



Assessing CMIP6 models for temperature and precipitation projections in the Mashhad Plain under SSP scenarios

Mahnaz Mazrooei¹ | Ghodratollah Mohammadi¹ | Hossein Hassanpour Darvishi² |
Hamidreza Rabieifar¹

1. Department of Civil Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Water Resources Management, ShQ.C., Islamic Azad University, Shahr-e Qods, Iran.

✉Corresponding Author: hhassanpour@iau.ac.ir

Received:
12 July 2026

Revised:
07 August 2026

Accepted:
21 August 2026

Keywords:

CMIP6; MPI-ESM1-2-HR;
Mashhad Plain; SSP2-4.5;
SSP5-8.5; CMhyd; delta
change factor; climate
projection.

Extended abstract

Introduction

Climate change is expected to alter temperature and precipitation patterns, with important consequences for water resources, agriculture, urban infrastructure, and climate-related hazards. These effects are particularly important in arid and semi-arid regions such as northeastern Iran, where water availability is limited, and large urban centers may face both drought and flooding. The Mashhad Plain in Razavi Khorasan Province includes the metropolitan area of Mashhad, extensive agricultural lands, and mountainous terrain with considerable climatic variability. The coarse spatial resolution and biases of global climate models limit their direct use at local scales, making model evaluation, bias correction, and downscaling necessary. The objective of this study was to evaluate selected Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) models for annual temperature and precipitation over the Mashhad Plain, identify the best-performing model, and project future changes under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 through the end of the twenty-first century.

Cite this article: Mazrooei, M., Mohammadi, G., Hassanpour Darvishi, H. & Rabieifar, H. (2026). Providing a semi-analytical solution to the Henry Problem and the effect of bed slope on seawater intrusion into confined coastal aquifers. *Journal of Aquifer and Qanat*, 7 (1), 173-200. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2026.11675.1151>.



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee: Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Materials and Methods

Daily observed precipitation and mean temperature data from the Mashhad and Golmakan synoptic stations were used for the 1990–2014 reference period. Daily outputs from seven CMIP6 global climate models—MPI-ESM1-2-HR, CanESM5, BCC-ESM1, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-CC, MRI-ESM2-0, and IPSL-CM6A-LR were evaluated. Daily precipitation was aggregated to annual totals and temperature to annual means. Model performance was quantified using root mean square error (RMSE), mean bias (BIAS), and Pearson's correlation coefficient (r). The preferred model was selected based on lower RMSE and absolute BIAS and higher correlation with observations. Its outputs were statistically downscaled and bias-corrected using CMhyd and the delta change factor method, applying a multiplicative monthly factor to precipitation and an additive factor to temperature. Projections were generated for 2026–2050, 2051–2075, and 2076–2100 under SSP2-4.5 and SSP5-8.5, and the spatial distributions of annual temperature and precipitation were analyzed across the Mashhad Plain.

Results and Discussion

Among the seven evaluated CMIP6 models, MPI-ESM1-2-HR showed the best overall performance for both precipitation and temperature according to the selected statistical criteria. For annual precipitation, the correlation coefficients at the Mashhad and Golmakan stations were 0.78 and 0.77, respectively; the corresponding RMSE values were 12.46 and 10.34 mm, and the BIAS values were 9.34 and 8.87 mm. For annual mean temperature, the correlation coefficients were 0.83 at Mashhad and 0.80 at Golmakan, with RMSE values of 2.23 and 2.11°C and BIAS values of 1.01 and 1.23°C, respectively. These results indicate that MPI-ESM1-2-HR provided the most suitable representation of the observed temporal variability and mean conditions among the models and criteria examined in this study.

Table 1. Performance statistics of the selected MPI-ESM1-2-HR model during the 1990–2014 reference period.

Variable	Station	r	RMSE	BIAS
Precipitation	Mashhad	0.78	12.46 mm	9.34 mm
Precipitation	Golmakan	0.77	10.34 mm	8.87 mm
Temperature	Mashhad	0.83	2.23°C	1.01°C
Temperature	Golmakan	0.80	2.11°C	1.23°C

During the reference period, the simulated mean annual temperature varied from approximately 11.1 to 14.7°C and generally increased from the northern to the southern parts of the plain. In contrast, annual precipitation generally decreased from north to south and ranged from about 189 to 250 mm. Future projections indicated persistent warming under both SSP pathways, while differences between the scenarios became increasingly pronounced after the middle of the century. Under SSP2-4.5, projected mean annual temperature ranged from approximately 12.4–16.1°C in 2026–2050, 13.3–17.0°C in 2051–2075, and 14.0–17.7°C in 2076–2100. Under SSP5-8.5, the corresponding ranges were about 12.9–16.6°C, 14.5–18.0°C, and 16.6–20.3°C. Relative to the reference climate, warming in the far future was approximately 3°C under SSP2-4.5 and reached about 5.6°C in some parts of the plain under SSP5-8.5. The spatial projections under the high-emission pathway clearly show progressively stronger warming toward the end of the century, particularly in the southern parts of the Mashhad Plain (Fig 1).

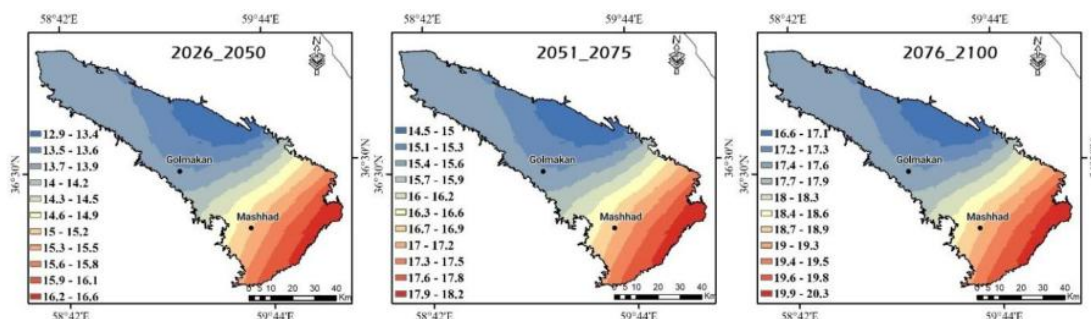


Fig 1. Spatial distribution of mean annual temperature in the Mashhad Plain for 2026–2050, 2051–2075, and 2076–2100 based on MPI-ESM1-2-HR under the SSP5-8.5 scenario (unit: °C).

Projected annual precipitation also showed an overall increase, although its spatial variability and uncertainty were greater than those of temperature. In the near future, the maximum projected annual precipitation

reached approximately 268 mm under SSP2-4.5 and 272 mm under SSP5-8.5. By 2076–2100, annual precipitation was projected to increase by about 4.4% under SSP2-4.5 and 8.8% under SSP5-8.5 relative to the historical period. The largest increases were concentrated mainly in the northern and western parts of the plain, whereas central areas showed limited change or slight decreases. Because the precipitation projections were derived from the selected MPI-ESM1-2-HR model, they should be interpreted as model-based projections rather than certain future outcomes. The combination of greater precipitation in mountainous sectors, rising temperatures, and potentially earlier snowmelt may increase runoff generation and the potential for flash flooding; however, annual precipitation alone is insufficient for a definitive assessment of future flood frequency or magnitude.

Conclusion

The findings demonstrate persistent warming in the Mashhad Plain throughout the twenty-first century, with substantially stronger warming under SSP5-8.5, particularly toward the end of the century. Projected annual precipitation increases are spatially heterogeneous and more uncertain, with the largest changes in the northern and western highlands. Increased precipitation should not necessarily be interpreted as reduced water stress, because higher temperature and evaporative demand, altered snowmelt timing, continued drought risk, and more concentrated rainfall may offset part of the additional water. The combined changes may intensify both water scarcity and flood-related hazards. The results emphasize integrated water resources management, groundwater protection, improved urban drainage, monitoring of heavy precipitation, and climate-resilient adaptation planning. Future research should incorporate multi-model ensembles, additional stations, extreme precipitation indices, and rainfall–runoff modeling to better quantify climatic and hydrological uncertainties.



بررسی عملکرد مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش برای دشت مشهد و پیش‌نگری تغییرات آن‌ها تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن حاضر

مهناز مزروعی^۱ | قدرت‌الله محمدی^۱ | حسین حسن‌پور درویشی^۲ | حمیدرضا ربیعی‌فر^۱

۱. گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. گروه مدیریت منابع آب، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرقدس، ایران.

✉ نویسنده مسئول: hhassanpour@iau.ac.ir

چکیده

ارزیابی تغییرات آینده دما و بارش در مقیاس محلی، برای برنامه‌ریزی منابع آب و سازگاری با تغییر اقلیم ضروری است. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) و پیش‌نگری دما و بارش دشت مشهد انجام شد. داده‌های روزانه مشاهده‌ای ایستگاه‌های همدید مشهد و گل‌مکان و خروجی هفت مدل گردش عمومی جو در دوره مرجع ۱۹۹۰-۲۰۱۴ بررسی شد. پس از تجمیع سالانه، مدل‌ها با جذر میانگین مربعات خطا، اریبی میانگین و ضریب همبستگی پیرسون ارزیابی و مدل برتر بر پایه کمترین خطا و اریبی و بیشترین همبستگی انتخاب شد. خروجی مدل منتخب با نرم‌افزار CMhyd و روش تغییر عامل دلتا، تحت مسیرهای «راه میانی» (SSP2-4.5) و «توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی» (SSP5-8.5) برای دوره‌های ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ ریزمقیاس‌نمایی شد. مدل MPI-ESM1-2-HR بهترین عملکرد کلی را داشت؛ در مشهد و گل‌مکان، همبستگی بارش به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۷۷، خطا ۱۲/۴۶ و ۱۰/۳۴ میلی‌متر و اریبی ۹/۳۴ و ۸/۸۷ میلی‌متر بود. برای دما، همبستگی ۰/۸۳ و ۰/۸۰، خطا ۲/۲۳ و ۲/۱۱ و اریبی ۱/۰۱ و ۱/۲۳ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. در دوره دور، دما تحت SSP2-4.5 حدود ۳ درجه و تحت SSP5-8.5 در برخی بخش‌ها تا ۵/۶ درجه سلسیوس افزایش یافت. بارش سالانه نیز به ترتیب ۴/۴ و ۸/۸ درصد افزایش نشان داد و بیشترین تغییرات در شمال و غرب دشت مشاهده شد. این یافته‌ها بیانگر تشدید گرمایش و تغییر الگوی بارش است و ضرورت تقویت برنامه‌های سازگاری و مدیریت یکپارچه منابع آب را نشان می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۹

کلیدواژه‌ها:

MPI-ESM1-2-HR

CMhyd، تغییر عامل دلتا،

اریبی میانگین، پیش‌نگری

اقلیمی.

