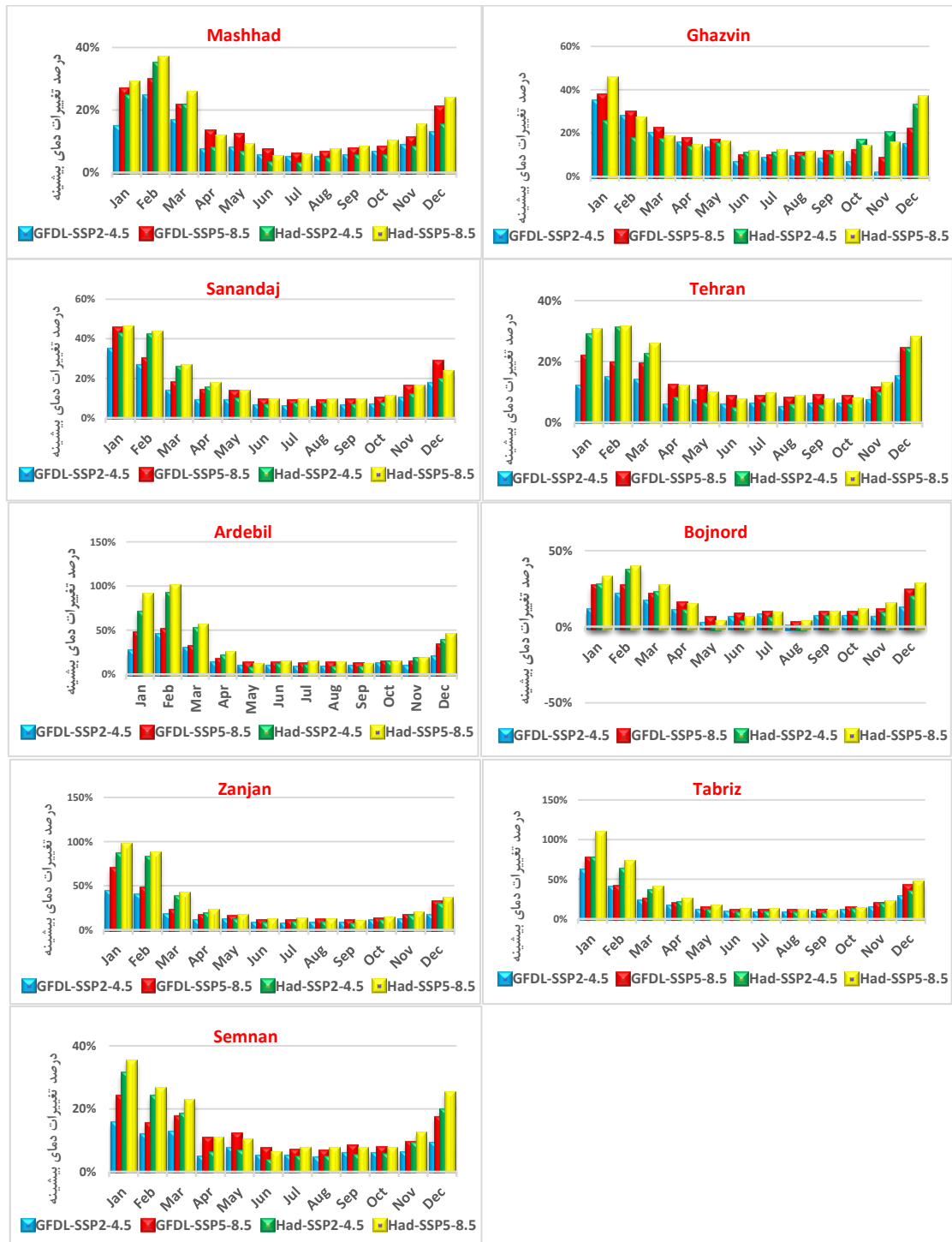
پس از ارزیابی دقت نرم‌افزار ریزگردان LARS-WG، در شبیه‌سازی دمای بیشینه دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۱۰)، این پارامتر با بهره‌گیری از دو مدل GFDL-ESM4 و HadGEM3-GC31-LL تحت سناریوهای (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5)، برای ۲۰ سال آینده (۲۰۴۱-۲۰۶۰) پیش‌بینی گردید. نمودار مقایسه‌ای تغییرات میانگین دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده بر اساس سناریوهای دو مدل HadGEM3-GC31-LL و GFDL-ESM4 (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۱۰) در شکل (۳)، نمودارهای درصد تغییرات دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده نسبت به دوره پایه در شکل (۴) و نقشه پراکندگی میانگین دمای بیشینه سالانه پیش‌بینی‌شده بر اساس سناریوهای هر دو مدل به منظور ارائه ملموس و عینی نتایج در شکل (۵) ارائه‌شده است. طبق این نمودار، طی ۲۰ سال آتی به‌طور میانگین تهران ۲/۴، تبریز ۲/۳، رشت ۲/۹، زنجان ۲/۷، سنندج ۲/۶، اردبیل ۲/۹، ارومیه ۲/۷، گرگان ۲/۳، بجنورد ۲/۲، مشهد ۲/۱، سمنان ۲/۲ و قزوین ۲/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش در دمای بیشینه تجربه خواهند کرد. بررسی نمودارهای درصد تغییرات ماهانه دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده دوره ۲۰ ساله (۲۰۴۱-۲۰۶۰) حاکی از افزایش دمای بیشینه بر اساس سناریوهای هر دو مدل در تمامی ماه‌های سال و در کل محدوده مورد مطالعه است. طبق پیش‌بینی انجام‌شده بر اساس سناریوهای هر دو مدل، بیشترین درصد افزایش دما تحت سناریوی SSP5-8.5 مدل HadGEM3-GC31-LL پیش‌بینی شد. این افزایش در هر ۱۲ ایستگاه، طی ماه‌های سرد سال (اواخر فصل پاییز تا آغاز فصل بهار) محسوس‌تر خواهد بود و اوج آن اغلب طی ماه‌های

