

Projecting the Impacts of Future Climate Change on Maximum and Minimum Temperatures in the Kashafrud River Catchment in Iran

Hossein Imanipour¹, Mokhtar Karami², Abdolreza Kashki^{3*} , Morteza Esmailnejad⁴

1. PhD student in Meteorology, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

2. Associate Professor, Department of Meteorology, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

3. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Meteorology, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Email: a.kashki@hsu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8888-1097>

4. Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Birjand, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 13 December 2024 Revised: 17 February 2025 Accepted: 26 February 2025 Published: 22 December 2025 Keywords: Climate change, CMIP6, CMhyd, Kashafrud River drainage basin.	Climate change is increasingly being recognized as one of the most significant challenges facing nations worldwide. The Kashafrud River, a vital watercourse in northeastern Iran, is particularly vulnerable to climate change. This study aimed to project future changes in maximum and minimum temperatures in the Kashafrud River basin under different climate change scenarios. Daily temperature data from 11 meteorological stations were used in this study. To project future climate, CMIP6 GCMs were employed, including ACCESS-ESM1, MRI-ESM2-0, and MIROC6. The DM method was used to correct the bias in the projected temperature data based on statistical metrics. Subsequently, the CMhyd model was utilized to downscale the maximum and minimum temperature projections under both optimistic (SSP1-2.6) and pessimistic (SSP5-8.5) scenarios for two future periods: near-future (2025-2054) and mid-future (2055-2084). The model performance was evaluated using various statistical metrics, including the coefficient of determination (R^2, RMSE, and KGE). The analysis of seasonal changes in the maximum and minimum temperatures revealed that the pessimistic scenario projects more severe and widespread warming across all regions and periods. These findings highlight the complex nature of climate change and its varying impact on different regions. Further analysis of annual mean temperature changes using the selected model (MIROC6) indicates that the Kashafrud River Basin will experience accelerated warming in the mid-future compared to the baseline period (1991-2020). The annual maximum temperature is projected to increase by 1.11°C and 1.97°C under the optimistic scenario for the near- and mid-future, respectively, and by 1.70°C and 3.74°C under the pessimistic scenario. Similarly, the annual minimum temperature is projected to increase by 0.98°C and 1.63°C under the optimistic scenario for the near future and mid-future, respectively, and by 1.59°C and 2.48°C under the pessimistic scenario. Projected temperature rises, especially in mountainous and snow-covered areas, significantly impact ecosystems and water availability, worsening environmental degradation, and intensifying extreme events.

How to Cite: Imanipour, H. , Karami, M. , Kashki, A. and Esmailnejad, M. (2025). Projecting the Impacts of Future Climate Change on Maximum and Minimum Temperatures in the Kashafrud River Catchment in Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(46), 147-164.



© The Author/Authors

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2025.50510.2087

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Human activities, particularly greenhouse gas emissions, have led to climate change. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC¹) 1.5°C report, the global average temperature is projected to increase by 1.5 degrees Celsius by the end of the current century (Allen et al., 2016). Recent assessments of global warming indicate the accuracy of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP²) data, which has increased confidence in the reliability of this project (Baker & Huang, 2014). A review of recent studies has demonstrated that climate change has a significant impact on temperature patterns. For example, Zonozi Alamdari et al. (2025), using the IPCC Sixth Assessment Report, predicted a temperature increase in Khorasan Razavi Province. Given the importance of this issue, the present study aims to provide a more accurate projection of future temperature changes in the Kashaf Rud River Basin. The findings of this research can be highly beneficial in developing climate change adaptation policies within this basin.

DATA AND METHODS

This study focuses on the upstream part of the Kashaf Rud River Basin (Figure 1) in northeastern Iran. This basin covers an area of 8,000 square kilometres, with highlands comprising the majority of its area.

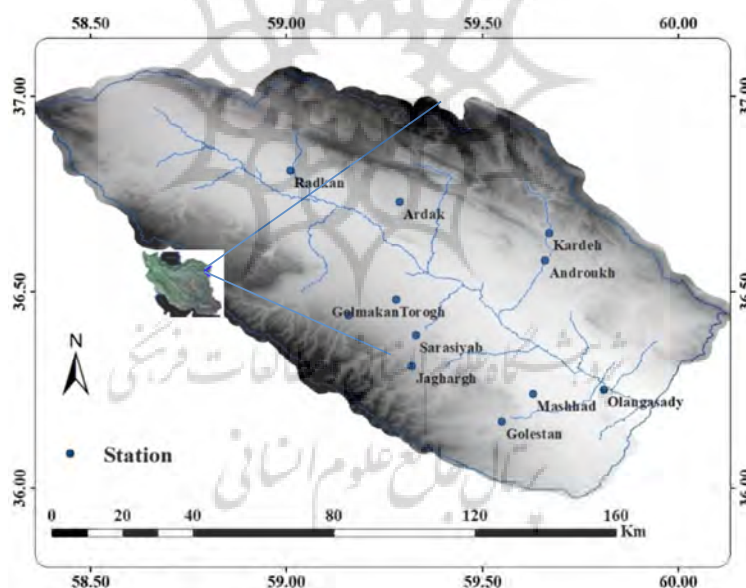


Figure 1: Geographical location of the study area

This study was conducted to project future temperature changes in the Kashaf Rud River Basin. To this end, daily temperature data from 11 meteorological stations during the base period (1991–2020) were used, and future temperatures were projected for near- and mid-term periods using sixth-generation climate models and the CMhyd software. Before projections, the model data were bias-corrected, and their accuracy was evaluated using various statistical metrics. Distribution mapping was selected as a suitable bias correction method for this region.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² Coupled Model Intercomparison Project

RESULTS AND DISCUSSION

Based on projections from the selected climate model (MIROC6), all meteorological stations in the study area are projected to experience temperature increases in the future. These temperature increases will be noticeable throughout the year, particularly under pessimistic scenarios. Urban stations such as Mashhad will experience the greatest temperature rise due to the urban heat island effect. Furthermore, stations located at higher elevations will also exhibit significant temperature changes due to their greater sensitivity to climate change. The results indicate that the temperature increase will be most pronounced during the summer, especially for minimum temperatures, which could lead to reduced water resources and exacerbated drought in the region. Winter warming could also affect precipitation patterns and snowpack. Overall, the findings of this study demonstrate that climate change will have considerable impacts on temperatures in the study area, and these changes necessitate careful water resource planning and management.

CONCLUSION

Analysis of the maximum and minimum temperature changes in the study area reveals that urban areas such as Mashhad will experience more significant warming throughout the year, highlighting the importance of urban heat island management. High-altitude areas, such as Chakaneh, show more pronounced changes in both minimum and maximum temperatures, attributable to their greater sensitivity to climate change. The pessimistic scenario shows more severe and widespread warming effects across all regions and periods. These changes demonstrate the complex nature of climate change and its varying impacts on different regions. Comparison with similar studies (Afsari et al., 2024; Zonozi Alamdari et al., 2025) indicated agreement between some of the findings of those studies and the results of this research. The results of this study can be used as a management tool for planning and making appropriate decisions to address the impacts of climate change on water resources in the Kashaf Rud River Basin. It is also necessary to investigate the effects of increased or decreased precipitation on other hydrological parameters, such as runoff, evapotranspiration, and soil infiltration. Increased temperatures and changes in seasonal patterns pose a new challenge for managers and decision-makers. Therefore, in addition to adaptation to these changes, investment in watershed management infrastructure, improvement of irrigation systems, and increased water use efficiency are essential to ensuring future water security.

REFERENCES

References (in Persian)

Zenozi Alamdari, N., Sobhani, B., Eshahi, M., & Mohammadi, M. (2025). Precipitation and temperature zoning of Khorasan Razavi province using data from the sixth climate change report (CMIP6). *Journal of Environmental Science Studies*, 9(4), 9761-9753. [In Persian]

References (in English)

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.

Nikakhtar, M., Rahmati, S. H., Massah Bavani, A. R., & Babaeian, I. (2024). Mitigating the adverse impacts of climate change on river water quality through adaptation strategies: A Case Study of the Ardak Catchment, Northeast Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(9), 9131-9147.

Stott, P. A., Christidis, N., Otto, F. E., Sun, Y., Vanderlinden, J. P., van Oldenborgh, G. J., ... & Zwiers, F. W. (2016). Attribution of extreme weather and climate-related events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 23-41.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۶، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۴

پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر دمای بیشینه و کمینه قسمت بالادست حوضه آبریز رودخانه کشف رود، ایران

حسین ایمانی پور^۱، مختار کرمی^۲، عبدالرضا کاشکی^{۳*}، مرتضی اسمعیل نژاد^۴

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

۲. دانشیار گروه آب و هواشناسی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

۳. دانشیار گروه آب و هواشناسی دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار (نویسنده مسئول)

ایمیل: a.kashki@hsu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8888-1097>

۴. دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه بیرجند

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه آبریز کشف رود، CMIP6، CMhyd.	امروزه تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشورهای شناسخته می‌شود. رودخانه کشف‌رود، شریان اصلی شمال شرق ایران، در معرض تهدید جدی این تغییر قرار دارد. هدف این پژوهش، پیش‌نگری اثر تغییر اقلیم بر دمای بیشینه و کمینه حوضه آبریز رودخانه کشف رود است. بدین منظور از داده‌های دمای روزانه ۱۱ ایستگاه هواشناسی استفاده شد. برای دورنمای تغییر اقلیم آینده، از مدل‌های اقلیمی نسل ششم شامل (ACCESS-ESM1, MRI-ESM2-0, MIROC6) استفاده شده است. بر اساس دقت معیارهای آماری، روش نگاشت توزیع برای تصحیح ارببی داده‌های دما به‌کارگیری شد. سپس، با استفاده از مدل (CMhyd)، داده‌های دمای بیشینه و کمینه سناریوهای خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۵-۵۴) و میانی (۲۰۵۵-۸۴) پیش‌نگری شد. برای راستی‌آزمایی مدل‌ها از سنج‌های آماری مختلف شامل (R^2 و RMSE و KGE) استفاده شد. واکاوی نتایج تغییرات فصلی دمای بیشینه و کمینه نشان می‌دهد که سناریوی بدبینانه تأثیرات گرمایشی شدیدتر و گسترده‌تری در کل مناطق و دوره‌ها نشان می‌دهد. این تغییرات نشان‌دهنده ماهیت پیچیده تغییر اقلیم و تأثیرات آن بر مناطق مختلف است. واکاوی تغییرات میانگین دمای سالانه با استفاده از مدل منتخب (MIROC6) نشان می‌دهد که حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود در دوره آینده میانی نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۲۰) با شتاب بیشتری گرم خواهد شد. تغییرات سالانه دمای بیشینه، در سناریوی خوش‌بینانه دوره آینده نزدیک و میانی به‌ترتیب $۱/۷۰^{\circ}\text{C}$ و $۳/۷۴^{\circ}\text{C}$ افزایش می‌یابد. تغییرات سالانه دمای کمینه، در سناریوی خوش‌بینانه دوره آینده نزدیک و میانی به‌ترتیب $۰/۹۸^{\circ}\text{C}$ و $۱/۶۳^{\circ}\text{C}$ و در سناریوی بدبینانه به‌ترتیب $۱/۵۹^{\circ}\text{C}$ و $۲/۴۸^{\circ}\text{C}$ افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش دما به‌ویژه در مناطق مرتفع و برف‌گیر بر زیست‌بوم‌های طبیعی اثر گذاشته و دسترسی به منابع آب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. گرمایش بیشتر به تخریب محیط‌زیست و تشدید رویدادهای فرین منجر خواهد شد.