مقدمه

شواهد جدید نشان می‌دهد که روند گرمایش جهانی و پیامدهای ناشی از آن همچنان در حال تشدید است. بر اساس گزارش «وضعیت اقلیم جهانی ۲۰۲۵» سازمان جهانی هواشناسی، سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ گرم‌ترین یازده سال ثبت‌شده در تاریخ مشاهدات اقلیمی بوده‌اند و میانگین دمای جهانی در سال ۲۰۲۵ حدود ۱/۴۳ درجه سلسیوس بیشتر از میانگین دوره پیشاصنعتی ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ بوده است. افزایش دمای جهانی با تشدید موج‌های گرما، بارش‌های سنگین، خشکسالی‌ها و سایر رخداد‌های حدی همراه بوده و آسیب‌پذیری منابع آب، کشاورزی، زیرساخت‌ها و جوامع انسانی را افزایش داده است (WMO, 2026). از این‌رو، بررسی تغییرات دما و بارش در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی برای تدوین راهبردهای سازگاری و کاهش خطرات اقلیمی اهمیت فزاینده‌ای یافته است.

پیشرفت انسان در سال‌های اخیر شتاب قابل توجهی گرفته است که منجر به تغییرات قابل توجه در پوشش زمین و اقلیم شده است (Akbar & Gheewala, 2020). تغییرات اقلیمی و کاربری زمین (LULC) می‌توانند بر بسیاری از جنبه‌های مختلف مانند بهره‌وری محصولات کشاورزی، تولید برق آبی و چرخه هیدرولوژی تأثیرات منفی زیادی داشته باشند (Yesuph & Dagnew, 2019).

هیئت بین دولتی تغییرات اقلیم (IPCC) گزارش داده است که انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) ناشی از اقدامات انسان به سطح بی‌سابقه‌ای افزایش یافته است که باعث تغییر اقلیم در سطح جهانی شده است (Zhang et al., 2015).

دمای زمین بین سال‌های ۱۸۸۰ و ۲۰۱۲ به میزان ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است و این افزایش با تغییرات در الگوهای بارش همراه بوده است. این تغییرات در بارش و دما نتیجه افزایش غلظت GHG است. تغییرات در

دما و بارش تأثیر مستقیم بر کمیت، کیفیت و سرعت جریان اوج رودخانه دارد که به نوع خود مشکلات عدیده‌ای را می‌تواند به همراه داشته باشد (Nagra et al., 2022).

همان‌طور که گفته شد فعالیت‌های انسانی باعث افزایش مداوم انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود که نگرانی‌ها را در مورد تشدید گرمایش جهانی در سراسر جهان افزایش داده است.

بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بخصوص در سطح منطقه‌ای همانند حوضه‌های آبریز و دشت‌ها برای توسعه رویکردهای مؤثر همانند سازگاری و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. برای رسیدگی به این موضوع، از مدل‌های گردش کلی (GCMs) برای پیش‌نگری تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای مختلف گازهای گلخانه‌ای و فعالیت اقتصادی استفاده می‌شود (Try et al., 2022).

فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6) جدیدترین نسل GCMs هستند که با ترکیب سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) با سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSPs)، پیش‌نگری‌های اقلیمی جامع‌تر و متنوع‌تری را ارائه می‌دهند.

CMIP6 تفکیک فضایی و زمانی بهبودیافته‌ای را ارائه می‌دهد که امکان ارزیابی جامع‌تر تغییرات اقلیمی منطقه‌ای را فراهم می‌کند. به‌طور کلی مدل‌های CMIP6 از نظر دقت و کیفیت، نسبت به نسل قبلی خود، یعنی CMIP5، پیشرفت چشمگیری داشته‌اند (Chen et al., 2020).

با وجود بهبود ساختار فیزیکی، تفکیک مکانی و تنوع سناریوهای مدل‌های CMIP6، استفاده مستقیم از برون‌داد این مدل‌ها در مطالعات محلی همچنان با محدودیت‌هایی همراه است. تفکیک مکانی نسبتاً درشت مدل‌های گردش عمومی نمی‌تواند فرایندهای محلی ناشی از ناهموازی‌ها،

منطقه پرداخت. همچنین، این مطالعات به برنامه‌ریزی بهتر برای سازگاری با تغییرات اقلیمی و کاهش آسیب‌پذیری دشت مشهد کمک خواهد کرد. با توجه به اهمیت این موضوع، انجام مطالعات جامع و مداوم در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

مطالعات زیادی به بررسی تغییرات دما و بارش مدل‌های CMIP6 پرداختند. در ادامه به برخی از این منابع پرداخته خواهد شد.

Almazroui et al. در سال ۲۰۲۰ با استفاده از مدل‌های CMIP6، تغییرات قابل توجهی در دما و بارش جنوب آسیا را در قرن بیست و یکم پیش‌بینی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دمای میانگین سالانه و بارش در این منطقه به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت و این تغییرات شدیدترین تأثیرات خود را بر مناطق کوهستانی مانند قراقرم و هیمالیا خواهد گذاشت.

Dong and Dong در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی شاخص‌های بارش حدی در آسیا پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل‌های CMIP5 و CMIP6 به‌طور کلی قادر به تولید توزیع فضایی بارش حدی و الگوهای روند آن‌ها در مقایسه با مجموعه داده مرجع (APHRODITE) هستند.

ارزیابی مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش جهانی تحقیقی است که توسط Li et al. در سال ۲۰۲۲ انجام شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که توانایی شبیه‌سازی مدل‌های جهانی اقلیم (GCMs) در CMIP6 در سراسر جهان بسیار متفاوت است. این تغییرپذیری به دو دلیل تغییرپذیری فضایی هر مدل در مناطق جغرافیایی و مناطق آب‌وهوایی مختلف جهان و تفاوت قابل توجه در توانایی شبیه‌سازی مدل‌های مختلف در هر منطقه است.

تغییرات کاربری زمین، توسعه شهری و ناهمگنی‌های سطح زمین را به‌طور کامل بازنمایی کند.

Khosravi & Ouarda در سال ۲۰۲۵، با ترکیب برون‌داد مدل‌های CMIP6 و روش‌های یادگیری ماشین در خاورمیانه نشان دادند که استفاده از مدل‌های تجمعی و ریزمقیاس‌نمایی داده‌محور می‌تواند دقت پیش‌نگری دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش را در مقایسه با استفاده مستقیم از برون‌داد مدل‌های اقلیمی افزایش دهد. همچنین، Dariane et al. در سال ۲۰۲۶، با ارزیابی ۴۷ مدل CMIP6 در ایران نشان دادند که عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش یکسان نیست و انتخاب مدل مناسب، تصحیح اریبی و ریزمقیاس‌نمایی برای دستیابی به پیش‌نگری‌های منطقه‌ای قابل‌اعتماد ضروری است.

بارش و دما نقش اساسی در افزایش وقوع سیل و خشکسالی در شمال شرقی ایران و به‌ویژه دشت مشهد دارند. بارش بیش از حد می‌تواند منجر به سیل شود؛ زیرا خاک را اشباع می‌کند و الگوهای زهکشی طبیعی را مختل می‌کند. دوره‌های طولانی گرمای شدید نیز می‌تواند منجر به مشکلات خشکسالی شود و کمبود آب را تشدید کند؛ لذا بررسی ویژگی‌های دما و بارش این منطقه از اهمیت شایان توجهی برخوردار است.

مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر دشت مشهد از اهمیت بالایی برخوردار است. این منطقه به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی و صنعتی ایران، به شدت تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوایی قرار دارد. بررسی دقیق دما و بارش در این منطقه، به‌عنوان دو عامل اصلی اقلیمی، می‌تواند به ما در درک بهتر روند تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی پیامدهای آن کمک کند.

با بررسی دقیق این داده‌ها می‌توان به ارزیابی دقیق‌تر اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبی، کشاورزی، محیط زیست و اقتصاد

از تغییرپذیری این خطاها در برآورد دما بود. در مقیاس سالانه نیز نتایج نشان دادند که مدل IPSL-CM6A-LR بهترین عملکرد را در برآورد دما و مدل HadGEM3-LL بهترین عملکرد را در برآورد بارش سالانه دارا بودند.

Afsharinia et al. در سال ۲۰۲۴، به ارزیابی تغییرات اقلیمی با استفاده از برون داد مدل های CMIP6 در دشت کاشان پرداختند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که در همه ایستگاه های مورد مطالعه بارش در دوره آتی در مقایسه با دوره پایه دارای روند کاهشی خواهد بود. دمای متوسط نیز در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت.

Rezaei et al. در سال ۲۰۲۴، به ارزیابی عملکرد مدل های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در ایران پرداختند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که در منطقه مورد مطالعه دما بین ۱/۱ تا ۲/۱ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد که بیشترین تغییرات آن مربوط به مناطق شرقی و سپس جنوبی و مرکزی کشور است. بارش نیز در منطقه مورد مطالعه بین ۱۲ تا ۲۸ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. پژوهش های منتشر شده در سال های ۲۰۲۵ و ۲۰۲۶ نیز بر ناهمگنی مکانی پاسخ اقلیم ایران به گرمایش جهانی تأکید دارند.