ژانویه و مارس و کمترین درصد افزایش آن در ماه های گرم تابستان رخ خواهد داد. از نظر مکانی، ۴ ایستگاه سردسیر و کوهستانی شمال غرب ایران شامل: اردبیل، ارومیه، تبریز و زنجان بیشترین درصد افزایش دمای بیشینه ماهانه را نسبت به دوره پایه تجربه خواهند کرد. لذا بر اساس مدل HadGEM3-GC31-LL، طی سال های (۲۰۴۱-۲۰۶۰) در بدبینانه ترین حالت (تحت سناریوی SSP5-8.5) دمای منطقه مورد مطالعه تا $4/5^{\circ}\text{C}$ افزایش خواهد داشت. همچنین پایین ترین درصد افزایش دمای بیشینه ایستگاه های منطقه، تحت سناریوی بینابین SSP2-4.5 مدل GFDL-ESM4 پیش بینی گردید. بر اساس خروجی این مدل، بیشترین میزان افزایش دما حداکثر در مشهد ۱، گرگان $2/2$ ، ارومیه $1/6$ ، اردبیل ۲، بجنورد $1/6$ ، قزوین $1/9$ ، سنندج $2/1$ ، تهران $1/5$ ، زنجان $1/1$ ، تبریز $1/6$ ، رشت ۲ و در سمنان $1/3$ درجه سانتی گراد خواهد بود. لذا در منطقه مورد مطالعه افزایش دمای بیشینه طی ۲۰ سال پیش بینی شده، بین ۱ تا حدود $2/2$ درجه سانتی گراد خواهد بود. در ادامه به منظور ارزیابی دقت مدل ها و اطمینان از صحت نتایج آن ها، خروجی دو مدل بر اساس شاخص های خطاسنجی MAPE و RMSE بررسی و نتایج در جدول (۳) ارائه گردید. طبق جدول مذکور، در هر دو مدل میزان خطا کم و دقت مدل ها در پیش بینی پارامتر مورد بررسی بالا بود. با این حال با توجه به این که مدل GFDL-ESM4 تحت سناریوی SSP2-4.5 کمترین خطا را در پیش بینی دمای بیشینه هر ۱۲ ایستگاه داشت، لذا به عنوان مناسب ترین مدل ارزیابی گردید و پیش بینی انجام شده بر اساس آن (افزایش ۱ تا $2/2$ درجه ای میانگین دمای بیشینه طی ۲۰ سال آینده (۲۰۴۱-۲۰۶۰))، به عنوان برآوردی واقع بینانه تر از آینده حرارتی منطقه ارزیابی می گردد.