استناد: ایمانی پور، حسین، کرمی، مختار، کاشکی، عبدالرضا و اسمعیل نژاد، مرتضی. (۱۴۰۴). پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر دمای بیشینه

و کمینه قسمت بالادست حوضه آبریز رودخانه کشف رود، ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*. ۱۴(۴۶)، ۱۶۴-۱۴۷

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.50510.2087



مقدمه

استفاده بیش‌ازحد سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی و افزایش جمعیت جهان و به تبع آن گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی برای تامین رفاه و نیازهای جمعیت کره‌ی زمین، موجب شده است تا پس از انقلاب صنعتی به تدریج تغییرات مشهودی در اقلیم کره‌ی زمین به وجود آید که بارزترین آن افزایش متوسط دمای کره زمین، افزایش پدیده‌های حدی اقلیمی نظیر سیل، طوفان، تگرگ، طوفان‌های حاره‌ای، امواج گرمایی، افزایش سطح آب دریاها، ذوب شدن یخ‌های قطبی، خشکسالی و... می‌باشد. براساس گزارش ویژه، ۱/۵ درجه هیئت بین دولتی تغییر اقلیم میانگین دمای جهانی تا پایان قرن حاضر بایستی کمتر از ۱/۵ درجه سلسیوس باشد (آلن و همکاران، ۲۰۱۶). افزایش این رخدادها در سال‌های اخیر به دغدغه‌ی اصلی اقلیم‌شناسان و سران کشورهای جهان تبدیل شده است (بابائیان و همکاران، ۲۰۰۹).

توجه افکار عمومی و مجامع علمی به این مساله و تمرکز گازهای گلخانه‌ای در چند سال گذشته باعث شده است که نوعی همکاری جهانی در بررسی این معضل جهانی به‌وجود آید؛ چرا که به تحقیق معلوم گردیده است که ناهنجاری‌های دمایی نقاط مختلف کره زمین بسیاری از معضلات محیطی از جمله سیل، طوفان، خشکسالی و نظایر آن را به دنبال دارند. یکی از مهم‌ترین این تغییرات، تغییر در میزان دما است. مشخص نمودن نوسانات فصلی یا ماهانه این تغییرات، می‌تواند مدیران و برنامه‌ریزان را در بخش‌های مختلف آگاه نماید و تصویر دقیقی را از تغییر اقلیم در آینده در اختیار آنان قرار دهد تا تصمیم‌گیری متناسب با شرایط آب‌وهوایی پیش‌رو اتخاذ گردد. شواهد نشان‌دهنده نقش فعالیت‌های انسانی در افزایش دما در مقیاس‌های گوناگون زمانی و مکانی دارد (استوت^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). انتظار می‌رود تغییر اقلیم، بزرگی و الگوهای زمانی و مکانی متغیرهای آبی - اقلیمی را تغییر دهد (گو^۲ و همکاران، ۲۰۲۰؛ پاپالکسیو و مونتاناری^۳، ۲۰۱۹) به همین دلیل، ارزیابی عملکرد مدل‌های موجود و مشخص کردن عدم قطعیت‌ها و سوگیری‌های اساسی در شبیه‌سازی‌های مدل آب‌وهوایی برای درک ارزش و پتانسیل آن‌ها برای مطالعات ارزیابی تأثیر تغییر آب‌وهوایی مهم است (راقاوان^۴ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ریورا و آرنولد^۵، ۲۰۲۰؛ زازولی^۶ و همکاران، ۲۰۱۸). برآوردهای اخیر از گرمایش جهانی، حاکی از دقیق بودن داده‌های پروژه مقایسه مدل جفت‌شده (CMIP)^۷ است که منجر به افزایش اعتماد به صحت پروژه نام‌برده شده است (بیکر و هانگ^۸، ۲۰۱۴).

با توجه به ادامه افزایش دما و در نتیجه ادامه وضعیت موجود، در آینده اکوسیستم‌های محیطی، منابع آبی، پوشش گیاهی و امنیت غذایی به‌شدت تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم قرار خواهند گرفت (رضایی، ۲۰۲۴). حتی نوسان جزئی در الگوی دما نیز می‌تواند تأثیر بسزایی در آب‌وهوای محلی داشته باشد و در نتیجه تغییر رژیم آب‌وهوا باعث انقراض و کاهش تنوع بیولوژیکی خواهد شد (رشید^۹ و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، درک بهتر وضعیت‌های مختلف تغییرات دمایی نیازی اساسی است. ارائه این نتایج می‌تواند در تدوین اسناد بالادستی بسیار راه‌گشا باشد. نتایج حاصل از مدل‌های آب‌وهوایی طبق سناریوهای پروژه ششم مقایسه مدل جفت‌شده، نوید بهبود و تقویت اطلاعات پیش‌نگری

1 - Stott

2 - Guo

3 - Papalexio & Montanari

4 - Raghavan

5 - Rivera & Arnould

6 - Zazulie

7 - Coupled Model Intercomparison Project

8 - Baker & Huang

9 - Rashid

تغییر اقلیم برای کشورها را می‌دهد. در همین راستا پژوهش‌های زیادی با استفاده از سناریوهای مختلف گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم در جهان در حال انجام است.

در سال‌های گذشته، دانشمندان و متخصصان علوم جغرافیایی و اقلیم‌شناسی پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر دما انجام داده‌اند و با ارائه روش‌های مختلف سعی بر شناسایی و تبیین ارتباط عناصر و عوامل اقلیمی داشته‌اند. ایرینگ^۱ و همکاران (۲۰۱۶) به بازنگری طراحی آزمایش‌ها و ساختار مدل‌های گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم پرداختند. به واسطه طراحی و توزیع شبیه‌سازی مدل‌های اقلیم جهانی، پروژه هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم به یکی از ارکان پایه در دانش اقلیم تبدیل شده است. کیم^۲ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای در حوضه رودخانه هان کره جنوبی سناریوهای SSP و RCP^۳ را مقایسه نمودند. نتایج آنان نشان داده است که سناریوهای SSP که شرایط اجتماعی و اقتصادی ضمیمه آن شده است، تفاوت زیادی با سناریوهای قبلی از جمله RCP دارد. بنابراین، این موضوع بیانگر اهمیت زیاد عوامل اجتماعی اقتصادی در تغییر اقلیم است.

عطایی و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی تغییرات دما و بارش حوضه کشف‌رود را به کمک سناریوی حد واسط نسل پنجم (RCP-4.5) در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) پیش‌نگری نمودند. نتایج آنان حاکی از تغییرات افزایشی دمای فصل‌های مختلف در دو ایستگاه مشهد و گل‌مکان بین ۱ تا ۲/۸ درجه سلسیوس بود. زنوزی علمداری و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان اثرات تغییر اقلیم بر بارش و دمای استان خراسان رضوی به کمک گزارش ششم توسعه، اثرات تغییر اقلیم بر بارش و دمای ۷ ایستگاه هم‌دید استان خراسان رضوی که در بین آنها فقط ایستگاه مشهد از ایستگاه‌های این پژوهش را در بر می‌گیرد، بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که در تمامی سناریوها دمای بیشینه و کمینه سالانه بین ۱/۱۲ تا ۳/۳۴ درجه سلسیوس افزایش را تجربه خواهند کرد که این افزایش در ایستگاه‌های مختلف متفاوت می‌باشد.

آهنی و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان ارزیابی و شبیه‌سازی ردپای آب محصولات کشاورزی در سناریوهای تغییر اقلیم مطالعه موردی حوضه آبریز کشف‌رود، شبیه‌سازی ردپای آب و کربن را با استفاده از خروجی‌های مدل WEAP و MABIA برای سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۴۰ انجام دادند. بر اساس نتایج آنان، سناریوهای انتشار بدبینانه و میانه ردپای آب نشان داد که نیاز آبی و عملکرد محصولات به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش عملکرد در سناریو میانه را دو محصول جو و یونجه با ۲۵/۷ و ۲۵/۶ درصد به خود اختصاص دادند.

کاظمی و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر روی دبی حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود با استفاده از مدل SWAT به کمک دو سناریوی حدی RCP2.6 و RCP8.5 از گزارش پنجم، تأثیرات تغییر اقلیم بر دبی را بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد در فصل‌های تابستان، پاییز و اوایل زمستان افزایش دما و در اواخر زمستان و بهار کاهش دما تحت دو سناریو رخ خواهد داد. با توجه به افزایش دقت در مدل‌های گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ضروری است دورنمای شرایط اقلیمی دوره آتی نقاط مختلف بر اساس نتایج این مدل‌ها صورت گیرد و در بین این مدل‌های جدید کامل‌ترین آنها مورد استفاده قرار گیرد. علی‌رغم انجام مطالعات متعدد در زمینه تغییر اقلیم و تأثیرات آن در بخش‌های مختلف اقتصادی با به‌کارگیری برون‌داد مدل‌های مختلف

1 - Eyring

2 - Kim

3 - Representative Concentration Pathways

تغییر اقلیم، با استفاده از مدل‌های گزارش ششم و سناریوهای بروز SSP^۱ هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در سراسر دنیا، تاکنون مطالعه انگشت شماری در حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود صورت پذیرفته است که بیشتر مطالعات با گزارش پنجم توسعه صورت پذیرفته و بقیه تنها با یک یا دو ایستگاه انجام شده بود و یا تمرکز اصلی پژوهش بر روی مسئله-ای غیر از دما مانند محصولات کشاورزی یا بررسی رواناب حوضه و ... بوده است. مطالعه تغییر اقلیم براساس گزارش‌ها و مدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش و استفاده از تعداد ایستگاه بیشتر می‌تواند در کنار مطالعات قبلی انجام‌شده، نتایج دقیق‌تر و جدیدی را آشکار و در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد. هدف از انجام این پژوهش، پیش‌نگری اثر تغییر اقلیم آینده بر دمای بیشینه و کمینه در قسمت بالادست حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود است. بدین منظور در این پژوهش، از نتایج آخرین گزارش موجود (CMIP6) و از مدل‌های ESM^۲ که مولفه‌های بیشتری از سامانه زمین را در مدل‌سازی آب‌وهوا در نظر می‌گیرد و توانمندی بهتری در مقایسه با مدل‌های GCM^۳ دارا می‌باشد و همچنین سال‌های کبیسه را پشتیبانی می‌کند، استفاده گردید. با توجه به این که مطالعات متعددی از عملکرد قابل‌توجه روش‌ها و مدل‌های مختلف ریزمقیاس‌سازی، از جمله مدل CMhyd^۴ در پیش‌نگری الگوهای تغییر اقلیم در مقیاس محلی حکایت می‌کنند، بنابراین در این پژوهش، مدل یادشده برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی دوره آینده موردتوجه قرار گرفت.