Vahdatifar et al. در سال ۲۰۲۵، با استفاده از پنج مدل گردش عمومی و سناریوهای SSP1-2/6 و SSP5-8/5، تغییرات آینده دما و بارش در شرق و غرب استان مازندران را بررسی کردند و نشان دادند که شدت و جهت تغییرات بارش و دما می تواند در مناطق مختلف و دوره های زمانی متفاوت باشد.

Naderi et al. نیز در سال ۲۰۲۶، عملکرد ۲۲ مدل CMIP6 را در بازنمایی دما و بارش ایران ارزیابی کردند. نتایج آنان نشان داد که دما در همه استان های ایران افزایش خواهد

Bobde et al. در سال ۲۰۲۴، تغییرات پیش‌نگری شده بارش در آفریقا تحت گرمایش جهانی آینده با مدل های CMIP6 شبیه سازی کردند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که نسل جدید مدل های اقلیمی CMIP6 بارش در غرب، مرکز و شرق آفریقا را به شکل قابل قبولی برآورد می کنند. همچنین آن ها نشان دادند که افزایش خطر بارش سالانه شدید و روزهایی با بارش سنگین تر در منطقه در حال افزایش است.

Salazar et al. در سال ۲۰۲۴ به ارزیابی مدل های CMIP6 در شبیه سازی بارش و دما در شیلی پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که شمال شیلی و جنوب پاتاگونی تغییرات زیادی در را در کل مدل ها نشان می دهند. با این حال، دما افزایش سراسری را در منطقه تجربه خواهد کرد. بزرگترین افزایش دماها نیز در امتداد کوه های آند رخ داد.

در ایران نیز پژوهش مختلفی به بررسی کارایی مدل های CMIP6 پرداختند. Abdolalizadeh et al. در سال ۲۰۲۲ به ارزیابی دقت مدل های CMIP6 برای شبیه سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که برای کل حوضه بین داده های تصحیح شده مدل ها و مشاهدات ایستگاهی برای دما رابطه خطی با قوی و برای بارش رابطه خطی ضعیف برقرار است. شاخص های RMSE و NRMSE بیانگر دقت بالای مدل ها در شبیه سازی دمای ماهانه و دقت نسبتاً ضعیف تر در شبیه سازی بارش ماهانه حوضه هستند و در بین مدل ها، CMCC بیشترین خطا را داشت.

Zareian et al. در سال ۲۰۲۳، به ارزیابی دقت مدل های CMIP6 در برآورد دما و بارش ایران پرداختند. نتایج پژوهش آن ها نشان داد که مدل های مختلف در ماه های متفاوت سال، دقت یکسانی در برآورد دما و بارش کشور دارا نیستند. تغییرپذیری خطای مدل ها در برآورد بارش، بیش تر

استراتژی‌هایی برای کاهش سیل‌های شدید شهری در این منطقه دارد. با این حال، هنوز اطلاعات دقیقی در مورد پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در این منطقه وجود ندارد؛ بنابراین، نیاز به تحقیق جامع متمرکز بر دشت مشهد با استفاده از آخرین مدل‌های CMIP6 وجود دارد. از این رو، این مطالعه قصد دارد مدل‌های CMIP6 را در دشت مشهد ارزیابی کند و تأثیر تغییرات اقلیمی بر بارش و دما را در این منطقه را بررسی کند. یافته‌های جدید همچنین ضرورت بررسی هم‌زمان مخاطرات اقلیمی در مناطق شهری و پرجمعیت ایران را نشان می‌دهند.

Asadi-RahimBeygi et al. در سال ۲۰۲۵، با استفاده از داده‌های ۷۰ ایستگاه سینوپتیک و برون‌داد مدل‌های پروژه پیش‌بینی دهه‌ای CMIP6، مخاطرات مرکب مرتبط با دما، بارش، موج‌های گرما، خشکسالی و بارش‌های سنگین را در ایران بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که بخش‌های گسترده‌ای از ایران، از جمله برخی نواحی شرقی کشور، در معرض سطوح زیاد تا بسیار زیاد مخاطرات اقلیمی مرکب قرار دارند.

از سوی دیگر، Mohammadi and Mostafazadeh. در سال ۲۰۲۶، با مرور ۹۲ مطالعه درباره مخاطرات اقلیمی در شهرهای ایران نشان دادند که گرمایش جهانی، توسعه شهری، افزایش سطوح نفوذناپذیر و تغییر رژیم بارش می‌توانند احتمال وقوع مخاطرات مرکب و جابه‌جایی سریع میان شرایط خشکسالی و سیلابی را افزایش دهند. آنان بر ضرورت انجام ارزیابی‌های محلی، یکپارچه و چندمخاطره‌ای در شهرهای بزرگ ایران تأکید کردند.

با توجه به جمعیت زیاد شهر مشهد، گسترش سریع محدوده‌های شهری، افزایش سطوح نفوذناپذیر و قرارگیری این شهر در یک محیط خشک و نیمه‌خشک، تغییر در

یافت، اما مقدار افزایش دارای تغییرات فصلی و مکانی قابل توجهی است. در مورد بارش نیز نتایج بیانگر افزایش تضادهای مکانی و احتمال تشدید شرایط خشک در مناطق کم‌بارش و افزایش بارش در برخی مناطق مرطوب‌تر است. این نتایج نشان می‌دهد که تعمیم یافته‌های مطالعات ملی به مناطق محلی، بدون ارزیابی اختصاصی مدل‌ها، می‌تواند با عدم قطعیت زیادی همراه باشد.

در زمینه بهبود پیش‌نگری بارش نیز Ettehadi et al. در سال ۲۰۲۶، با استفاده از مجموعه چندمدلی CMIP6 و روش تصحیح ارببی مبتنی بر یادگیری عمیق نشان دادند که روش‌های نوین داده‌محور می‌توانند بازنمایی تغییرپذیری مکانی و فصلی بارش را بهبود دهند.

همچنین، Almasi et al. در سال ۲۰۲۶، با به‌کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین برای ریزمقیاس‌نمایی بارش در کرمانشاه نشان دادند که انتخاب مدل اقلیمی و روش ریزمقیاس‌نمایی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نتایج پیش‌نگری داشته باشد؛ بنابراین، ارزیابی چندمدلی، تصحیح ارببی و استفاده از روش‌های مناسب ریزمقیاس‌نمایی باید از مؤلفه‌های اساسی مطالعات تغییر اقلیم در مقیاس دشت‌ها و حوضه‌های آبریز ایران باشد.

بررسی مرور منابع نشان داده است که تحقیقات زیادی در سطح و جهانی و ایران بر روی عملکرد مدل‌های CMIP6 انجام شده است. با این حال، این مطالعات از تفکیک پایین اولیه GCMs استفاده کردند که درک ویژگی‌های اقلیمی دما و بارش مناطق کوچک همانند دشت مشهد را دشوار می‌سازد. علاوه بر این، با داشتن بسیاری از شهرهای گسترده و پرجمعیت مانند مشهد، دشت مشهد با آسیب‌پذیری بالایی نسبت به پیامدهای سیل شهری روبرو است. مطالعات قبلی به این موضوع پرداخته‌اند که مشهد توسعه سریعی داشته است که این شهر را مستعد سیل شهری کرده است و نیاز به

پایه، انتخاب مدل‌ها یا مجموعه چندمدلی مناسب، تصحیح اریبی و پیش‌نگری تغییرات آینده این متغیرها تحت سناریوهای مختلف SSP در دشت مشهد انجام می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی علمی برای مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی، کاهش خطر سیلاب شهری و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم در منطقه فراهم کند.

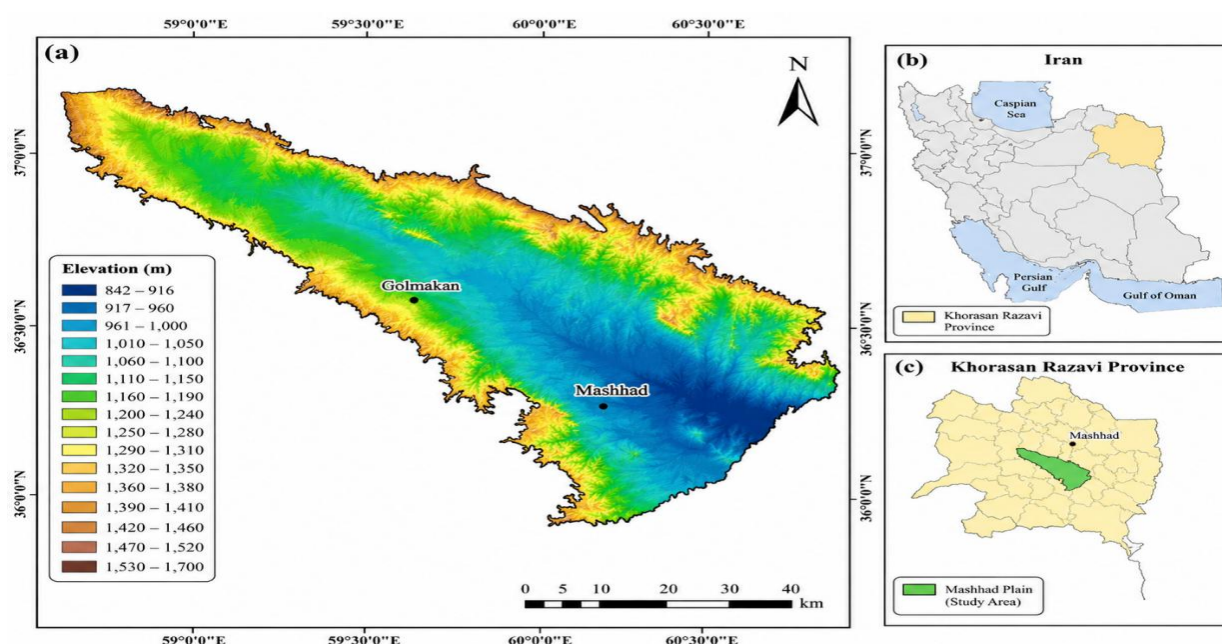
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت مشهد در شمال شرق ایران و در استان خراسان رضوی، در محدوده حوضه آبریز کشف‌رود و در مجاورت ارتفاعات بینالود و هزارمسجد واقع شده است (شکل ۱).