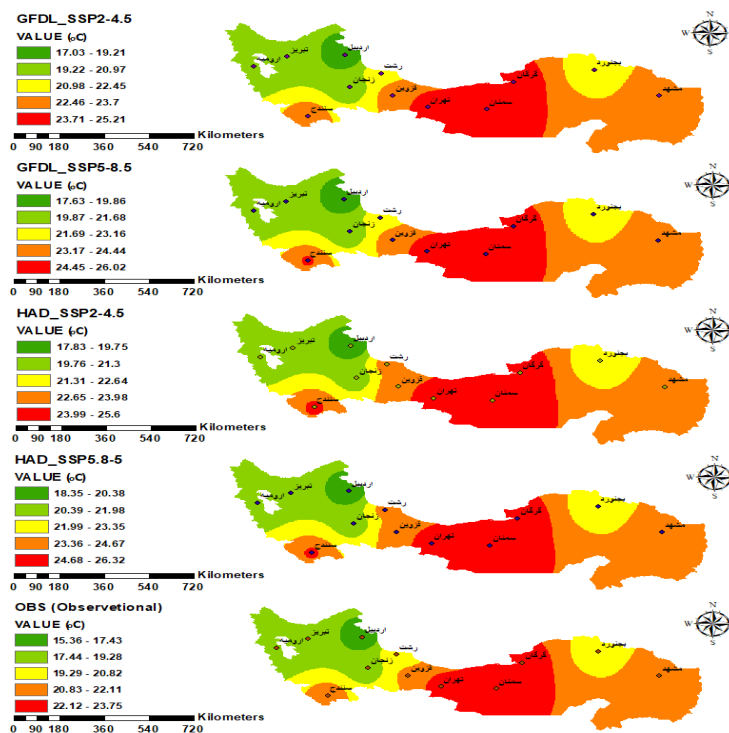


شکل ۳. نمودار مقایسه ای تغییرات میانگین بیشینه پیش بینی شده بر اساس سناریوهای دو مدل HadGEM و GFDL-ESM4 (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و مشاهداتی (۲۰۱۰-۱۹۸۰)





شکل ۴. نمودارهای درصد تغییرات دمای بیشینه پیش‌بینی شده دو مدل HadGEM و GFDL-ESM4 (۲۰۶۰-۲۰۴۱)



شکل ۵. نقشه‌های پراکنندگی میانگین دمای بیشینه دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) و پیش‌بینی شده بر اساس سناریوهای دو مدل HadGEM و GFDL-ESM4 (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

جدول ۳. خطا سنجی مدل‌های GFDL-ESM4 و HadGEM در پیش‌بینی دمای بیشینه ۲۰ سال آتی (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

ایستگاه	سناریو	مدل	MAPE	RMSE	ایستگاه	سناریو	مدل	MAPE	RMSE
بجنورد	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۰/۸۰	۰/۴۵	قزوین	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۰/۸۰	۰/۴۵
	SSP5.8.5		۱/۲۹	۰/۶۵					
	SSP2.4.5	HadGEM	۱/۱۳	۰/۵۲		SSP2.4.5	HadGEM	۱/۵۱	۰/۷۱
	SSP5.8.5		۱/۴۷	۰/۸۱		SSP5.8.5		۱/۶۷	۰/۸۷
مشهد	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۱/۱۹	۰/۶۵	زنجان	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۰/۹۷	۰/۵۲
	SSP5.8.5		۱/۲۵	۰/۴۵		SSP5.8.5		۱/۳۲	۰/۷۰
	SSP2.4.5	HadGEM	۱/۱۷	۰/۵۹		SSP2.4.5	HadGEM	۱/۱۷	۰/۷۶
	SSP5.8.5		۱/۵۱	۰/۷۵		SSP5.8.5		۱/۱۷	۰/۸۴
گرگان	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۰/۹۷	۰/۶۳	سندج	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۰/۹۵	۰/۵۴
	SSP5.8.5		۱/۸۹	۰/۶۶		SSP5.8.5		۱/۲۵	۰/۷۲
	SSP2.4.5	HadGEM	۱/۱۲	۰/۴۳		SSP2.4.5	HadGEM	۱/۲۵	۰/۷۲
	SSP5.8.5		۱/۵۸	۰/۷۴		SSP5.8.5		۱/۱۲	۰/۷۴
سمنان	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۱/۰۸	۰/۶۱	اردبیل	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۱/۰۸	۰/۶۱
	SSP5.8.5		۲/۱۲	۰/۷۰		SSP5.8.5		۱/۱۲	۰/۷۴
	SSP2.4.5	HadGEM	۲/۵۹	۰/۸۰		SSP2.4.5	HadGEM	۲/۵۹	۰/۸۰
	SSP5.8.5		۳/۰۷	۰/۹۴		SSP5.8.5		۳/۰۷	۰/۹۴
تهران	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۱/۱۲	۰/۷۴	تبریز	SSP2.4.5	GFDL-ESM4	۱/۱۲	۰/۷۴
	SSP5.8.5		۱/۵۸	۰/۵۴		SSP5.8.5		۱/۱۲	۰/۷۴
	SSP2.4.5	HadGEM	۲/۱۲	۰/۷۰		SSP2.4.5	HadGEM	۲/۱۲	۰/۷۰
	SSP5.8.5		۲/۱۲	۰/۷۰		SSP5.8.5		۲/۱۲	۰/۷۰