داده‌ها و روش‌ها

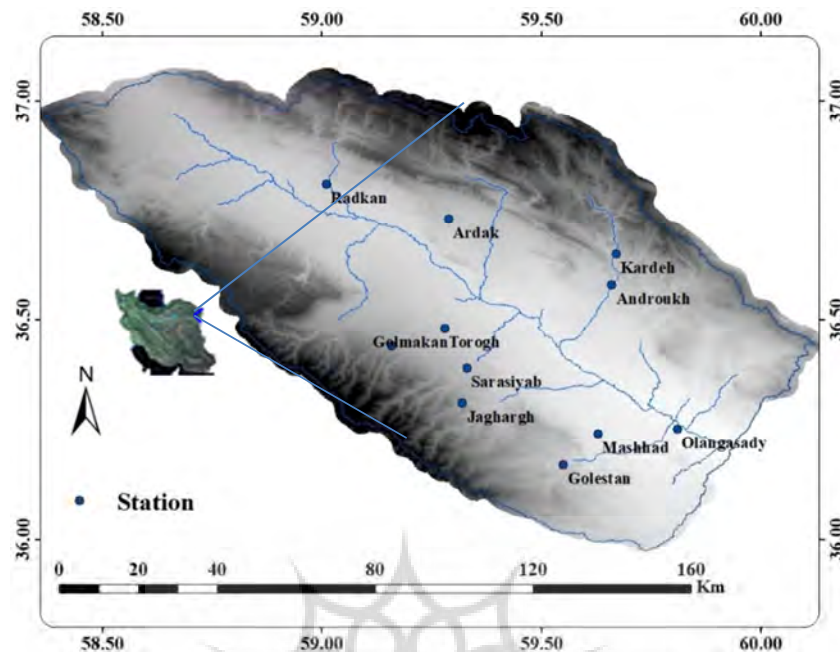
محدوده مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه بخش بالادست حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود است که بخشی از حوضه آبریز قره قوم است. این حوضه در شمال شرق ایران، بین طول‌های جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱). وسعت کل بالادست حوضه نام‌برده در حدود ۸۰۰۰ کیلومتر مربع است که ۲۰۰۰ کیلومتر مربع آن را دشت و بقیه آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. کمینه و بیشینه ارتفاع حوضه به ترتیب ۸۵۲ و ۳۳۰۹ متر است. وجود ارتفاعات مختلف و همچنین نزدیک بودن حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود به کویر مرکزی در تغییر اقلیم این منطقه نقش بسیار مهمی دارد و باعث تنوع آب‌وهوایی در آن گردیده است.

1 - Shared Socioeconomic Pathways

2 - Earth System Model

3 - General Circulation Models

4 - Climate Model data for Hydrologic modeling



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

داده‌های دوره پایه و تاریخی: جهت مقایسه و مشخص نمودن کیفیت پیش‌نگری مدل‌ها، نیاز است که داده‌های تاریخی آن توسط روش‌های معمول با داده‌های دوره پایه ایستگاه مقایسه گردند. بنابراین، برای منطقه مورد مطالعه داده‌های دمای بیشینه و کمینه روزانه ۱۱ ایستگاه در دوره پایه از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ به مدت ۳۰ سال، از سازمان هواشناسی ایران و شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی دریافت گردید. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه (منبع: سازمان هواشناسی ایران و شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی)

ردیف	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه اعشاری)	عرض جغرافیایی (درجه اعشاری)	ارتفاع (متر)
۱	ارداک	باران‌سنجی	۵۹/۴۰	۳۶/۷۳	۱۳۲۰
۲	اولنگ اسدی		۵۹/۸۱	۳۶/۲۵	۹۱۴
۳	چکنه		۵۸/۴۸	۳۶/۸۴	۱۷۰۴
۴	حصار		۵۹/۴۰	۳۶/۳۱	۱۲۵۱
۵	دولت‌آباد		۵۹/۱۶	۳۶/۴۴	۱۵۷۵
۶	رادکان		۵۹/۰۱	۳۶/۸۱	۱۲۱۴
۷	سرآسیاب		۵۹/۳۳	۳۶/۳۹	۱۲۹۶
۸	کرتیان		۵۹/۶۷	۳۶/۶۵	۱۲۶۵
۹	موشنگ		۵۹/۰۵	۳۶/۵۱	۱۵۱۵
۱۰	مشهد	سینوپتیک	۵۹/۶۳	۳۶/۲۴	۹۹۹/۲
۱۱	گلمکان		۵۹/۲۸	۳۶/۴۸	۱۱۷۶

با توجه به رفتار اقلیم منطقه مورد مطالعه در دوره پایه و همچنین طبق سناریوهای مورد نظر، میزان دمای بیشینه و کمینه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در دوره‌های آینده نزدیک (۵۴-۲۰۲۵) و آینده میانی (۸۴-۲۰۵۵) توسط نرم‌افزار CMhyd ریزمقیاس‌نمایی شدند. بدین منظور داده‌های هر مدل برای هر ایستگاه استخراج گردیدند. سپس با اعمال الگوریتم روی داده‌های تاریخی و سناریوها، بیش‌برآورد یا کم‌برآورد این مدل‌ها نسبت به مقادیر دوره پایه تصحیح گردید. همچنین لازم است قبل از استفاده از نتایج هر مدل، ضرایب آماری جهت برآورد دقت مدل به‌کارگیری شوند. یکی از ضرورت‌های مهم در مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم، بررسی کنترل کیفی و همگنی داده‌های مربوط به ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه است. بدین‌منظور مواردی از قبیل نبود آماری، کامل و دقیق بودن روزهای ماه‌ها و داده‌های پرت بررسی گردیدند. پس از کنترل کیفیت داده‌های دوره پایه در نهایت روش نگاشت توزیع (DM)^۱ برای تصحیح اریبی داده‌های دما به‌کارگیری و میزان دقت شبیه‌سازی متغیرهای دمای بیشینه و کمینه در ایستگاه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه توسط معیارهای آماری محاسبه شد. همچنین، مطالعات قبلی صورت‌پذیرفته در بعضی ایستگاه‌های محدوده مورد مطالعه (رشیدی قانع و همکاران، ۲۰۲۳)، روش نگاشت توزیع را جهت تصحیح اریبی متغیر دما در این محدوده معرفی نموده‌اند که در این پژوهش نیز از این روش استفاده گردید.

مدل‌ها و سناریوهای تغییر اقلیم: یکی از اصلی‌ترین و اساسی‌ترین عامل در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بزرگ‌مقیاس-جوی، غربالگری مدل‌های تغییر اقلیم است. داده‌های تحت پوشش دوره تاریخی مدل‌های اقلیمی استفاده‌شده در این پژوهش در حال حاضر تا سال ۲۰۱۴ است که پس از مقایسه آنها با داده‌های دوره پایه صحت‌سنجی مدل‌ها انجام می‌گردد. یکی از محدودیت‌های عمده در استفاده از خروجی مدل‌های GCM، تفکیک مکانی کم آن‌هاست که به لحاظ مکانی و زمانی با دقت مورد نیاز مدل‌های هیدرولوژیکی مطابقت ندارد؛ بنابراین از روش‌های مقیاس کاهی برای رفع این محدودیت استفاده می‌شود (کمال و مساح بوانی، ۲۰۱۲). با توجه به انجام پژوهش‌های مشابه در محدوده مورد مطالعه مدل‌های MRI-ESM2-0، ACCESS-ESM1-5 و MIROC6 که در پژوهش‌های سایر پژوهشگران (بابائیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ نیک اختر و همکاران، ۲۰۲۴؛ زرین و داداشی رودباری، ۲۰۲۱) به‌عنوان مدل‌های با عملکرد بهتر در این محدوده معرفی و استفاده شده بودند، به‌کارگیری گردیدند.