مقدار، شدت و توزیع زمانی بارش می‌تواند خطر رواناب و سیلاب شهری را افزایش دهد. در مقابل، افزایش دما و کاهش بارش مؤثر می‌تواند تبخیر و تعرق، کمبود آب و شدت خشکسالی را تشدید کند. با وجود این، بخش عمده مطالعات گذشته در ایران در مقیاس ملی، استانی یا حوضه‌های بزرگ انجام شده‌اند و تعداد مطالعاتی که عملکرد مجموعه گسترده‌ای از مدل‌های CMIP6 را به‌صورت اختصاصی برای دشت مشهد ارزیابی کرده باشند، محدود است. در نتیجه، عدم قطعیت مدل‌ها، توانایی متفاوت آن‌ها در بازنمایی بارش و دما و ضرورت ریزمقیاس‌نمایی متناسب با ویژگی‌های محلی دشت مشهد همچنان از خلأهای پژوهشی مهم محسوب می‌شوند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد مدل‌های منتخب CMIP6 در شبیه‌سازی دما و بارش دوره



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه مدل رقومی ارتفاعی دشت مشهد (واحد: متر)

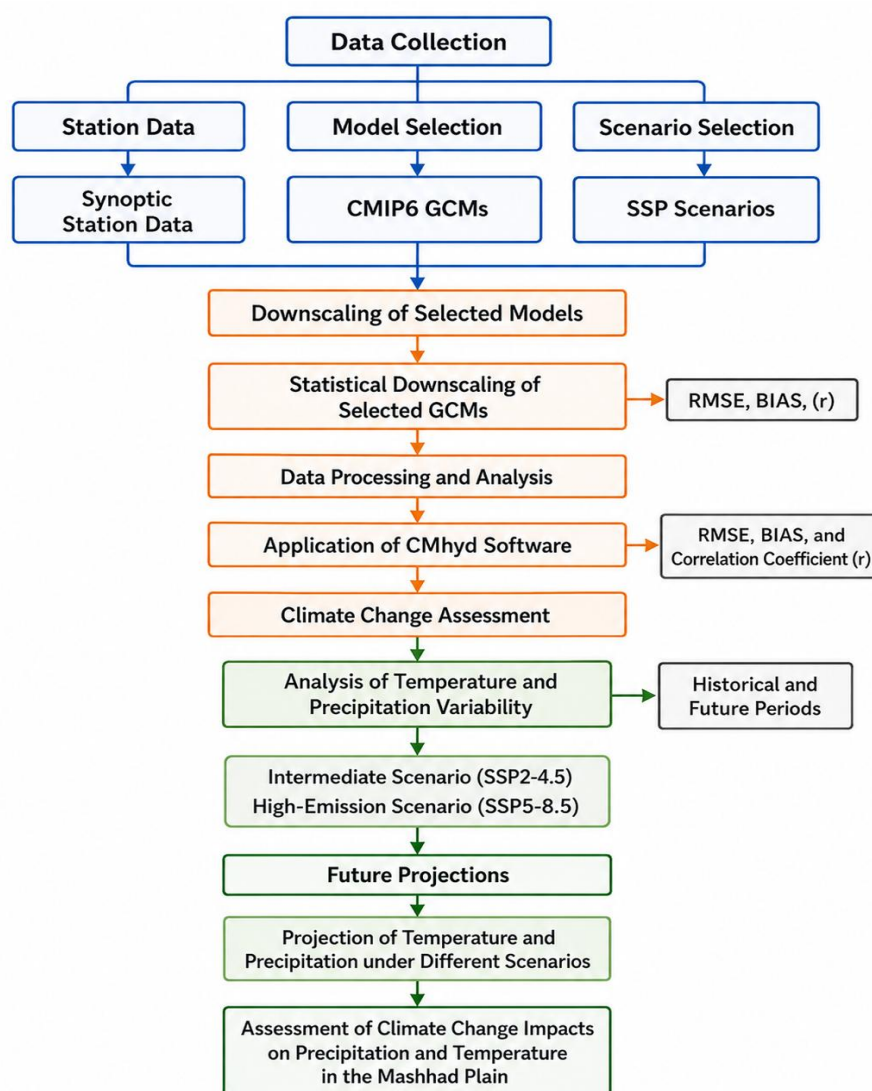
Fig 1. Location of the study area and the Digital Elevation Model (DEM) of the Mashhad Plain (unit: m).

سطحی شکل‌گرفته در ارتفاعات عمدتاً به رودخانه کشف‌رود تخلیه می‌شوند. بخش‌های هموار دشت، به‌دلیل برخورداری

ناهمواری‌های حوضه از مناطق کوهستانی پیرامونی به‌سمت بخش‌های کم‌ارتفاع دشت کاهش می‌یابد و جریان‌های

مکانی ویژگی‌های تغذیه و جریان آب زیرزمینی در دشت شده است. در محدوده بررسی شده، ارتفاع زمین بر اساس مدل رقومی ارتفاع مورد استفاده در این پژوهش از حدود ۸۳۳ تا ۱۷۰۰ متر متغیر است که بیانگر تنوع توپوگرافی منطقه است (Alem et al., 2021; Panahi et al., 2023; Zarei et al., 2024). فرایند اجرایی این تحقیق در فلوچارت ارائه شده در شکل ۲ ارائه شده است و در ادامه هر یک از بخش‌های این فلوچارت بررسی خواهد شد.

از شرایط مناسب‌تر برای استقرار فعالیت‌های انسانی، محل تمرکز اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌های شهری، به‌ویژه کلان‌شهر مشهد، هستند. منطقه از نظر اقلیمی عمدتاً در محدوده اقلیم خشک تا نیمه‌خشک سرد قرار دارد و با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سردتر و نسبتاً مرطوب مشخص می‌شود. همچنین، تنوع واحدهای زمین‌شناسی، رسوبات آبرفتی و ساختارهای زمین‌ساختی موجب پیچیدگی شرایط هیدروژئولوژیکی و تغییرپذیری



شکل ۲. فلوچارت اجرایی تحقیق برای بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر بارش و دمای دشت مشهد

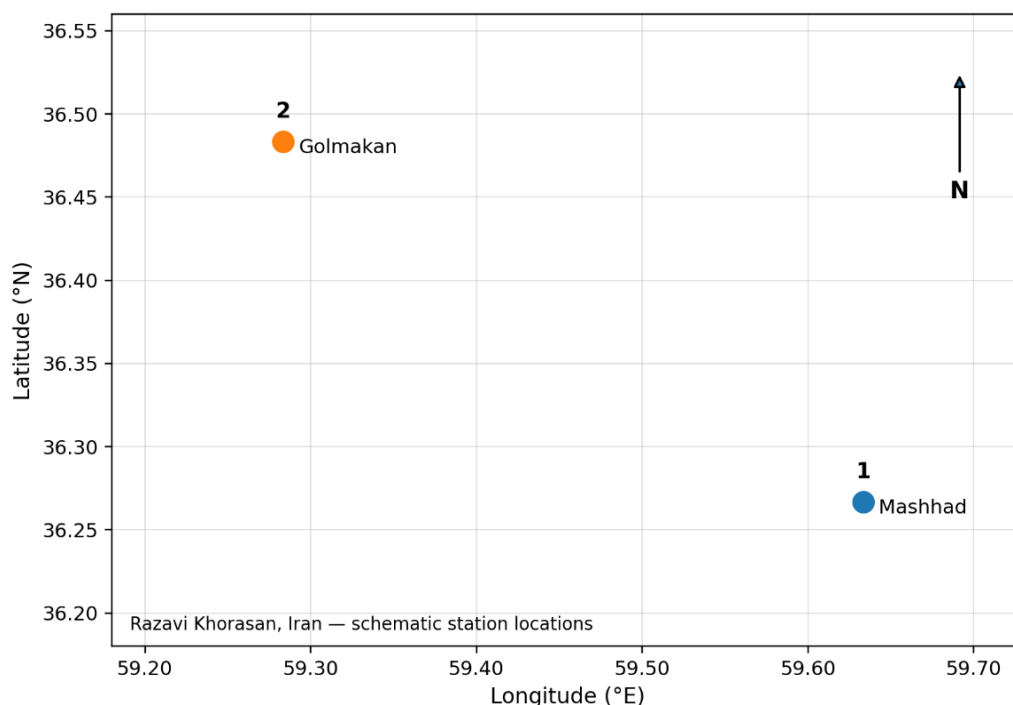
Fig 2. Flowchart of the research methodology for assessing the impacts of climate change on precipitation and temperature in the Mashhad Plain.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های ایستگاهی هواشناسی سینوپتیک

در این پژوهش، داده‌های مشاهده‌ای روزانه بارش و دمای میانگین ایستگاه‌های هواشناسی همدید (سینوپتیک) مشهد و گل‌مکان برای دوره مرجع ۱۹۹۰-۲۰۱۴ از اداره کل هواشناسی خراسان رضوی تهیه شد. ایستگاه مشهد در طول جغرافیایی ۵۹/۶۳ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۶/۲۳ درجه شمالی و ارتفاع ۹۹۹ متر از سطح دریا قرار دارد. همچنین، ایستگاه گل‌مکان در طول جغرافیایی ۵۹/۲۸ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۶/۴۸ درجه شمالی و ارتفاع ۱۱۷۶ متر از سطح دریا واقع شده است. داده‌های این ایستگاه‌ها دارای تفکیک زمانی روزانه و ماهیت مکانی نقطه‌ای هستند. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۳ و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌های مشاهده‌ای پس

از کنترل کیفیت، بررسی مقادیر مفقود و اطمینان از پیوستگی دوره آماری، برای ارزیابی عملکرد و تصحیح اریبی خروجی مدل‌های اقلیمی مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها در مقیاس سالانه، مقادیر روزانه بارش برای هر سال با یکدیگر جمع و مجموع بارش سالانه محاسبه شد. همچنین، میانگین مقادیر روزانه دما برای هر سال به‌عنوان دمای میانگین سالانه در نظر گرفته شد. سپس شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، اریبی میانگین (BIAS) و ضریب همبستگی پیرسون بر اساس سری‌های زمانی سالانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده محاسبه شدند؛ بنابراین، داده‌های اولیه دارای تفکیک زمانی روزانه بودند، اما ارزیابی عملکرد مدل‌ها در مقیاس زمانی سالانه انجام شد.