۰/۹۰	۲/۷۹	SSP5.8.5	۰/۷۷	۱/۳۴	SSP5.8.5	
۰/۵۲	۱/۵۶	SSP2.4.5	۰/۴۴	۰/۷۲	SSP2.4.5	
۰/۷۵	۲/۱۳	SSP5.8.5	۰/۵۸	۰/۹۸	SSP5.8.5	رشت
۰/۶۸	۱/۹۹	SSP2.4.5	۰/۸۰	۱/۳۹	SSP2.4.5	
۰/۷۵	۲/۱۳	SSP5.8.5	۰/۹۵	۱/۶۵	SSP5.8.5	

بحث

تغییر اقلیم، عامل اصلی افزایش دما در سطح منطقه‌ای و جهانی است. این پدیده علاوه بر نقش مؤثری که بر افزایش میانگین دما دارد، سبب تغییر در الگوهای آب و هوایی و افزایش فراوانی وقوع مخاطراتی همچون امواج گرمایی شده است. پژوهش حاضر، باهدف واکاوی و مدل‌سازی تغییرات دمای بیشینه در مناطق اقلیمی مختلف شمال ایران به‌منظور آشکارسازی تغییرات دما و پیش‌بینی شرایط آبی آن تحت تأثیر تغییر اقلیم در این بخش از کشور انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل روند دمای بیشینه سالانه طی ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳) حاکی از افزایش معنادار این پارامتر در اغلب ایستگاه‌های منتخب می‌باشد در برخی ایستگاه‌ها مانند اردبیل، قزوین و سنندج، گرچه شواهدی از تغییرات ناگهانی در دمای بیشینه مشاهده شد، اما روند صعودی در این مناطق از لحاظ آماری معنادار نبود. در مقابل، ایستگاه‌هایی نظیر تهران، تبریز، رشت و گرگان با مقادیر Z بالاتر از ۲/۵۸ روندهای معنادار صعودی را با سطح اطمینان ۹۹ درصد را طی این دوره، تجربه کرده‌اند. این اختلاف در نتایج می‌تواند ناشی از شرایط توپوگرافی، ویژگی‌های اقلیمی خاص هر منطقه و تأثیرات محلی پدیده‌های آب‌وهوایی باشد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با استفاده از ریزگردان LARS-WG، پس از ارزیابی و صحت‌سنجی با شاخص‌های MAPE و RMSE، گواهی بر دقت بالای این مدل در بازتولید داده‌های دمای بیشینه دوره پایه داشت. صحت عملکرد این مدل شبیه‌ساز، زمینه را برای پیش‌بینی قابل‌اعتماد دمای بیشینه در آینده فراهم خواهد ساخت. پیش‌بینی‌های حاصل از دو مدل اقلیمی GFDL-ESM4 و HadGEM3-GC31-LL تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای، حاکی از افزایش دمای بیشینه طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوهای هر دو مدل در تمام ایستگاه‌ها و در کل ماه‌های سال به‌ویژه در فصل‌های سرد سال بود. در مقابل، کمترین افزایش دما در فصل‌های گرم سال مشاهده شد. از منظر مکانی، ایستگاه‌های کوهستانی و سردسیری در شمال غرب کشور شامل اردبیل، ارومیه، تبریز و زنجان بیشترین درصد افزایش دمای بیشینه را نسبت به دوره پایه تجربه خواهند کرد. این الگو که با آنچه در سایر پژوهش‌های اقلیمی جهانی نیز مشاهده‌شده مطابقت دارد، می‌تواند بازتابی از حساسیت بیشتر مناطق کوهستانی به تغییرات اقلیمی جهانی باشد. مقایسه خروجی مدل‌ها نشان داد که بیشترین میزان افزایش دما تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 مدل HadGEM3 و کمترین آن تحت سناریوی میانی SSP2-4.5 مدل GFDL-ESM4 پیش‌بینی شد. با توجه به این که کمترین میزان خطا، مربوط به سناریوی میانی SSP2-4.5 مدل GFDL-ESM4 بود، لذا این مدل عملکرد دقیق‌تری در پیش‌بینی دمای بیشینه داشته و در نتیجه پیش‌بینی افزایش ۱ تا ۲/۲ درجه‌ای این مدل برای افق زمانی ۲۰۴۱-۲۰۶۰، به‌عنوان برآوردی واقع‌بینانه‌تر از آینده حرارتی منطقه ارزیابی شد. مقایسه بین روند تاریخی و پیش‌بینی‌های آینده حاکی از یک الگوی همگراست: روند افزایشی دمای بیشینه که در گذشته آغاز شده، نه تنها متوقف نشده بلکه در آینده نیز با شدت بیشتری ادامه خواهد یافت. مناطق دارای روند صعودی معنادار در گذشته، همچنان در آینده در معرض افزایش بیشتر دما خواهند بود و حتی مناطقی که در دوره تاریخی تغییرات ضعیف یا غیر معنادار داشته‌اند، بر اساس مدل‌ها در آینده گرمایش محسوس‌تری را تجربه خواهند کرد؛ بنابراین، علی‌رغم عدم قطعیت مدل‌های GCM، هم‌سویی بین نتایج گذشته‌نگر و آینده‌نگر، حاکی از اعتمادپذیری بالای یافته‌ها است. این یافته‌ها تأکید