تفاوت این پژوهش با سایر پژوهش‌های انجام‌شده در منطقه مورد مطالعه در تعداد ایستگاه‌های بیشتر، مدل ریزمقیاس‌نمایی متفاوت، دوره‌های زمانی متفاوت و استفاده از مدل‌های اقلیمی پیشنهاد شده است. این پژوهش با استفاده از تعداد ایستگاه‌های بیشتر در جمع‌آوری داده‌ها، امکان تحلیل دقیق‌تر تغییر اقلیم در منطقه را فراهم کرده است. در ادامه، مقادیر دمای بیشینه و کمینه طبق سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 که از این‌پس از آنها به‌ترتیب با عنوان سناریوی خوش‌بینانه و سناریوی بدبینانه یاد می‌شود، برای محدوده مورد مطالعه استفاده شد و پس از بررسی میزان خطا توسط آماره‌های مختلف، ریزمقیاس‌نمایی توسط مدل CMhyd صورت پذیرفت. لازم به یادآوری است، علی‌رغم اینکه دو سناریوی SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در گروه سناریوهای بدبینانه طبقه‌بندی می‌شوند، با این حال در اغلب منابع سناریوی SSP5-8.5 به‌عنوان سناریوی بدبینانه در نظر گرفته می‌شود. پیش‌نگری توسط این مدل‌ها ترکیبی از مجموعه‌ای نوین از برخی سناریوهای انتشار و کاربری اراضی حاصل‌شده توسط مدل‌های IAMs^۲ بر اساس خط سیر مشترک اجتماعی و اقتصادی (SSP) در دوره آینده (سن، رشد اقتصادی، شهرنشینی، تحصیلات، جمعیت

1 - Distributing Mapping

2 - Impact Assessment Models

و... و در ارتباط با سناریوهای غلظت گازهای گلخانه‌ای است (ایرینگ و همکاران، ۲۰۱۶). جدول ۲ مشخصات مدل‌های نسل ششم توسعه استفاده‌شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات مدل‌های نسل ششم توسعه مورد استفاده در پژوهش (منبع: ذکر شده در جدول)

ردیف	نام مدل	مؤسسه/کشور	قدرت تفکیک (کیلومتر)	منبع
۱	ACCESS-ESM1-5	CSIRO/Australia	۱۹۲ × ۱۴۴	(زین ^۱ و همکاران، ۲۰۲۰)
۲	MIROC6	MIROC Consortium (JAMSTEC, AORI, NIES, R-CCS)/Japan	۲۵۶ × ۱۲۸	(کاتااکا ^۲ و همکاران، ۲۰۲۰)
۳	MRI-ESM2-0	MRI, Meteorological Research Institute/Japan	۳۲۰ × ۱۶۰	(یوکیموتو ^۳ و همکاران، ۲۰۱۹)

مدل CMhyd: جهت کاهش مقیاس برونداد مدل‌های گردش کلی از نرم‌افزار CMHyd استفاده شد. از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی، ریزمقیاس‌نمایی و تصحیح اریبی داده‌های اقلیمی استفاده می‌شود. این نرم‌افزار در محیط پایتون توسعه داده شده است. داده‌های سری‌های زمانی مدل‌های اقلیمی معمولاً با فرمت nc هستند. CMHyd شناسه داده این فایل‌ها را خوانده و براساس نقاط شبکه اطراف آن ایستگاه (۴ نقطه شبکه)، سری‌های زمانی مربوط به ایستگاه نام‌برده را از فایل nc استخراج می‌کند. در فرایند تصحیح اریبی الزاماً کاهش مقیاس انجام نمی‌شود و تفکیک مکانی داده‌های تصحیح‌شده با داده‌های خام مشابه است. CMhyd از هشت روش تصحیح اریبی طی فرآیندی مجزا برای بارش و دما (شامل دمای بیشینه و کمینه) استفاده می‌کند که چهار روش (LS^۴, DC^۵, VS^۶, DM^۷) مختص دما می‌باشند (راچنس^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). از میان روش‌های نام‌برده، اکثر مطالعات پس از ارزیابی، روش DM را پیشنهاد نموده بودند. به‌طور ویژه پژوهش (رشیدی قانع و همکاران، ۲۰۲۳) از بین انواع روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، در محدوده مورد مطالعه این پژوهش (حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود)، روش نگاشت توزیع را برای پیش‌نگری و ریزمقیاس‌نمایی متغیر دمای بیشینه و کمینه پیشنهاد نمودند. در پژوهش آنان روش DM نتایج ارزیابی بهتری برای دمای بیشینه و کمینه ارائه داد. بنابراین، در این مطالعه فرآیند تصحیح اریبی با روش نگاشت توزیع انجام شده است. نگاشت توزیع یکی از روش‌های مهم در تصحیح بایاس داده‌های اقلیمی، به‌ویژه دما، در نرم‌افزارهایی مانند CMHYD است. هدف اصلی این روش، اصلاح داده‌های خروجی مدل‌های گردش عمومی جو است تا با داده‌های مشاهداتی سازگارتر شوند. در فرمول روش نگاشت توزیع، ابتدا تابع توزیع داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل GCM به‌دست می‌آید. سپس با استفاده از این توابع، داده‌های مدل GCM به‌گونه‌ای تغییر می‌کنند که توزیع آنها مشابه توزیع داده‌های مشاهداتی شود (پانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ بابائیان و همکاران، ۲۰۲۳). فرمول نگاشت توزیع برای تصحیح بایاس دما شامل دو مرحله اصلی است که در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده است:

$$T_{contr}^*(d) = F_N^{-1}(F_N(T_{contr}(d) | \mu_{contr,m}, \sigma_{contr,m}^2) | \mu_{obs,m}, \sigma_{obs,m}^2) \quad (1)$$

- 1 - Ziehn
- 2 - Kataoka
- 3 - Yukimoto
- 4 - Linear Scaling
- 5 - Delta-Change
- 6 - Variance Scaling
- 7 - Distribution Mapping
- 8 - Rathjens

$$T_{scen}^*(d) = F_N^{-1}(F_N(T_{scen}(d) | \mu_{contr,m}, \sigma_{contr,m}^2) | \mu_{obs,m}, \sigma_{obs,m}^2) \quad (2)$$

که در آن: ۱- $T_{contr}^*(d)$ = مقدار دمای تصحیح شده در دوره تاریخی مدل برای روز d در ماه m - ۲ $T_{scen}^*(d)$ = مقدار دمای تصحیح شده در دوره آینده برای روز d در ماه m - ۳ $T_{scen}^*(d)$ و $T_{contr}^*(d)$ = مقدار دمای پیش-نگری شده مدل اقلیمی در دوره های تاریخی مدل و دوره آینده ۴- F_N = تابع توزیع نرمال ۵- F_N^{-1} = تابع معکوس توزیع نرمال ۶- $\mu_{contr,m}, \sigma_{contr,m}^2$ = میانگین و واریانس داده های پیش نگری شده در دوره تاریخی مدل ۷- $\mu_{obs,m}, \sigma_{obs,m}^2$ = میانگین و واریانس داده های دوره پایه است. در این روش، ابتدا تابع توزیع تجمعی نرمال داده های پیش نگری شده و پایه محاسبه می شود. سپس مقدار دمای پیش نگری شده به یک مقدار احتمال تبدیل می شود. در ادامه، این مقدار احتمال در تابع معکوس نرمال داده های مشاهده ای قرار می گیرد تا مقدار دمای تصحیح شده به دست آید (توچبین و سیرت^۱، ۲۰۱۲).

تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی مدل های اقلیمی: همه مدل های اقلیمی و هیدرولوژیکی با عدم قطعیت همراه هستند. بنابراین، نتایج حاصل از این مدل ها باید با احتیاط تفسیر شود. یک روش معمول برای کاستن از عدم قطعیت مدل ها گزینش مدلی با کمترین مقدار اربیبی است. در این رویکرد عملکرد مدل برای دوره تاریخی با توجه به مشاهدات ایستگاهی و داده های باز تحلیل شده آزمون می شود (لی و وانگ^۲، ۲۰۱۴) با این حال، کاربست این رویکرد با مشکلاتی همراه است که می توان به وردایی زیاد مدل در دوره تاریخی اشاره کرد (یان^۳ و همکاران، ۲۰۱۹). در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد نتایج مدل ها از شاخص های آماری ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب KGE استفاده شد. نحوه محاسبه این شاخص ها در روابط (۳) تا (۵) نشان داده شده است.

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})(o_i - \bar{o})}{\sigma_s \sigma_o} \right]^2 \quad (3)$$

که در آن: o_i داده های دوره پایه، s_i داده های برآورد شده و σ واریانس است. R^2 بیانگر ارتباط داده های دوره پایه و برآورد شده است. دامنه این پارامتر بین صفر تا یک است، هر چه این مقدار به یک نزدیک تر باشد، نشان دهنده ارتباط قوی بین دو گروه است (موریاسی^۴ و همکاران، ۲۰۰۷).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (M_i - O_i)^2} \quad (4)$$

که در آن: O_i داده های دوره پایه، M_i داده های برآورد شده است. مقادیر RMSE معرف دقت در بسیاری از روش های آماری است. هر چه این مقادیر به صفر نزدیک تر باشد، نشان دهنده دقت بالای مدل و مقدار صفر، نشان دهنده عدم وجود خطا در برآورد مدل است.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (5)$$

که در آن: sim و obs به ترتیب مقادیر شبیه سازی شده و مشاهده شده هستند. σ انحراف معیار، T دوره زمانی، μ میانگین و r همبستگی خطی بین داده های مشاهده ای و داده های مدل است (زرین و همکاران، ۲۰۲۱).

1 - Teutschbein & Seibert

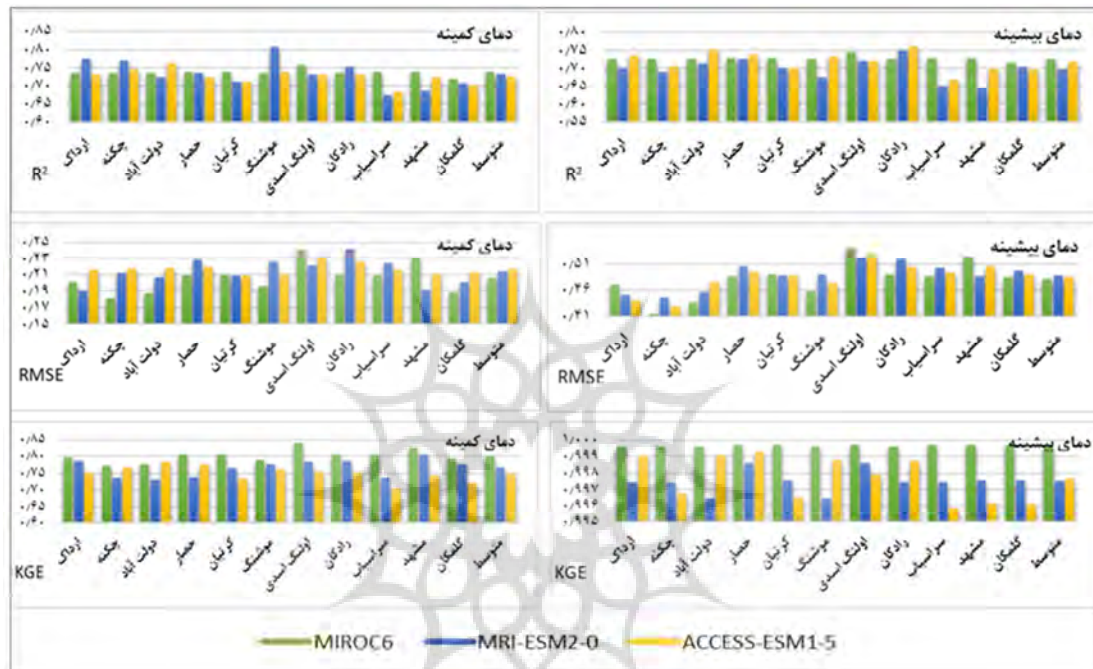
2 - Lee & Wang

3 - Yan

4 - Moriasi

نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های جهانی اقلیمی MIROC6 , ACCESS-ESM1-5 , MRI-ESM2-0 در تولید داده‌های دمای بیشینه و کمینه، داده‌های تاریخی این مدل‌ها با داده‌های دوره پایه برای یازده ایستگاه منتخب در حوضه مقایسه گردید. در ادامه، میزان شاخص‌های عملکردی R^2 , KGE , RMSE مدل‌ها در شکل شماره ۳ به‌صورت سالانه نشان داده شده است.