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مشهد و گل‌مکان در دشت مشهد (نمایش شماتیک براساس مختصات ایستگاه‌ها)

راهنما: ۱- ایستگاه مشهد و ۲- ایستگاه گل‌مکان

Fig 3. Geographic locations of the Mashhad and Golmakan synoptic stations in the Mashhad Plain (schematic representation based on station coordinates).

Legend: 1-Mashhad Station and 2-Golmakan Station.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در پژوهش
 Table 1. Characteristics of the meteorological stations used in the study

ردیف	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	دوره آماری	مقیاس زمانی	متغیرهای مورد استفاده	منبع داده
No.	Station Name	Station Type	Longitude	Latitude	Elevation (m a.s.l.)	Statistical Period	Temporal Resolution	Variables Used	Data Source
1	مشهد Mashhad	همدید (سینوپتیک)	59.63° E	36.27° N	999	1990–2014	روزانه Daily	بارش و دمای میانگین Precipitation and Mean Temperature	اداره کل هواشناسی خراسان رضوی Khorasan Razavi Meteorological Department
2	گلمکان Golmakan	همدید (سینوپتیک)	59.28° E	36.48° N	1176	1990–2014	روزانه Daily	بارش و دمای میانگین Precipitation and Mean Temperature	اداره کل هواشناسی خراسان رضوی Khorasan Razavi Meteorological Department

مدل‌های CMIP6 مورد بررسی

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش از خروجی فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6)، وابسته به برنامه جهانی پژوهش اقلیم (WCRP)، دریافت شد. داده‌های روزانه نخستین اجرای اعضای مجموعه با شناسه r1i1p1f1 برای متغیرهای دما و بارش از طریق شبکه فدراسیون سامانه زمین (ESGF) استخراج شدند. در این پژوهش، هفت مدل گردش عمومی جو شامل MPI-CNRM-ESM1-2-HR، BCC-ESM1، CanESM5، ESM2-1، EC-Earth3-CC، MRI-ESM2-0 و IPSL-CM6A-LR بررسی شدند. انتخاب این مدل‌ها بر پایه دسترسی کامل به داده‌های روزانه متغیرهای مورد نیاز، پوشش دوره زمانی پژوهش، تنوع مراکز توسعه‌دهنده، تفاوت در ساختار و تفکیک مکانی مدل‌ها و کاربرد آن‌ها در پژوهش‌های اقلیمی پیشین انجام شد. استفاده از مدل‌های متعلق به مؤسسات مختلف، امکان بررسی دامنه‌ای از ساختارهای شبیه‌سازی و کاهش وابستگی نتایج به خروجی یک مرکز یا یک مدل منفرد را فراهم می‌کند. عملکرد مدل‌ها در بازتولید دما و بارش دوره مرجع ارزیابی شد و سپس مدل دارای کمترین خطا و

ارایی و بیشترین همبستگی با داده‌های مشاهده‌ای برای ریزمقیاس‌نمایی و پیش‌نگری اقلیمی انتخاب شد. سناریوی انتشار پایین SSP1 در این پژوهش بررسی نشد؛ زیرا تحقق آن مستلزم کاهش سریع و گسترده انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه فناوری‌های کم‌کربن و تغییرات اساسی در الگوی مصرف انرژی است و با روند کنونی توسعه صنعتی و مصرف سوخت‌های فسیلی در منطقه مطالعه انطباق کمتری دارد. از این‌رو، دو سناریوی SSP2-4.5، به‌عنوان مسیر میانی، و SSP5-8.5، به‌عنوان مسیر انتشار زیاد، برای نمایش شرایط حد واسط و بدبینانه انتخاب شدند. دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴ به‌عنوان دوره مرجع پژوهش در نظر گرفته شد؛ زیرا این بازه، دوره مشترک و پیوسته میان داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه‌های مشهد و گلمکان و شبیه‌سازی‌های تاریخی مدل‌های CMIP6 بود. بنابراین، این بازه «دوره پایه ذاتی مدل‌ها» محسوب نمی‌شود، بلکه برای ایجاد انطباق زمانی میان داده‌های مشاهده‌ای و مدل‌سازی و انجام ارزیابی همگن انتخاب شده است. پیش‌نگری‌ها نیز برای دوره‌های آینده نزدیک ۲۰۲۶-۲۰۵۰، آینده میانی ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و آینده دور ۲۰۷۶-۲۱۰۰ انجام شد.

بررسی عملکرد مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش در دشت مشهد

عملکرد مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما و بارش با استفاده از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، اریبی میانگین (BIAS) و ضریب همبستگی پیرسون (r) ارزیابی شد.

این شاخص‌ها به منظور بررسی جنبه‌های مکمل عملکرد مدل‌ها انتخاب شدند؛ به‌طوری‌که RMSE میزان کلی اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد و به خطاهای بزرگ‌تر حساس است، BIAS جهت و مقدار خطای نظام‌مند مدل را مشخص می‌کند و مقادیر مثبت و منفی آن به ترتیب بیش‌برآورد و کم‌برآورد مدل هستند و ضریب همبستگی پیرسون توانایی مدل را در بازتولید الگوی تغییرات زمانی داده‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد؛ بنابراین، استفاده هم‌زمان از این سه

شاخص امکان ارزیابی مقدار خطا، جهت اریبی و میزان تطابق تغییرات زمانی شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات را فراهم می‌کند. اگرچه شاخص‌هایی مانند کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) نیز برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها قابل استفاده‌اند، این شاخص‌ها ترکیبی از برخی مؤلفه‌های خطا، همبستگی و تغییرپذیری را ارائه می‌کنند؛ درحالی‌که هدف پژوهش حاضر، مقایسه مستقیم و تفسیرپذیر مدل‌های اقلیمی بر اساس مقدار خطا، جهت اریبی و همبستگی زمانی بود. ازاین‌رو، برای جلوگیری از افزونگی شاخص‌ها و متناسب با هدف پژوهش، از RMSE، BIAS و r استفاده شد.

نتایج ارزیابی مدل‌ها در جدول ۳ ارائه شده و سپس پیش‌نگری‌های مکانی دما و بارش تحت سناریوهای مختلف SSP برای دوره‌های آینده دشت مشهد تهیه شد.

جدول ۲. روابط مورد استفاده برای بررسی عملکرد بارش و دمای مدل‌های CMIP6

Table 2. Statistical metrics used to evaluate the performance of CMIP6 models in simulating precipitation and temperature.

روش مورد بررسی Method under investigation	رابطه ریاضی Mathematical equation	عملکرد بهینه Optimal performance	منابع Reference
ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2}$	0	Willmott and Matsuura (2005); Chai and Draxler (2014)
اریبی (BIAS)	$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (obs_i - sim_i)$	0	Wilks (2011); Jolliffe and Stephenson (2012)
ضریب همبستگی (r)	$r = \frac{(sim_i - \overline{sim})(obs_i - \overline{obs})}{\sqrt{\sum (sim_i - \overline{sim})^2 \sum (obs_i - \overline{obs})^2}}$	1	Taylor (2001); Wilks (2011)

ریز‌مقیاس‌نمایی آماری

به‌منظور تصحیح اریبی بین پیش‌نگری‌های دما و بارش به‌دست‌آمده از مدل‌های مختلف با توجه به سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، مدل CMhyd برای تصحیح اریبی در مقیاس دشت مشهد استفاده شد.

مدل CMhyd با موفقیت در مکان‌های متعددی در سراسر جهان برای متغیرهای اقلیمی بین داده‌های مشاهداتی

در روابط بالا sim_i مقدار برآوردشده، obs_i مقدار مشاهداتی و n تعداد کل داده‌ها را نشان می‌دهد. sim'_i تفاضل داده برآوردشده و میانگین کل داده‌های sim_i در جامعه آماری است. obs'_i تفاضل داده مشاهداتی و میانگین کل داده‌های obs_i در جامعه آماری است.

$$T_{f,d,m}^{DC} = T_{b,d,m}^{obs} + \Delta T_m \quad (۴)$$

در این روابط، m نشان‌دهنده ماه، d نشان‌دهنده روز، b بیانگر دوره مرجع، f بیانگر دوره آینده، obs داده مشاهده‌ای، GCM خروجی مدل اقلیمی و خط بالای متغیرها بیانگر میانگین بلندمدت ماهانه است. در نتیجه، برای بارش از عامل تغییر ضربی و برای دما از عامل تغییر جمعی استفاده شد.

این روش الگوی تغییرات روزانه داده‌های مشاهده‌ای را حفظ کرده و تغییرات میانگین ماهانه شبیه‌سازی‌شده توسط مدل اقلیمی را به آن منتقل می‌کند. باین‌حال، روش تغییر عامل دلتا تغییرات احتمالی در توزیع آماری، فراوانی روزهای تر و خشک و ویژگی رخدادهای حدی آینده را به‌طور مستقیم بازتولید نمی‌کند (Anandhi et al., 2011; Teutschbein and Seibert, 2012; Rathjens et al., 2016).