می‌کنند که حتی در شرایط کنترل شده انتشار گازهای گلخانه‌ای، اقلیم منطقه‌ای شمال ایران همچنان در معرض افزایش قابل توجه دمای بیشینه قرار خواهد گرفت. بر اساس مقایسه یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات پیشین، روند افزایشی دمای بیشینه که در تحلیل داده‌های تاریخی و پیش‌بینی‌های آتی این تحقیق مشاهده شد، با الگوی جهانی و منطقه‌ای گزارش شده در تحقیقات دیگر هم‌خوانی دارد. همانند نتایج دیمیری و همکاران (۲۰۱۸)، شیفر و همکاران (۲۰۱۸)، فونج و همکاران (۲۰۲۰) و سانگ و همکاران (۲۰۲۱)، این مطالعه نیز افزایش معنادار دما را تأیید کرد؛ با این تفاوت که در پژوهش حاضر، بیشترین افزایش دما تحت هر دو سناریوی بدبینانه و متوسط، در فصل‌های سرد سال پیش‌بینی شد، درحالی‌که برخی مطالعات پیشین (مانند فاتحی و شاهوئی، ۱۴۰۰) افزایش دما را عمدتاً در ماه‌های گرم گزارش کرده‌اند. همچنین، مشابه نتایج ترکمان و همکاران (۱۳۹۴)، کونانی و همکاران (۱۳۹۹) و روشنی و حمیدی (۱۴۰۰)، دقت بالای مدل‌های HadGEM و GFDL در بازتولید و پیش‌بینی دمای بیشینه تأیید شد، اما از لحاظ میزان افزایش دمای بیشینه آینده منطقه، تفاوت‌هایی با یافته‌های این پژوهشگران وجود داشت. این هم‌سویی کلی میان یافته‌ها، همراه با برخی تفاوت‌های مکانی و فصلی، بیانگر آن است که گرچه گرمایش آینده تقریباً قطعی است، اما شدت و الگوی آن می‌تواند متأثر از ویژگی‌های توپوگرافی، اقلیمی و سناریوهای به‌کاررفته در مدل‌سازی باشد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با بررسی روند بلندمدت دمای بیشینه در مناطق اقلیمی مختلف شمال ایران و پیش‌بینی وضعیت آینده آن، به شواهد محکمی از افزایش تدریجی دمای بیشینه ایستگاه‌های منتخب طی سه دهه گذشته دست‌یافت. استفاده از دو مدل اقلیمی معتبر و تحلیل دو سناریوی بدبینانه و متوسط نیز نشان داد که در صورت تداوم روندهای فعلی، دمای بیشینه در اکثر مناطق مورد مطالعه با افزایش بیشتری روبه‌رو خواهد شد. این تغییرات اقلیمی می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای بر منابع آب، مصرف انرژی، کشاورزی، سلامت عمومی و ساختارهای شهری در مناطق شمالی کشور داشته باشد؛ بنابراین، ضرورت دارد سیاست‌گذاران و مدیران شهری، اقدامات پیشگیرانه و برنامه‌ریزی‌های سازگارانه همچون؛ بهینه‌سازی مصرف آب، توسعه الگوهای کشاورزی مقاوم در برابر گرما و استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت انرژی در دستور کار قرار گیرد. همچنین گسترش دامنه زمانی و مکانی و استفاده از مدل‌های اقلیمی متنوع‌تر در پژوهش‌ها و انجام مطالعات تکمیلی با استفاده از مدل‌های ترکیبی، می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد. یافته‌های پژوهش حاضر بر اهمیت پایش مستمر دما و تدوین برنامه‌های جامع در راستای کاهش آثار منفی ناشی از گرمایش جهانی در نیمه شمالی ایران تأکید می‌نماید.