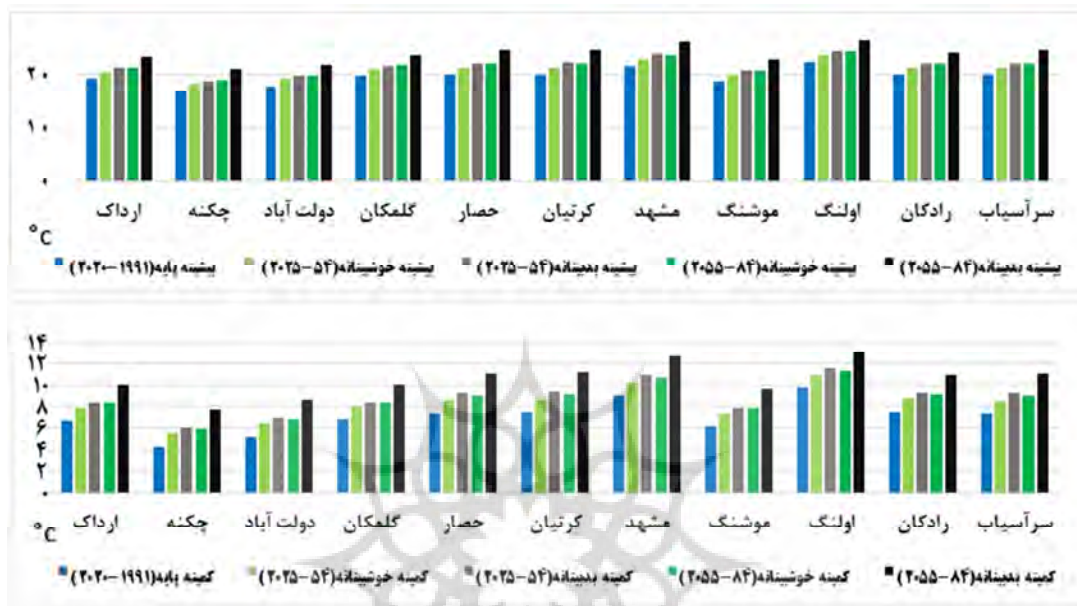
شکل ۳: مقادیر شاخص‌های عملکرد دمای کمینه و بیشینه سالانه مدل‌های MIROC6 , ACCESS-ESM1-5 , و MRI-ESM2-0 در ایستگاه‌های مورد مطالعه (منبع: یافته‌های پژوهش)

در نهایت، در بررسی نتایج ارزیابی‌ها مشخص گردید شاخص‌های ارزیابی مدل MIROC6 دارای بهترین عملکرد نسبت به مدل‌های MRI-ESM2-0 و ACCESS-ESM1-5 در بیشتر ایستگاه‌های حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود است. نتایج سالانه شاخص‌های ارزیابی نشان می‌دهد میانگین شاخص‌های عملکردی R^2 , RMSE و KGE برای دمای بیشینه به‌ترتیب، ۰/۷۲۷۷، ۰/۴۸ و ۰/۹۹۹۷ و برای دمای کمینه به‌ترتیب ۰/۷۳۸۱، ۰/۲۰ و ۰/۸۰۰۷ است که عملکرد قابل‌قبولی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، شبیه‌سازی دمای بیشینه و کمینه دوره‌های آینده توسط مدل اقلیمی منتخب MIROC6 انجام گردید.

فصل بهار:

شکل ۴ نمودار تغییرات دمای بیشینه و کمینه فصل بهار در دوره‌های آینده نزدیک و میانی را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. با توجه به نتایج موجود، ایستگاه چکنه کمترین دمای کمینه (۴/۳۱°C) و بیشینه (۱۶/۹۷°C) و ایستگاه اولنگ بیشترین دمای کمینه (۹/۷۲°C) و بیشینه (۲۲/۳۸°C) را در دوره پایه به ثبت رسانده است. در فصل بهار بیشترین میزان افزایش دمای بیشینه، در سناریوی بدبینانه دوره میانی (بین ۳/۹۲°C در ایستگاه گلستان تا ۴/۶۲°C

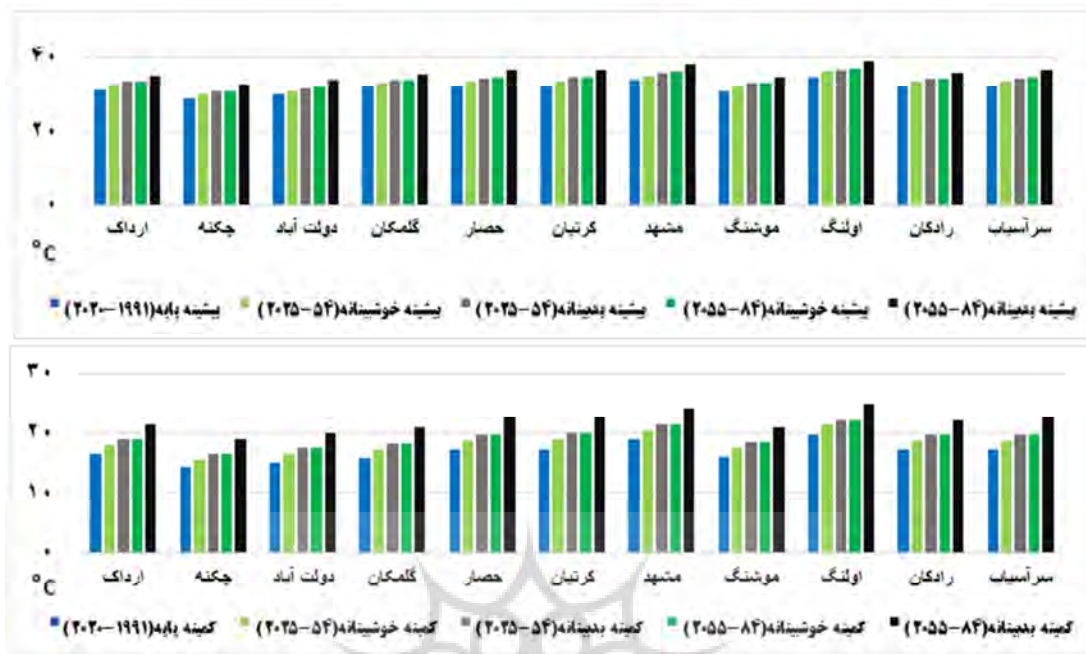
در ایستگاه مشهد) رخ می‌دهد. کمترین افزایش دمای بیشینه ایستگاه‌ها در سناریوی خوش‌بینانه دوره نزدیک (به میزان $1/30^{\circ}\text{C}$ در ایستگاه گل‌مکان تا $1/37^{\circ}\text{C}$ در ایستگاه مشهد) رخ خواهد داد. همچنین، بیشترین میزان افزایش دمای کمینه، در سناریوی بدبینانه دوره میانی (بین $3/22^{\circ}\text{C}$ در گل‌مکان تا $3/74^{\circ}\text{C}$ در مشهد) و کمترین افزایش دمای کمینه در سناریوی خوش‌بینانه دوره نزدیک (به میزان $1/13^{\circ}\text{C}$ در گل‌مکان تا $1/23^{\circ}\text{C}$ در مشهد) است.



شکل ۴: پیش‌نگری دمای بیشینه و کمینه فصل بهار در دوره‌های آینده نزدیک و میانی (منبع: یافته‌های پژوهش)

فصل تابستان

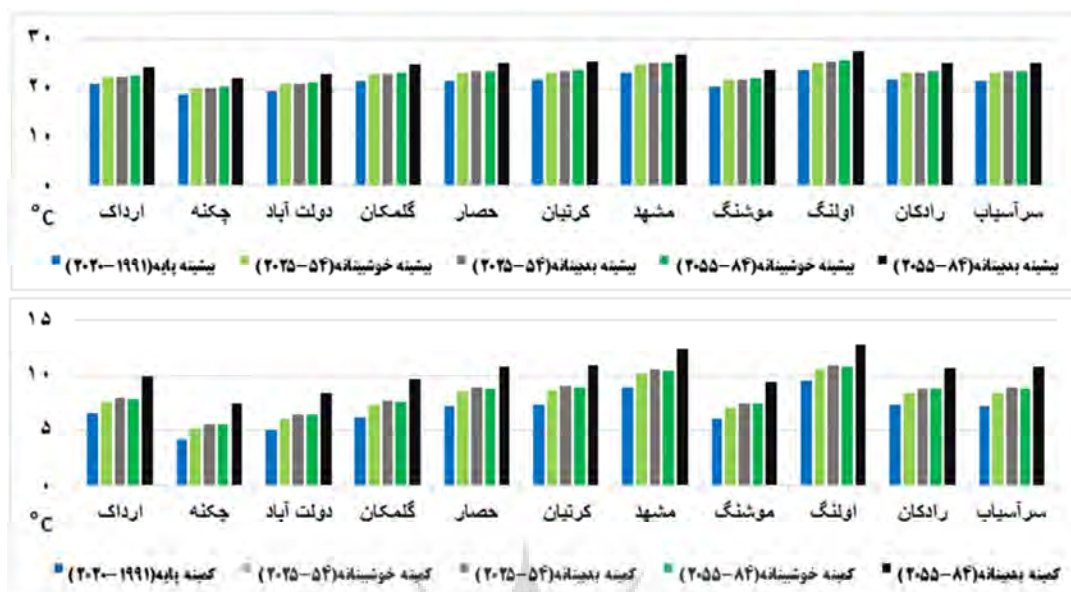
شکل ۵ نتایج پیش‌نگری دمای بیشینه و کمینه فصل تابستان در دوره‌های آینده نزدیک و میانی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج موجود، در فصل تابستان در همه سناریوها افزایش دمای بیشینه (بین $0/94^{\circ}\text{C}$ در سناریوی خوش-بینانه نزدیک در ایستگاه گل‌مکان تا $4/27^{\circ}\text{C}$ در سناریوی بدبینانه میانی در ایستگاه مشهد) رخ خواهد داد. همچنین، میزان افزایش دمای کمینه فصل تابستان ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه از $1/43^{\circ}\text{C}$ در سناریوی خوش‌بینانه نزدیک در ایستگاه چکنه، تا $4/85^{\circ}\text{C}$ در سناریو بدبینانه میانی در ایستگاه مشهد خواهد بود.