در روش تغییر عامل دلتا، داده‌های مشاهده‌ای مبنا قرار می‌گیرند و فقط سیگنال تغییر بین دوره مرجع و آینده مدل اقلیمی به آن‌ها منتقل می‌شود. مستندات CMhyd نیز این نرم‌افزار را برای استخراج و تصحیح داده‌های روزانه دما و بارش معرفی کرده و روش Delta Change را از روش‌های قابل اجرا می‌داند.

نتایج و بحث

بررسی عملکرد مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و

بارش در دشت مشهد

عملکرد مدل‌ها پس از جمع‌آوری داده‌های روزانه در مقیاس سالانه، با استفاده از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، اریبی میانگین (BIAS) و ضریب همبستگی پیرسون (r) ارزیابی شد. برای بارش، مجموع بارش سالانه و برای دما، میانگین دمای سالانه در دوره مرجع ۱۹۹۰-۲۰۱۴ محاسبه و با مقادیر متناظر شبیه‌سازی‌شده مقایسه شد. مدل برتر مدلی در نظر گرفته

اندازه‌گیری شده و داده‌های شبیه‌سازی شده بر اساس GCMها استفاده شده است (Haider et al., 2023; Yalcin, 2024; Gashaw et al., 2024).

نتایج Anandhi et al. در سال ۲۰۱۱، در مقیاس حوضه نشان داده است که مدل CMhyd یک روش قابل اعتماد برای ریزمقیاس نتایج GCM است. مدل CMhyd تکنیک‌های مختلف ریزمقیاس آماری برای دما و بارش را ارائه می‌دهد. در این تحقیق، مدل تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از این تکنیک‌های مختلف برای ریزمقیاس نتایج GCM برای بازه زمانی گذشته از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ و آینده از ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ استفاده شد. در این پژوهش، ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های دما و بارش با استفاده از روش تغییر عامل دلتا (Delta Change Factor) در نرم‌افزار CMhyd انجام شد. در این روش، سیگنال تغییر اقلیم از مقایسه میانگین‌های بلندمدت ماهانه خروجی مدل اقلیمی در دوره آینده و دوره مرجع استخراج و سپس بر سری زمانی روزانه مشاهده‌ای اعمال می‌شود. برای بارش، عامل تغییر هر ماه به‌صورت نسبت میانگین بارش شبیه‌سازی‌شده در دوره آینده به میانگین بارش شبیه‌سازی‌شده در دوره مرجع محاسبه شد:

$$CF_{P,m} = \frac{\bar{P}_{f,m}^{GCM}}{\bar{P}_{b,m}^{GCM}} \quad (۱)$$

سپس بارش روزانه آینده از رابطه زیر به دست آمد:

$$P_{f,d,m}^{DC} = P_{b,d,m}^{obs} \times CF_{P,m} \quad (۲)$$

برای دما، عامل تغییر هر ماه بر اساس اختلاف میانگین دمای شبیه‌سازی‌شده در دوره آینده و دوره مرجع از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$\Delta T_m = \bar{T}_{f,m}^{GCM} - \bar{T}_{b,m}^{GCM} \quad (۳)$$

و دمای روزانه آینده از رابطه (۴) محاسبه شد:

مقادیر این شاخص‌ها صرفاً در چارچوب مقایسه نسبی مدل‌ها و ویژگی‌های سری‌های سالانه هر ایستگاه تفسیر شدند.

شد که در مقایسه با سایر مدل‌ها، مقادیر RMSE و قدرمطلق BIAS کمتری و ضریب همبستگی بیشتری داشته باشد.

واحد RMSE و BIAS برای مجموع بارش سالانه میلی‌متر و برای میانگین دمای سالانه درجه سلسیوس است.

جدول ۳. ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی مجموع بارش سالانه دشت مشهد

Table 3. Performance evaluation of CMIP6 models in simulating annual precipitation totals in the Mashhad Plain.

ایستگاه سینوپتیک گل‌مکان Golmakan Synoptic Station			ایستگاه سینوپتیک مشهد Mashhad Synoptic Station			مدل MODEL
r	BIAS (mm yr ⁻¹)	RMSE (mm yr ⁻¹)	r	BIAS (mm yr ⁻¹)	RMSE (mm yr ⁻¹)	
0.77	8.87	10.34	0.78	9.34	12.46	MPI-ESM1-2-HR
0.67	9.76	15.16	0.65	10.45	19.43	CanESM5
0.63	-2.45	14.44	0.62	-3.45	17.34	BCC-ESM1
0.59	7.45	19.98	0.54	11.99	21.76	CNRM-ESM2-1
0.62	9.37	17.45	0.59	10.34	18.76	EC-Earth3-CC
0.70	6.65	12.34	0.70	11.23	14.54	MRI-ESM2-0
0.68	9.45	14.34	0.68	11.87	15.54	IPSL-CM6A-LR

همان‌طور که برای بارش نیز نشان داده شد مدل MPI-ESM1-2-HR بالاترین ضریب همبستگی را در هر دو ایستگاه مشهد و گل‌مکان دارد. این بدان معنی است که این مدل بهترین توانایی را در بازتولید الگوهای زمانی و مکانی دما در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد. همچنین، مقدار BIAS این مدل در ایستگاه مشهد ۱/۰۱ درجه سلسیوس و در ایستگاه گل‌مکان ۱/۲۳ درجه سلسیوس است که نشان می‌دهد این مدل به طور متوسط دمای هوا را در این ایستگاه‌ها به ترتیب ۱/۰۱ و ۱/۲۳ درجه سلسیوس بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول، مدل MPI-ESM1-2-HR عملکرد نسبتاً خوبی در برآورد دما در ایستگاه‌های مشهد و گل‌مکان دارد.

مدل CNRM-ESM2-1 نیز در هر دو ایستگاه مشهد و گل‌مکان پایین‌ترین عملکرد را برای دمای هوا داشته است. این مقدار را می‌توان در جدول (۴) مشاهده کرد.

شاخص BIAS نشان می‌دهد که مدل به طور متوسط چقدر از مقدار واقعی بارش فاصله دارد. مقدار مثبت BIAS به معنای بیش‌برآوردی و مقدار منفی آن به معنای کم‌برآوردی مدل است.

شاخص RMSE میزان پراکندگی خطاهای مدل را نشان می‌دهد. هرچه مقدار RMSE کمتر باشد، دقت مدل بیشتر است.

شاخص ضریب همبستگی، میزان همبستگی بین مقادیر مشاهده‌شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل را نشان می‌دهد.

مقدار r بین ۱- تا ۱ متغیر است و مقدار نزدیک به ۱ نشان‌دهنده همبستگی مثبت قوی بین دو متغیر است.

جدول (۴)، نتایج ارزیابی مدل‌های مختلف آب و هوایی از خانواده CMIP6 را برای برآورد میزان دما در دو ایستگاه سینوپتیک گل‌مکان و مشهد نشان می‌دهد.

جدول ۴. بررسی عملکرد مدل‌های CMIP6 در شبیه سازی دما در دشت مشهد

Table 4. Performance evaluation of CMIP6 models in simulating temperature in the Mashhad Plain.

ایستگاه سینوپتیک گل‌مکان Golmakan Synoptic Station			ایستگاه سینوپتیک مشهد Mashhad Synoptic Station			مدل MODEL
r	BIAS (mm yr ⁻¹)	RMSE (mm yr ⁻¹)	r	BIAS (mm yr ⁻¹)	RMSE (mm yr ⁻¹)	
0.80	1.23	2.11	0.83	1.01	2.23	MPI-ESM1-2-HR
0.73	1.54	2.87	0.76	1.12	3.34	CanESM5
0.75	1.67	2.30	0.74	1.14	2.56	BCC-ESM1
0.68	1.76	3.39	0.69	1.56	3.54	CNRM-ESM2-1
0.78	1.54	2.65	0.66	1.75	2.98	EC-Earth3-CC
0.79	1.34	2.42	0.68	1.56	2.34	MRI-ESM2-0
0.79	1.79	2.50	0.67	1.47	2.65	IPSL-CM6A-LR

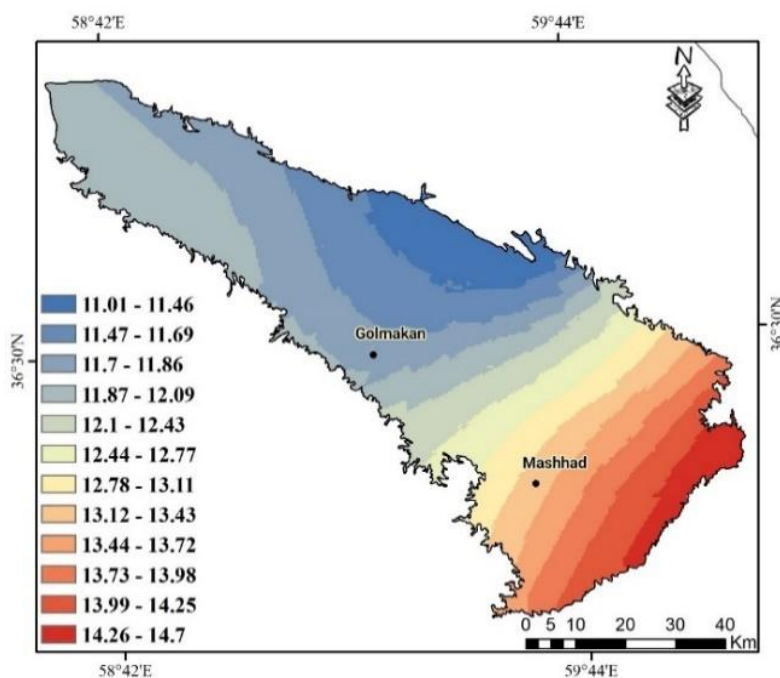
به طور کلی، دمای هوا از شمال به جنوب دشت مشهد افزایش می‌یابد. این روند افزایشی دمایی ممکن است به دلایل مختلفی مانند ارتفاع، پوشش گیاهی، و تأثیرات شهری باشد. این شکل نشان می‌دهد که دشت مشهد دارای گرادیان دمایی مشخصی از شمال به جنوب است. مناطق شمالی دشت به طور کلی سردتر از مناطق جنوبی هستند. این تفاوت دمایی می‌تواند بر عوامل مختلفی از جمله کشاورزی، مصرف انرژی، و سلامت انسان تأثیر بگذارد.