حامی مالی

پژوهش حاضر، برگرفته از طرح پسادکتری به شماره قرارداد ۳۸۲ و تحت حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی است. لذا از زحمات معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی و دانشکده علوم اجتماعی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

سهام نویسندگان در پژوهش

رقیه ملکی مرشت (نویسنده اول): نگارش پیش‌نویس اصلی مقاله، تحلیل داده‌ها و استخراج نتایج، هماهنگی اجرای پژوهش مبتنی بر طرح پسادکتری.

برومند صلاحی نویسنده دوم و مسئول (استاد راهنما): ایده‌پردازی و طراحی کلی پژوهش، نظارت بر اجرای کار، بازبینی و ویرایش نهایی مقاله.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- اکبر زاده، مهران؛ نوری، حمید؛ مرتضوی، ثمر و عطائیان، بهناز. (۱۴۰۲) بررسی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از رویکرد مدل‌های گردش عمومی جو در استان‌های غربی کشور. *مجله مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۲ (۲)، ۴۲-۲۳.
doi: 10.22052/deej.2024.253424.1019
- ترکمان، مجتبی؛ رحیمی، فرزانه؛ ترکمان، مصطفی و حسینی، سیدمهرداد. (۱۳۹۴). اعتبارسنجی پیش‌بینی مدل‌های HadGEM2-es و GFDL-ESM2g بر اساس بیشینه و کمینه دما. *پنجمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران*.
حشمتی، سارا و رضوانی اعتدالی، هادی. (۱۴۰۰). پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی در دوره‌های آتی با استفاده از مدل LARS-WG مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه. *مجله علمی آمایش سرزمین*، ۱۳ (۲)، ۶۶۹-۶۴۷.
doi: 10.22059/jtcp.2021.332432.670263
- حلبیان، امیرحسین؛ پورشهبازی، جواد و سلطانیان، محمود. (۱۳۹۶). ارزیابی تغییر دمای بیشینه و کمینه فصلی ایران. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۷ (۲۳)، ۱-۱۰.
- رزمخواه، هماء؛ مسعودی، عبدالله؛ رستمی راوی، امین و فرارویی، علی‌رضا. (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی با استفاده از مدل LARS-WG. *مطالعه موردی: آباد. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۳ (۲)، ۲۹-۱۶.
doi: 10.22034/iwm.2023.1987752.1058
- روشنی، ادیب و حمیدی، مهدی. (۱۴۰۰). پیش‌بینی اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش بر اساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه ساری)، *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۱ (۴)، ۷۹۵-۷۸۱.
doi: 10.22059/jwim.2022.330603.920.781-795
- زارعیان، محمدجواد. (۱۴۰۱). اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6. *علوم آب و خاک*، ۲۶ (۲)، ۹۱-۱۰۵.
doi: 10.47176/jwss.26.2.31501.105-91
- زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۰) بر اساس رویکرد همادی چند مدلی. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۳ (۱)، ۹۰-۷۵.
doi: 10.22059/jphgr.2021.308361.1007551.75-90
- سازمان هواشناسی کشور، (۱۴۰۳). www.irimo.ir.
- شاهکویی، اسمعیل؛ قانقرمه، عبدالعظیم و یوسفی، ربابه. (۱۳۹۶). بررسی ناهنجاری‌های دمایی دوره سرد سال (محدوده مورد مطالعه: استان مازندران). *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۷ (۲۳)، ۲۲۲-۲۰۷.
- شاهی‌نژاد، بابک؛ یونسی، حجت‌الله؛ کاکاوند، علی و یوسفی سهرابی، حسین. (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب و رواناب ورودی به سد مخزنی مخمل کوه با استفاده از مدل IHACRES. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۳)، ۷۵۴-۷۳۵.
doi: 10.22059/jwim.2023.358745.1073
- عباسی، فاطمه؛ کوهی، منصوره؛ فلامرزی، یاشار؛ جوانشیری، زهره؛ ملبوسی، شراره و بابائیان، ایمان. (۱۳۹۸). تحلیل روند میانگین دما و بارش سالانه در ایران برای دوره ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷ میلادی. *نیوار*، ۴۳ (۱۰۷)، ۵۵-۴۱.
doi: 10.30467/nivar.2019.184059.1128
- فاتحی، زانیار و شاهوئی، سید وحید. (۱۴۰۰). پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر دمای حداقل و حداکثر شهر سنندج. *محیط‌زیست و مهندسی آب*، ۷ (۱)، ۱۸۲-۱۷۰.
doi: 10.22034/jewe.2020.239070.1386.170-182

کدخدا، الهام؛ امیدوار، کمال؛ زرین، آذر؛ مزیدی، احمد و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر متغیرهای اصلی اقلیمی (ECVS) در ایران. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۸ (۲)، ۱-۱۷. doi: 10.30499/ijg.2023.405016.1526