شکل ۵: پیش‌نگری دمای بیشینه و کمینه فصل تابستان در دوره‌های آینده نزدیک و میانی (منبع: یافته‌های پژوهش)

فصل پاییز

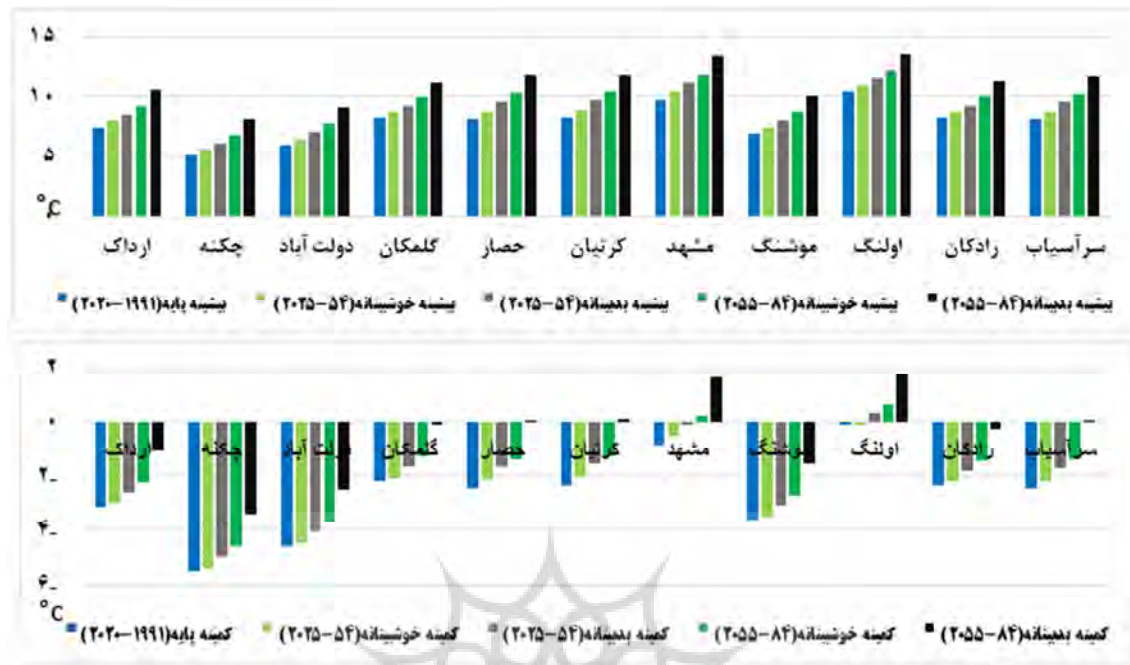
با توجه به نتایج شکل ۶، افزایش دما در همه ایستگاه‌ها به‌خصوص سناریوی بدبینانه آینده میانی کاملاً مشهود است. ایستگاه مشهد بار دیگر بیشترین افزایش دمای بیشینه ($3/68^{\circ}\text{C}$) را در سناریوی بدبینانه نشان می‌دهد که با توجه به نتایج فرزندی و همکاران (۲۰۱۴) می‌تواند علاوه بر اثر گرمایش جهانی به‌دلیل اثر جزیره گرمایی شهری باشد. در بررسی نتایج این پژوهش، مشخص گردید افزایش دمای بیشینه (بین $1/40^{\circ}\text{C}$ در سناریوی خوش‌بینانه نزدیک در ایستگاه گل‌مکان تا $3/68^{\circ}\text{C}$ در سناریوی بدبینانه میانی در ایستگاه مشهد) در دوره‌های آینده، شتاب بیشتری نسبت به دمای کمینه (بین $0/97^{\circ}\text{C}$ در سناریوی خوش‌بینانه نزدیک در ایستگاه اولنگ تا $3/56^{\circ}\text{C}$ در سناریوی بدبینانه میانی در ایستگاه مشهد) دارد.



شکل ۶: پیش‌نگری دمای بیشینه و کمینه فصل پاییز در دوره‌های آینده نزدیک و میانی (منبع: یافته‌های پژوهش)

فصل زمستان

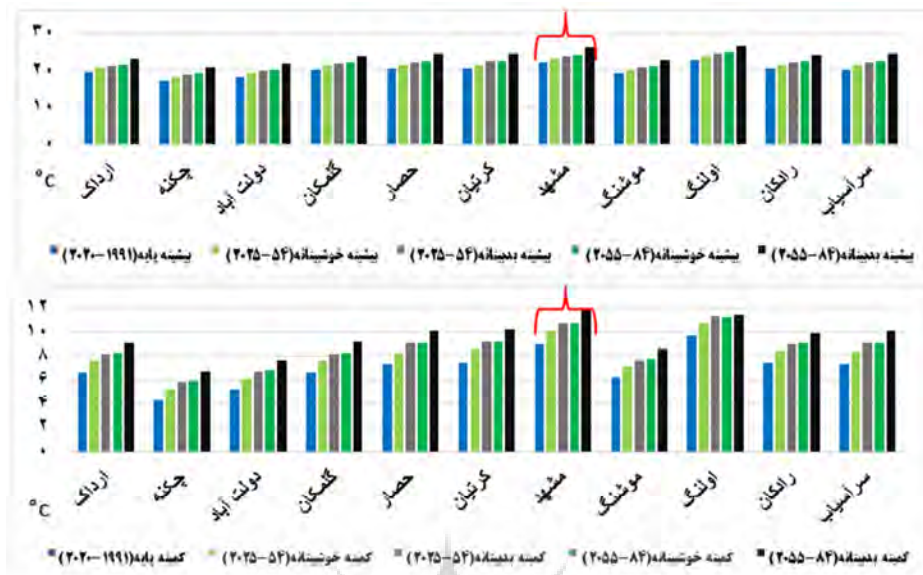
شکل ۷ نتایج پیش‌نگری دمای بیشینه و کمینه فصل زمستان ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در دوره‌های آینده نزدیک و میانی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج موجود، ایستگاه چکنه به‌عنوان مرتفع‌ترین ایستگاه کمترین دمای بیشینه (بین $5/05^{\circ}\text{C}$ در دوره پایه تا $8/14^{\circ}\text{C}$ در دوره بدبینانه میانی) و دمای کمینه (بین $3/44^{\circ}\text{C}$ در دوره پایه تا $5/52^{\circ}\text{C}$ در سناریوی بدبینانه دوره میانی) را در فصل زمستان نشان می‌دهد. از نظر تغییر دمای بیشینه در دوره‌های آینده، نسبت به دوره پایه، افزایش دما در همه سناریوها به‌خصوص سناریوی بدبینانه آینده میانی (بین $2/95^{\circ}\text{C}$ در گلنمان تا $3/71^{\circ}\text{C}$ در مشهد) کاملاً مشهود است. بررسی تغییرات دمای کمینه در فصل زمستان نشان می‌دهد، بیشترین میزان افزایش دمای کمینه ایستگاه‌ها نسبت به دوره پایه در سناریوی بدبینانه دوره میانی (بین $1/88^{\circ}\text{C}$ در اولنگ تا $2/492^{\circ}\text{C}$ در مشهد) رخ خواهد داد و کمترین افزایش دمای کمینه ایستگاه‌ها در سناریوی خوش‌بینانه دوره نزدیک، (به میزان $0/75^{\circ}\text{C}$ در ایستگاه اولنگ تا $0/303^{\circ}\text{C}$ در ایستگاه مشهد) است.



شکل ۷: پیش‌نگری دمای بیشینه و کمینه فصل زمستان در دوره‌های آینده نزدیک و میانی (منبع: یافته‌های پژوهش)

مقایسه سالانه

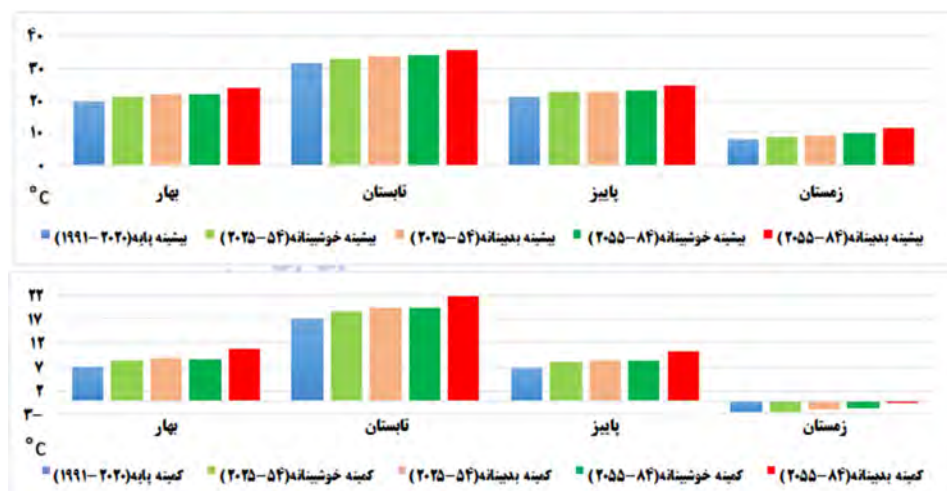
شکل ۸ نتایج پیش‌نگری دمای بیشینه و کمینه سالانه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در دوره‌های آینده نزدیک و میانی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج موجود، به‌طور کلی در همه ایستگاه‌ها افزایش دما در دوره‌های آینده و سناریوهای مختلف رخ خواهد داد که این افزایش در سناریوی خوش‌بینانه دوره آینده نزدیک کمتر و در سناریوی بدبینانه دوره آینده میانی بیشتر است. کمترین میزان افزایش دمای بیشینه (به میزان $1/03^{\circ}\text{C}$ در سناریوی خوش-بینانه نزدیک) مربوط به ایستگاه گلمکان است و کمترین میزان افزایش دمای کمینه (به میزان $0/86^{\circ}\text{C}$ در سناریوی خوش‌بینانه دوره آینده نزدیک) متعلق به ایستگاه حصار است. ایستگاه مشهد به‌عنوان مهم‌ترین ایستگاه منطقه مورد مطالعه، در کل سال بیشترین میزان افزایش دمای بیشینه (در سناریوی خوش‌بینانه دوره نزدیک $1/18^{\circ}\text{C}$ و در سناریوی بدبینانه دوره میانی $4/07^{\circ}\text{C}$) و بیشترین میزان افزایش دمای کمینه (در سناریوی خوش‌بینانه دوره نزدیک $1/06^{\circ}\text{C}$ و در سناریوی بدبینانه دوره میانی $2/78^{\circ}\text{C}$) را نشان می‌دهد. موقعیت شهری ایستگاه مشهد و تأثیرات جزیره گرمایی می‌تواند این تفاوت را توضیح دهد. لازم به یادآوری است در پژوهش فرزندی و همکاران (۲۰۱۴) رابطه بین لگاریتم رشد جمعیت مشهد و اختلاف دما به‌صورت یک الگوی استاندارد شده ارائه شد که وجود جزیره حرارتی در مشهد را تایید نمودند. آنان عنوان نمودند رشد جمعیت می‌تواند عامل اصلی در گرم شدن شهر مشهد باشد؛ زیرا رشد جمعیت سبب رشد صنایع، خودروها، ساختمان‌سازی و ... می‌شود.