بررسی تغییرات دما طی دوره تاریخی و آینده در

دشت مشهد بر اساس مدل‌های CMIP6

شکل (۴) توزیع مکانی دمای سالانه متوسط در دشت مشهد را بر اساس مدل آب و هوایی MPI-ESM1-2-HR نشان می‌دهد. این مدل به عنوان بهترین مدل برای برآورد دما در این منطقه انتخاب شده است.

بر اساس این نقشه، دمای سالانه متوسط در دشت مشهد بین ۱۱/۱ تا ۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد متغیر است. این دامنه دمایی نشان دهنده تنوع دمایی در مناطق مختلف دشت مشهد است.



شکل ۴. توزیع فضایی دمای میانگین دشت مشهد طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴ بر اساس خروجی مدل MPI-ESM1-2-HR از سری مدل‌های CMIP6 در مقیاس سالانه (واحد: درجه سانتی‌گراد)

Fig 4 . Spatial distribution of the mean annual temperature in the Mashhad Plain during the 1990–2014 period based on the output of the MPI-ESM1-2-HR model from the CMIP6 model ensemble (unit: °C).

ملایمی دیده می‌شود اما تحت سناریو انتشار بالای SSP5-8.5، پیش‌بینی می‌شود دماهای افزایش قابل توجهی داشته باشد.

به طور کلی، پیش‌بینی می‌شود که در کوتاه‌مدت یعنی در آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۲۶) در سناریو حد واسطه که شرایط تقریباً مشابه با شرایط دنیای امروز را دارد کمینه دما در دشت مشهد افزایشی حدود ۱/۴۰ درجه سانتی‌گراد و در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) نزدیک به ۳ درجه سانتی‌گراد (۲/۹۹ درجه سانتی‌گراد) افزایش یابد.

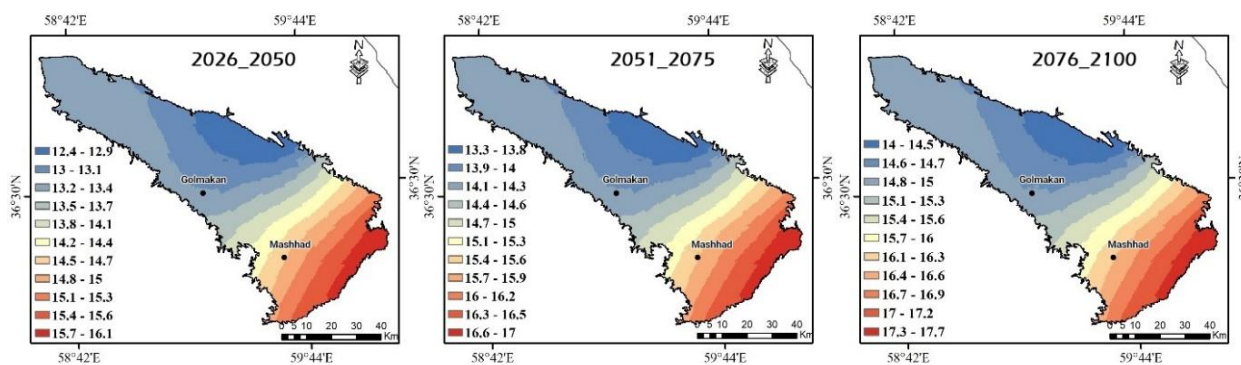
همچنین انتظار می‌رود بیشینه دمای میانگین نیز که در بخش‌های جنوبی دشت مشهد دیده می‌شود افزایش یابد، این افزایش برای سناریو SSP2-4.5 به مقدار ۱/۴ درجه سانتی‌گراد در آینده دور تحت همین سناریو به مقدار ۳ درجه سانتی‌گراد خواهد داشت.

به‌همین ترتیب در آینده نزدیک و آینده دور بیشینه دمای میانگین در دشت مشهد تحت سناریو SSP5-8.5 افزایش ۱/۹ و ۵/۶ درجه سانتی‌گرادی را تجربه خواهد کرد.

تغییرات دما را در دشت مشهد طی دوره آینده تحت سناریوهای مختلف SSP بررسی شده است. تغییرات دما طی دوره تاریخی و آینده را از مجموعه مدل‌های CMIP6 پیش‌نگری شده است. این پیش‌نگری شامل آینده کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت سناریوهای SSP2-4.5 (شکل ۵) و SSP5-8.5 (شکل ۶) است. برای دما، افزایش به ترتیب از ۱۲/۴ تا ۱۶/۱ درجه سانتی‌گراد و ۱۲/۹ تا ۱۶/۶ درجه سانتی‌گراد در آینده نزدیک پیش‌نگری شده است.

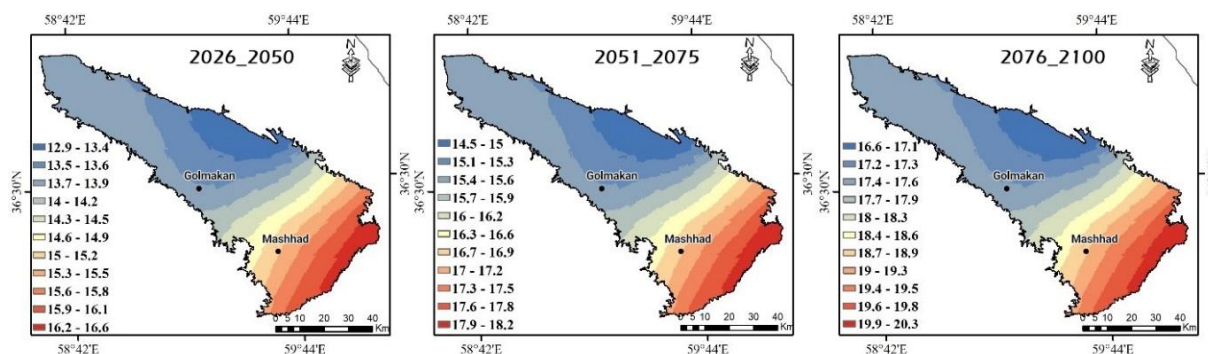
در همین حال، پیش‌بینی می‌شود که دمای میانگین سالانه در آینده میانی و دور به ترتیب ۱۳/۳ تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد و ۱۴ تا ۱۷/۷ درجه سانتی‌گراد تحت سناریو SSP2-4.5 و ۱۴/۵ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد و ۱۶/۶ تا ۲۰/۳ درجه سانتی‌گراد تحت سناریو SSP5-8.5 در آینده میانی و دور افزایش یابد.

برعکس سناریو SSP2-4.5، که افزایش دما از آینده نزدیک از سال ۲۰۲۶ تا پایان قرن حاضر در سال ۲۱۰۰ با شیب



شکل ۵. توزیع فضایی دمای میانگین دشت مشهد در آینده بر اساس خروجی مدل MPI-ESM1-2-HR از سری مدل‌های CMIP6 در مقیاس سالانه تحت سناریو SSP2-4.5 (واحد: درجه سانتی‌گراد)

Fig 5. Spatial distribution of the mean annual temperature in the Mashhad Plain under future climate conditions based on the output of the MPI-ESM1-2-HR model from the CMIP6 model ensemble under the SSP2-4.5 scenario (unit: °C).



شکل ۶. توزیع فضایی دمای میانگین دشت مشهد در آینده بر اساس خروجی مدل MPI-ESM1-2-HR از سری مدل‌های CMIP6 در مقیاس سالانه تحت سناریو SSP5-8.5 (واحد: درجه سانتی‌گراد)

Fig 6. Spatial distribution of the mean annual temperature in the Mashhad Plain under future climate conditions based on the output of the MPI-ESM1-2-HR model from the CMIP6 model ensemble under the SSP5-8.5 scenario (unit: °C).

ارتفاع از سطح دریا، جهت شیب زمین، پوشش گیاهی و نزدیکی به منابع آبی می‌توانند بر میزان و توزیع مکانی بارش تأثیر بگذارند.

توزیع فضایی تغییرات پیش‌نگری شده در میانگین سالانه بارش برای سه دوره زمانی آینده تحت دو سناریوی SSP در شکل (۷ و ۸) نشان داده شده است. در برخی از مناطق بخصوص در بخش‌های شمالی دشت مشهد در آینده نسبت به دوره مرجع افزایش میانگین سالانه بارش را نشان می‌دهد. برای دوره نزدیک آینده، میانگین سالانه پیش‌نگری شده بارش در دشت مشهد نسبت به اقلیم فعلی تحت دو سناریوی SSP افزایش را نشان می‌دهد (شکل‌های ۷ و ۸). بطوریکه بیشینه بارش تحت سناریو SSP2-4.5 به مقدار ۲۶۸ میلی‌متر و تحت سناریو SSP5-8.5 به مقدار ۲۷۲ میلی‌متر در دوره آینده نزدیک خواهد رسید.

از سوی دیگر، در دوره آینده دور، میانگین سالانه بارش پیش‌بینی می‌شود که نسبت به اقلیم فعلی نزدیک به ۹ درصد (۸/۸ درصد) تحت SSP5-8.5 و ۴/۴ درصد تحت سناریو SSP2-4.5 افزایش یابد (شکل ۷).