کونانی، زیبا؛ ایلدرمی، علیرضا؛ زینی نوند، حسین و نوری، حمید. (۱۳۹۹). اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز سیلاخور - رحیم آباد لرستان. *هیدروژئومورفولوژی*. ۷ (۲۵)، ۱-۱۷. doi: 10.22034/hyd.2021.32443.1474

گودرزی، مسعود؛ خسروانیان، جهانتاب و حجازی، سیداسداله. (۱۳۹۴). کاربرد مدل LARS-WG در پیش بینی پارامترهای هواشناسی حوضه قره سو. *فضای جغرافیایی*، ۱۵ (۵۱)، ۲۶۳-۲۷۹.

References

- Abbasi, F., Kohi, M., Flamarzi, Y., Javanshri, Z., Malbousi, S., & Babaeian, I. (2019). Investigation and Analysis of Iran's Annual Temperature and Precipitation Trend (2017-1988). *Nivar*, 43(106-107), 41-55. doi: 10.30467/nivar.2019.184059.1128. [In Persian]
- Akbarzadeh, M., Nouri, H., Mortazavi, S., & attaeian, B. (2024). Investigation and prediction of climate changes using the approach of General Circulation Models (GCMs) in the western provinces of Iran. *Desert Ecosystem Engineering*, 12(39), 23-42. doi: 10.22052/deej.2024.253424.1019. [In Persian]
- Bagheri Khaneghahi, M., HezarJaribi, A., Kamali, M. I., & Zamani, F. (2025). Projection of Temperature and Radiation in Arid and Semi-Arid Climates under Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Scenarios. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(Special Issue: Climate Change and Effects on Water and Soil), 32-48. doi: 10.22098/mmws.2025.17004.1568
- Bekele, D., Alamirew, T., Kebede, A., Zeleke, G., & Melesse, A. M. (2019). Modeling climate change impact on the hydrology of Keleta watershed in the Awash River Basin, *Ethiopia*, (24) 1. doi:10.1007/s10666-018-9619-1
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., & Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051-1075, <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>, 2011.
- Dunne, J.P. (2020). The GFDL Earth System Model version 4.1 (GFDL - ESM4.1): Model description and simulation characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS002015. <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>
- Dimri, A.P., Kumar, D., Choudhary, A., and Maharana, P. (2018). Future Changes Over the Himalayas: Maximum and Minimum Temperature. *Global and Planetary Change*, (162), 212-234.
- Fatehi, Z. & Shahoei, S. V. (2021). Predicting the Impact of Climate Change on Temperature in Sanandaj City. *Environment and Water Engineering*, 7(1), 170-182. doi: 10.22034/jewe.2020.239070.1386. [In Persian]
- Goodarzi, M., Khosravanian, J., & Hejazi, S. A. (2015). Application of LARS-WG model in forecasting meteorological parameters of Qarasu basin. *Geographical Space*, 15 (51), 263-279. [In Persian].
- Gupta, V., Singh, V., & Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *Journal of Hydrology*, 590. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125422.
- Halabian, A. H. (2017). Evaluation of the seasonal maximum and minimum temperature change of Iran. *Geographical planning of space quarterly journal*, 7(23), 1-10. [In Persian]
- Heshmati, S. & Ramezani Etedali, H. (2021). Drought Forecasting for Future Periods Using LARS-WG Model: The Case Study of Kermanshah City. *Town and Country Planning*, 13(2), 647-669. doi: 10.22059/jtcp.2021.332432.670263. [In Persian]