شکل ۸: پیش‌نگری دمای بیشینه و کمینه سالانه ایستگاه‌های منتخب در دوره‌های آینده نزدیک و میانی (منبع: یافته‌های پژوهش)

مقایسه تغییرات فصلی دمای بیشینه و کمینه

در شکل ۹ نمودار متوسط تغییرات فصلی دمای ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. در فصل بهار دمای بیشینه و کمینه در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه افزایش نشان می‌دهند. این افزایش در دوره دورتر (۲۰۸۴-۲۰۵۵) و سناریوی بدبینانه بیشترین مقدار را دارد (بیشینه: $4/27$ درجه سلسیوس و کمینه: $3/50$ درجه سلسیوس). در فصل تابستان، بیشترین تغییر در دمای کمینه مشاهده می‌شود. در دوره ۲۰۸۴-۲۰۵۵ و سناریوی بدبینانه، دمای کمینه تا $5/11$ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده گرم‌ترین شرایط در این فصل است. افزایش دما در پاییز نسبت به تابستان و بهار کمتر است. برای دمای بیشینه، بیشترین افزایش در سناریوی بدبینانه و دوره ۲۰۸۴-۲۰۵۵ $3/51$ درجه سلسیوس و برای دمای کمینه $3/41$ درجه سلسیوس ثبت شده است. تغییرات دمایی زمستان کمتر از سایر فصول است، اما همچنان در سناریوی بدبینانه و دوره دورتر افزایش قابل توجهی وجود دارد. دمای بیشینه در این دوره به $3/30$ درجه سلسیوس و دمای کمینه به $2/21$ درجه سلسیوس می‌رسد. در تفسیر نتایج تغییرات سالانه دمای بیشینه و کمینه مشخص گردید، روند افزایش دما مشابه تغییرات فصلی است. در سناریوی خوش‌بینانه، افزایش دمای بیشینه از $1/11$ درجه سلسیوس در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۴ به $1/97$ درجه سلسیوس در ۲۰۸۴-۲۰۵۵ می‌رسد. در سناریوی بدبینانه، این مقدار بیشتر است و تا $3/74$ درجه سلسیوس برای دمای بیشینه و $2/48$ درجه سلسیوس برای دمای کمینه افزایش می‌یابد. افزایش دما در تمام فصول و سناریوها، به‌ویژه در سناریوی بدبینانه، نشان‌دهنده تأثیرات شدید تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه است. همچنین، افزایش دمای تابستان به‌ویژه در دمای کمینه می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه منابع آب، تشدید خشکسالی و اثرات زیست‌محیطی گسترده شود. از طرف دیگر، گرمایش فصل زمستان ممکن است بر الگوهای بارش و ذخایر برف تأثیر گذاشته و مشکلاتی در تأمین آب در دوره‌های خشک ایجاد کند.



شکل ۹: مقایسه متوسط بیشینه و کمینه فصلی ایستگاه‌های منتخب در دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۲۰) با سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۵-۵۴) و میانی (۲۰۵۵-۸۴) (منبع: یافته‌های پژوهش)

با توجه به نتایج جدول شماره ۳ تغییرات دمای کمینه و بیشینه در منطقه مورد مطالعه، نشان‌دهنده افزایش چشمگیر دما است. افزایش دمای کمینه در سناریوی بدبینانه دوره میانی (۲۰۵۵-۸۴) به‌ویژه در تابستان بیشترین مقدار را دارد که نشان‌دهنده گرم‌تر شدن شب‌ها نسبت به روزها در تابستان است. اختلاف دمای شبانه‌روز در حال کاهش است. میزان گرمایش در دوره گرم سال (بهار و تابستان) نسبت به دوره سرد سال (پاییز و زمستان) بیشتر است. کمترین میزان گرمایش در شب‌های فصل زمستان اتفاق می‌افتد. به‌جز فصل تابستان، در سایر فصول دمای بیشینه یا روزانه افزایش بیشتری نسبت به دمای کمینه یا شبانه دارد. این موضوع می‌تواند بر الگوهای تبخیر - ترقق، منابع آبی و فنولوژی و عملکرد برخی محصولات کشاورزی تأثیر منفی داشته باشد. افزایش دما در دوره گرم، دسترسی به منابع آب را محدود کرده و فشار بیشتری بر اکوسیستم‌های منطقه وارد می‌کند. علاوه بر این، افزایش دمای زمستان و کاهش احتمالی بارش برف، بر ذخایر آب در مناطق مرتفع تأثیرگذار خواهد بود.

جدول ۳: مقدار تغییر متوسط دمای بیشینه و کمینه فصلی و سالانه ایستگاه‌های منتخب در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۵-۵۴) و میانی (۲۰۵۵-۸۴) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۲۰) (منبع: یافته‌های پژوهش)

فصل	متغیر	سناریوی خوش‌بینانه (°C) (۵۴-۲۰۲۵)	سناریوی خوش‌بینانه (°C) (۸۴-۲۰۵۵)	سناریوی بدبینانه (°C) (۵۴-۲۰۲۵)	سناریوی بدبینانه (°C) (۸۴-۲۰۵۵)
بهار	دمای بیشینه	۱/۳۵	۲/۰۶	۲/۰۹	۴/۲۷
	دمای کمینه	۱/۲۰	۱/۶۵	۱/۷۷	۳/۵۰
تابستان	دمای بیشینه	۱/۰۷	۲/۰۸	۱/۹۰	۳/۸۹
	دمای کمینه	۱/۵۱	۲/۴۵	۲/۴۷	۵/۱۱
پاییز	دمای بیشینه	۱/۴۹	۱/۸۳	۱/۶۴	۳/۵۱
	دمای کمینه	۱/۱۱	۱/۴۴	۱/۵۱	۳/۴۱
زمستان	دمای بیشینه	۰/۵۵	۱/۸۹	۱/۱۷	۳/۳۰
	دمای کمینه	۰/۱۸	۰/۹۶	۰/۶۲	۲/۲۱
سالانه	دمای بیشینه	۱/۱۱	۱/۹۷	۱/۷۰	۳/۷۴
	دمای کمینه	۰/۹۸	۱/۶۳	۱/۵۹	۲/۴۸

دامنه عدم قطعیت: بررسی دامنه عدم قطعیت پیش‌نگری دمای کمینه و بیشینه نشان می‌دهد، بیشترین عدم قطعیت مربوط به دمای کمینه سالانه در سناریوی بدبینانه آینده میانی با دامنه ۳/۴۲ تا ۴/۰۵ است و پس از آن بیشترین عدم قطعیت به دمای کمینه سالانه در سناریوی بدبینانه آینده میانی با دامنه ۲/۱۶ تا ۲/۸۱ مربوط است. در جدول شماره ۴ دامنه عدم قطعیت دمای بیشینه و کمینه سالانه متوسط حوضه در سطح معنی داری ۹۵ درصد آورده شده است.

جدول ۴: مقادیر تغییر دمای بیشینه و کمینه سالانه با دامنه عدم قطعیت (سطح ۹۵ درصد) قسمت علیای حوضه آبریز کشف رود در دوره‌های آینده نزدیک و میانی بر طبق سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه نسبت به دوره پایه (منبع: یافته‌های پژوهش)

فصل	متغیر	سناریوی خوش‌بینانه (°C) (۵۴-۲۰۲۵)	سناریوی خوش‌بینانه (°C) (۸۴-۲۰۵۵)	سناریوی بدبینانه (°C) (۵۴-۲۰۲۵)	سناریوی بدبینانه (°C) (۸۴-۲۰۵۵)
سالانه	دمای بیشینه	۰/۹ - ۱/۳۲	۱/۶۲ - ۲/۲۷	۱/۴۳ - ۱/۸۷	۳/۴۲ - ۴/۰۵
	دمای کمینه	۰/۷۵ - ۱/۲۳	۱/۲۴ - ۲/۰۱	۱/۴۱ - ۱/۷۹	۲/۱۶ - ۲/۸۱

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از ارزیابی مدل CMhyd براساس معیارهای R, RMSE, KGE نشان داد که در محدوده مورد مطالعه شبیه‌سازی توسط مدل MIROC6 با دقت بیشتری صورت پذیرفته است. میانگین شاخص‌های عملکردی R^2 RMSE, و KGE برای دمای بیشینه به ترتیب ۰/۷۲۷۷، ۰/۴۸ و ۰/۹۹۹۷ و برای دمای کمینه به ترتیب ۰/۷۳۸۱، ۰/۲۰ و ۰/۸۰۰۷ است. واکاوی نتایج تغییرات فصلی دما، افزایش دمای کمینه و بیشینه در فصل بهار در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه را نشان می‌دهند. بیشترین مقدار این افزایش در سناریوی بدبینانه دوره دورتر (۲۰۸۴-۲۰۵۵) خواهد بود (بیشینه: ۴/۲۷ درجه سلسیوس و کمینه: ۳/۵۰ درجه سلسیوس). بیشترین میزان تغییر در دمای کمینه در فصل تابستان مشاهده می‌شود. در سناریوی بدبینانه این فصل، در دوره ۲۰۸۴-۲۰۵۵، دمای کمینه تا ۵/۱۱ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده گرم‌ترین شرایط در این فصل است. افزایش دما در پاییز نسبت به تابستان و بهار کمتر است. برای دمای بیشینه، بیشترین افزایش در سناریوی بدبینانه و دوره ۲۰۸۴-۲۰۵۵ ۳/۵۱ درجه سلسیوس و برای دمای کمینه ۳/۴۱ درجه سلسیوس ثبت شده است. کمترین تغییرات دمایی در فصل زمستان رخ خواهد داد؛ اما همچنان در سناریوی بدبینانه و دوره دورتر افزایش دما وجود دارد. دمای کمینه و بیشینه در این دوره به ترتیب به میزان ۲/۲۱ و ۳/۳۰ درجه سلسیوس افزایش خواهند داشت. تغییرات سالانه دمای کمینه، در سناریوی خوش‌بینانه، ۱/۱۱ درجه سلسیوس در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۴ و ۱/۹۷ درجه سلسیوس در ۲۰۸۴-۲۰۵۵ افزایش می‌یابد. در سناریوی بدبینانه، این مقدار بیشتر است و تا ۳/۷۴ درجه سلسیوس برای دمای بیشینه و ۲/۴۸ درجه سلسیوس برای دمای کمینه افزایش می‌یابد. تغییرات دمای کمینه و بیشینه در منطقه مورد مطالعه، مانند پژوهش (زرین و همکاران، ۱۴۰۰) نشان‌دهنده افزایش چشمگیر دما در همه فصول است. این تغییرات نشان‌دهنده ماهیت پیچیده تغییر اقلیم و تأثیرات متغیر آن بر مناطق مختلف است. همچنین، مقایسه پژوهش‌های مختلفی که بر اساس مدل‌های مختلف گزارش ششم انجام شده است، نشان داد که نتایج برخی از پژوهش‌های انجام‌شده (شیفته و همکاران، ۲۰۱۲؛ بابائیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ افسری و همکاران، ۲۰۲۴؛ نزوی علمداری و همکاران، ۲۰۲۵) با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان یک ابزار مدیریتی برای برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیمات مناسب در جهت مقابله با اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود مورد استفاده قرار گیرد که

لازم است تاثیر افزایش و یا کاهش بارندگی بر سایر پارامترهای هیدرولوژیکی مانند رواناب، تبخیر و نفوذپذیری خاک نیز بررسی شود. افزایش دما و تغییر در الگوهای فصلی چالش جدیدی را برای مدیران و تصمیم‌گیران ایجاد می‌کند. بنابراین، علاوه بر سازگاری با این تغییرات، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های آبخیزداری، بهبود سیستم‌های آبیاری و افزایش بهره‌وری در مصرف آب، برای تضمین امنیت آب در آینده ضروری است. همچنین، توجه به این نکته ضروری است که هیچ سناریویی قطعیت ندارد و بنابراین با اقدامات لازم برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، احتمال تحقق سناریوی بدبینانه کمتر خواهد بود.

منابع

- آهني، الهه؛ ضيائي، سامان؛ محمدي، حميد؛ مرداني نجف‌آبادي، مصطفي؛ ميرزايي، عباس. (۱۴۰۳). ارزيابي و شبیه‌سازی ردپای آب محصولات کشاورزی در سناریوهای تغییر اقلیم: مطالعه موردی حوضه آبریز کشف رود. دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۳۴(۱)، ۲۸۷-۳۰۴.
- بابايان، ایمان؛ نجفی نیک، زهرا؛ زایل عباسی، فاطمه؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ ادب، حامد؛ ملبوسی، شراره. (۱۳۸۸). ارزيابي تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G. جغرافیا و توسعه، ۱۵۲-۱۳۵، (۱۶)۷.
- بابائیان، ایمان؛ مدیریان، راهله؛ خزانه‌داری، لیلی؛ کریمیان، مریم؛ کوزه‌گران، سعیده؛ کوهی، منصوره؛ فرامرز، یاشار؛ ملبوسی، شراره. (۱۴۰۲). چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس‌کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd. فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۲)، ۴۴۹-۴۳۱.
- رشیدی قانع، محبوبه؛ متولی، صدرالدین؛ جانباز قبادی، غلامرضا؛ کوهی، منصوره. (۱۴۰۲). ارزيابي توانمندی سه روش آماری ریزمقیاس گردانی برون‌داد دما و بارش مدل‌های CMIP6 در حوضه آبریز کشف‌رود. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۲(۵۳)، ۱۱۷-۱۳۲.
- رضایی، مسعود. (۱۴۰۲). ضرورت اقدام ملی برای ارتقای سازگاری با تغییرات اقلیمی. (۱۹۳۲۰). ماهنامه گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۳۱(۷).
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر اساس رویکرد همدادی چند مدلی CMIP6. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱)، ۷۵-۹۰.
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ صالح‌آبادی، نرگس. (۱۴۰۰). بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت‌شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6). مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۵(۱)، ۳۵-۵۴.
- زنوزی علمداری، نازلی؛ سیحانی، بهروز؛ اصلاحی، مهدی؛ محمدی، مسیح اله. (۱۴۰۳). پهنه‌بندی بارش و دمای استان خراسان رضوی با استفاده از داده‌های گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6). مطالعات علوم محیط زیست، ۹(۴)، ۹۷۶۱-۹۷۵۳.
- عطایی، هوشمند؛ کوهی، منصوره؛ مدیریان، راهله؛ بذرافشان، بهاره. (۱۴۰۰). تغییرات پیش‌نگری‌شده در دما و بارش حوضه کشف‌رود بر مبنای روش‌های مقیاس‌کاهی دینامیکی و آماری. مخاطرات محیط طبیعی، ۳۰(۱۰)، ۱۸۳-۲۰۱.
- فرزندی، محبوبه؛ رضایی پزند، حجت؛ سید نژاد گلختمی، نفیسه. (۱۳۹۳). تعیین نقطه‌ی شکست دمای سالانه با الگوی وابستگی سیستم خاکستری برای تحلیل جزیره حرارتی مشهد. مخاطرات محیط طبیعی، ۳(۴)، ۴۹-۶۰.
- کاظمی، ایمان، اسدی وایقان، امیر؛ آذری، محمود. (۱۴۰۳). پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر روی دبی حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود با استفاده از مدل SWAT. علوم آب و خاک، ۲۸(۱)، ۹۳-۱۰۹.
- کمال، علیرضا؛ مساح بوانی، علیرضا. (۱۳۹۱). مقایسه عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم AOGCM-TAR و AOGCM-AR4 در تاثیر بر رواناب حوضه در دوره آتی. فیزیک زمین و فضا، ۳۸(۳)، ۱۷۵-۱۸۸.

Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024). A CMIP6 Multi-Model Analysis of the Impact of Climate Change on Severe Meteorological Droughts through Multiple Drought Indices—Case Study of Iran's Metropolises. *Water*, 16(5), 711.

Allen, M., Antwi-Agyei, P., Aragon-Durand, F., Babiker, M., Bertoldi, P., Bind, M., ... & Zickfeld, K. (2019). Technical Summary: Global warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial

- levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15716/>.
- Baker, N. C., & Huang, H. P. (2014). A comparative study of precipitation and evaporation between CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles in semiarid regions. *Journal of Climate*, 27(10), 3731-3749.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Guo, J., Yan, Y., Chen, D., Lv, Y., Han, Y., Guo, X., & Zhai, P. (2020). The response of warm-season precipitation extremes in China to global warming: an observational perspective from radiosonde measurements. *Climate Dynamics*, 54, 3977-3989.
- Kataoka, T., Tatebe, H., Koyama, H., Mochizuki, T., Ogochi, K., Naoe, H., ... & Watanabe, M. (2020). Seasonal to decadal predictions with MIROC6: Description and basic evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(12), e2019MS002035.
- Kim, H. J., Cho, K., Kim, Y., Park, H., Lee, J. W., Kim, S. J., & Chae, Y. (2020). Spatial assessment of water-use vulnerability under future climate and socioeconomic scenarios within a River Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(7), 05020011.
- Lee, J. Y., & Wang, B. (2014). Future change of global monsoon in the CMIP5. *Climate Dynamics*, 42, 101-119.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nikakhtar, M., Rahmati, S. H., Massah Bavani, A. R., & Babaeian, I. (2024). Mitigating the adverse impacts of climate change on river water quality through adaptation strategies: A Case Study of the Ardak Catchment, Northeast Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(9), 9131-9147.
- Papalexiou, S. M., & Montanari, A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resources Research*, 55(6), 4901-4914.
- Piani, C., Weedon, G. P., Best, M., Gomes, S. M., Viterbo, P., Hagemann, S., & Haerter, J. O. (2010). Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395(3-4), 199-215.
- Raghavan, S. V., Liu, J., Nguyen, N. S., Vu, M. T., & Liong, S. Y. (2018). Assessment of CMIP5 historical simulations of rainfall over Southeast Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 132, 989-1002.
- Rashid, I., Romshoo, S. A., Chaturvedi, R. K., Ravindranath, N. H., Sukumar, R., Jayaraman, M., ... & Sharma, J. (2015). Projected climate change impacts on vegetation distribution over Kashmir Himalayas. *Climatic Change*, 132, 601-613.
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2016). CMhyd user manual. Doc Prep Simulated Clim Change Data Hydrol. Impact Study, 1413. URL: <http://swat.tamu.edu/software/cmhyd>.
- Rivera, J. A., & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, 241, 104953. Doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104953.
- Shiftehsome'e, B., Ezani, A., & Tabari, H. (2012). Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran. *Atmospheric research*, 113, 1-12.
- Stott, P. A., Christidis, N., Otto, F. E., Sun, Y., Vanderlinden, J. P., van Oldenborgh, G. J., ... & Zwiers, F. W. (2016). Attribution of extreme weather and climate-related events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 23-41.
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456, 12-29.
- Yan, Y., Lu, R., & Li, C. (2019). Relationship between the future projections of Sahel rainfall and the simulation biases of present South Asian and Western North Pacific rainfall in summer. *Journal of Climate*, 32(4), 1327-1343.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Kosshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., & Ishii, M. (2019). The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2. 0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 97(5), 931-965.
- Zazulie, N., Rusticucci, M., & Raga, G. B. (2018). Regional climate of the Subtropical Central Andes using high-resolution CMIP5 models. Part II: future projections for the twenty-first century. *Climate dynamics*, 51, 2913-2925.
- Ziehn, T., Chamberlain, M. A., Law, R. M., Lenton, A., Bodman, R. W., Dix, M., & Srbinovsky, J. (2020). The Australian earth system model: ACCESS-ESM1. 5. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 70(1), 193-214.