- IPCC. (2021). Climate Change 2021. Human Influence on global warming is unequivocal. The physical science basis. Intergovernmental panel on climate change, *Cambridge University Press*.
- IPCC, Climate Change (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P. M., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, *United's Kingdom and New York, NY, USA*, 1535.
- Jiménez-Navarro, I. C., Jimeno-Sáez, P., López-Ballesteros, A., Pérez-Sánchez, J., & Senent-Aparicio, J. (2021). Impact of Climate Change on the Hydrology of the Forested Watershed That Drains to Lake Erken in Sweden: An Analysis Using SWAT+ and CMIP6 Scenarios. *Forests*, 12(12), 1803. <https://doi.org/10.3390/f12121803>
- Kadkhoda, E., Omidvar, K., Zarrin, A., Mazidi, A. & Dadashi-Roudbari, A. (2024). The impacts of climate change on the essential climate variables (ECVs) in Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 18(2), 1-17. doi: 10.30499/ijg.2023.405016.1526. [In Persian]
- Kounani, Z., Ildoromi, A., zenivand, H. & Nouri, H. (2021). Impact of climate change on runoff of Silakhor-Rahimabad Basin in Lorestan. *Journal of Hydrogeomorphology*, 7(25), 17-1. doi: 10.22034/hyd.2021.32443.1474 [In Persian].
- Kamangar, M., Ahmadi, M., Dastjerdi, H., & Hazbavi, Z. (2025). Ensemble modeling of extreme seasonal temperature trends in Iran under socio-economic scenarios. *Natural Hazards*, 121(2), 1265–1288. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06830-8>
- Lashkari, H., Ghorlivand, N., Mohammadi, Z., & Rouhbakhsh Sigaroodi, H. A. (2021). The trend of temperature changes in Iranian metropolises in the last three decades. *Research Square*. 1-23. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1035068/v1>
- Mo, C., Tang, P., Huang, K., Lei, X., Lai, S., Deng, J., Bao, M., Sun, G., Xing, Z., (2023). Evolution of Drought Trends under Climate Change Scenarios in Karst Basin. *Water*, 15(10), 1934. <https://doi.org/10.3390/w15101934>
- Motiee, S., Motiee, H., & Ahmadi, A. (2024). Impacts of Climate Change on Basin and River Discharge in Mountainous Glacial Rivers: A Cmp6 Scenario-Based Analysis Using the Swat Model, *SSRN*, 29p.
- National Meteorological Organization, (2024). www.irimo.ir. [In Persian]
- Nilawar, A. P. & Waikar, M. L. (2019). Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India, *Science of Total Environment*, 650, 2685–2696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.334>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P. (2016). The scenario model ntercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6: *Geoscientific Model Development*, 9 (9), 3461–3482. doi:10.5194/gmd-9-3461-2016
- Phuong, D. N. D., Duong, T. Q., Liem, N. D., Tram, V. N. Q., Cuong, D. K. & Loi, N. K. (2020). Projections of future climate change in the Vu Gia Thu Bon River Basin, Vietnam by using statistical downscaling model (SDSM). *Water*, 12 (3), 755. <https://doi.org/10.3390/w12030755>
- Razmkhah, H., Masoudi, A., Rostami Ravari, A. & Fararouie, A. (2023). Evaluation of the climate change effect on meteorological parameters using LARS-WG, Case study: Abadeh station. *Integrated Watershed Management*, 3(2), 16-29. doi: 10.22034/iwm.2023.1987752.1058. [In Persian]
- Shahkooei, E., ghangherme, A., & yousefi, R. (2017). An investigation of temperature anomalies of cold-year period (Area of study: Mazandaran). *Geographical planning of space quarterly journal*, 7(23), 207-222. [In Persian]
- Shahinejad, B., Yonesi, H.A., Kakavand, A. & yousefi sohzabi, H. (2023). Evaluation of Climate Change Effects on the Entering Runoff the Makhmalkoh Dam Using the IHACRES Model. *Water and Irrigation Management*, 13(3), 735-754. doi: 10.22059/jwim.2023.358745.1073. [In Persian]

- Shiferaw, H., Gebremedhin, A., Gebretsadkan, T., & Zenebe, A. (2018), Modelling hydrological response under climate change scenarios using SWAT model: the case of Ilala watershed, Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4 (1), 437–449. DOI:10.1007/s40808-018-0439-8
- Sung, H.M., Kim, J., & Shim, S. (2021). Climate Change Projection in the Twenty-First, The fifth report on climate change in estimating temperature and precipitation, *Journal of Physical Geography*, 13 (51), 21. <https://doi.org/10.1007/s13143-021-00225-6>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012), an overview of CMIP5 and the experiment design: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (4), 485-498. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Turkman, M., Rahimi, F., Turkman, M., & Hosseini, S. M. (2015). Validation of HadGEM2-es and GFDL-ESM2g models predictions based on maximum and minimum temperatures, Fifth Regional Climate Change Conference, Tehran. [In Persian]
- Vahdatifar, M., Mousavi, S.-F., Farzin, S., & Hadiani, M.O. (2025). Comprehensive Study of Climate Change Impacts on Temperature and Precipitation in East and West of Mazandaran Province in North of Iran. *Water*, 17, 1181. <https://doi.org/10.3390/w17081181>
- Zareian M. (2021). Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation in Yazd Province Based on Combined Output of CMIP6 Models. *Jwss*, 26 (2), 91-105. <https://doi.org/10.47176/jwss.26.2.31501>. [In Persian].
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projected changes in temperature over Iran by 2040 based on CMIP6 multi-model ensemble. *Physical Geography Research*, 53(1), 75-90. [In Persian] doi: 10.22059/jphgr.2021.308361.1007551