بررسی تغییرات بارش طی دوره تاریخی و آینده در

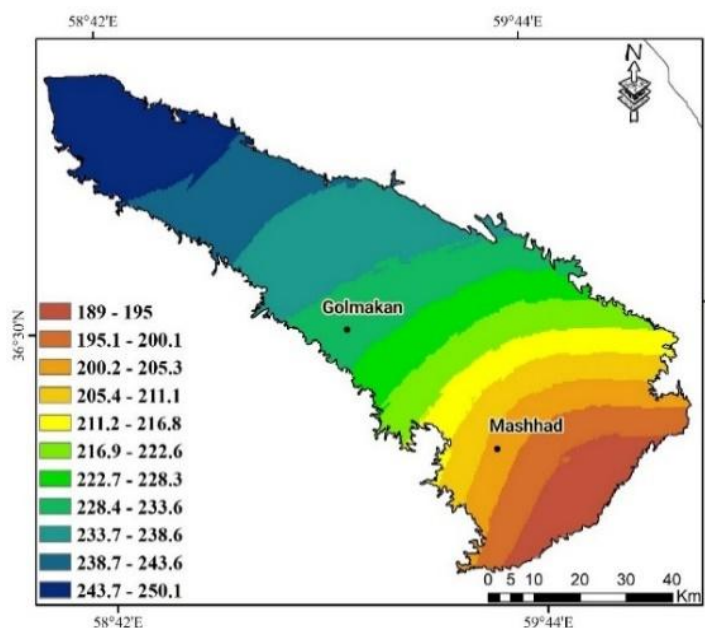
دشت مشهد بر اساس مدل‌های CMIP6

شکل (۷) نقشه توزیع مکانی بارش سالانه در دشت مشهد را برای دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ نشان می‌دهد.

این نقشه براساس خروجی مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-HR تهیه شده است که همانند دما در منطقه مورد نظر عملکرد خوبی داشته است. به طور کلی، میزان بارش از شمال به جنوب دشت مشهد کاهش می‌یابد. این به معنای آن است که مناطق شمالی دشت نسبت به مناطق جنوبی بارندگی بیشتری دریافت می‌کنند.

کمترین بارش سالانه در حدود ۱۸۹ میلی‌متر و بیشترین آن حدود ۲۵۰ میلی‌متر است. این دامنه نشان‌دهنده تنوع قابل توجهی در میزان بارش در نقاط مختلف دشت مشهد است. بررسی‌های نقشه هم‌بارش نشان می‌دهد که شهر مشهد در منطقه‌ای با بارندگی متوسط قرار دارد. این به معنای آن است که این شهر نه در خشک‌ترین و نه در مرطوب‌ترین مناطق دشت قرار گرفته است.

بررسی نقشه بارش و همچنین نقشه‌های پیش‌نگری بارش نشان می‌دهد که توزیع بارش در دشت مشهد به شدت تحت تأثیر عوامل جغرافیایی و اقلیمی است. عواملی مانند



شکل ۷. توزیع فضایی میانگین بارش دشت مشهد طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴ بر اساس خروجی مدل MPI-ESM1-2-HR از سری مدل‌های CMIP6 در مقیاس سالانه (واحد: میلی‌متر)

Fig 7. Spatial distribution of the mean annual precipitation in the Mashhad Plain during the 1990–2014 period based on the output of the MPI-ESM1-2-HR model from the CMIP6 model ensemble (unit: mm).

برای دوره نزدیک آینده، میانگین سالانه بارش در دشت مشهد پیش‌بینی می‌شود که تحت SSP2-4.5 و تحت SSP5-8.5 به ترتیب بین ۴ تا نزدیک به ۹ درصد افزایش یابد.

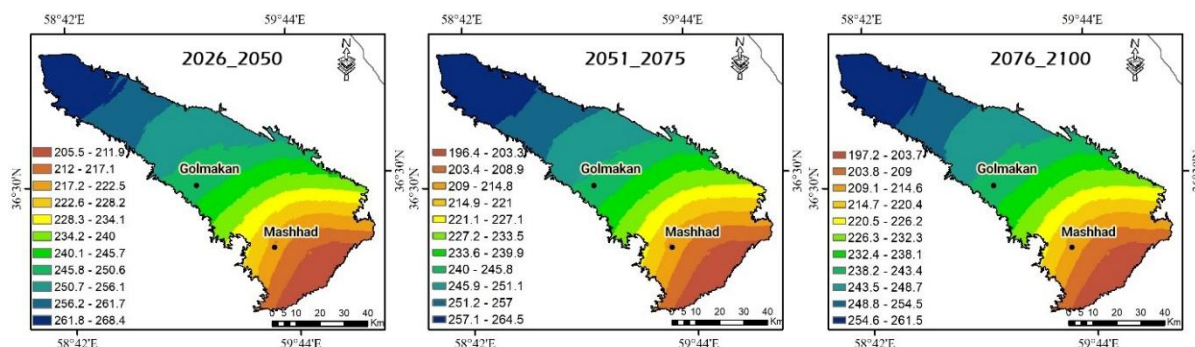
میانگین سالانه پیش‌نگری شده بارش، روند افزایشی قابل را در بیش‌تر مناطق دشت مشهد در طول قرن بیست و یکم نشان می‌دهد.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که قسمت شمالی و غربی منطقه به دلیل افزایش زیاد میانگین سالانه در برابر تغییرات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر است. گرمایش زیاد آینده احتمالاً ذوب‌شدن برف در این منطقه را بیشتر تسریع خواهد کرد که این امر الگوهای آبیاری پایین‌دست را به شدت تحت تأثیر قرار خواهد داد. علاوه بر این، افزایش بارش بخصوص در دوره گرم سال، همراه با افزایش آب در رودخانه‌ها به دلیل ذوب‌شدن زود هنگام برف در مناطق کوهستانی، ممکن است در آینده سیل‌های ناگهانی تابستانی شدید را در منطقه دشت مشهد ایجاد کند.

تحت سناریوی انتشار بالای SSP5-8.5، بیشتر دشت مشهد افزایش میانگین سالانه بارش نسبت به اقلیم فعلی را نشان می‌دهند.

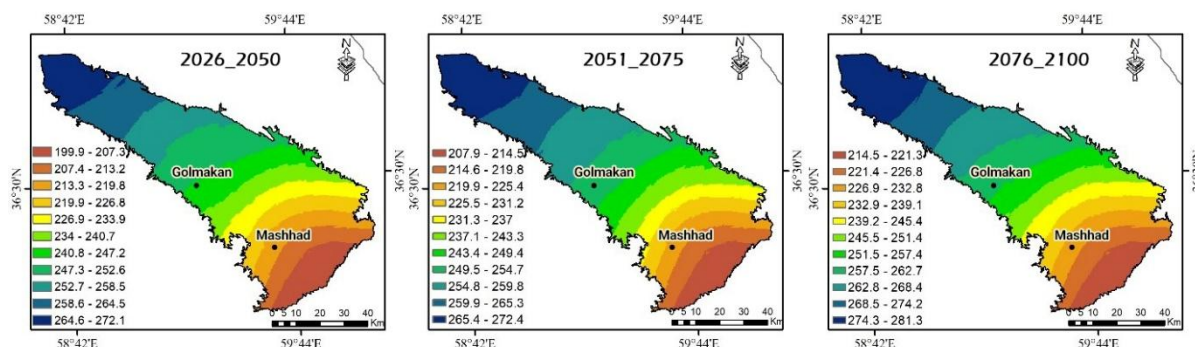
پیش‌نگری‌های آینده همچنین کاهش در میانگین سالانه بارش در بخش‌های میانی دشت مشهد را نشان می‌دهند، اما این تغییرات قابل توجه نیست (شکل ۸). در هر دو سناریوی آینده مورد بررسی، افزایش پیش‌نگری شده بارش عمدتاً در قسمت‌های غربی و شمالی دشت مشهد رخ می‌دهد.

این بخش از دشت مشهد عمدتاً کوهستانی و با شیب‌های تندی است، بنابراین افزایش کمی در مقدار مطلق بارش می‌تواند متناظر با تغییر درصد بزرگی در این منطقه باشد که منجر به افزایش رواناب و سیل شود. به‌طور کلی در دشت مشهد بارش، نوسان فضایی بزرگی را نشان می‌دهد. از این‌رو، روشن است عدم قطعیت مرتبط با بارش نیز بزرگ‌تر از عدم قطعیت مرتبط با دما است.



شکل ۸. توزیع فضایی بارش سالانه دشت مشهد در آینده بر اساس خروجی مدل MPI-ESM1-2-HR از سری مدل‌های CMIP6 در مقیاس سالانه تحت سناریو SSP2-4.5 (واحد: میلی‌متر)

Fig 8. Spatial distribution of the annual precipitation in the Mashhad Plain under future climate conditions based on the output of the MPI-ESM1-2-HR model from the CMIP6 model ensemble under the SSP2-4.5 scenario (unit: mm).



شکل ۹. توزیع فضایی بارش سالانه دشت مشهد در آینده بر اساس خروجی مدل MPI-ESM1-2-HR از سری مدل‌های CMIP6 در مقیاس سالانه تحت سناریو SSP5-8.5 (واحد: میلی‌متر)

Fig9. Spatial distribution of the annual precipitation in the Mashhad Plain under future climate conditions based on the output of the MPI-ESM1-2-HR model from the CMIP6 model ensemble under the SSP5-8.5 scenario (unit: mm).

ESM2-1، به‌ویژه در شبیه‌سازی بارش، ضریب همبستگی

پایین‌تر و خطای بیشتری داشت و در میان مدل‌های مورد بررسی ضعیف‌تر ارزیابی شد (جدول ۲ و ۳).

برتری مدل MPI-ESM1-2-HR در شبیه‌سازی دما با بخشی از نتایج مطالعات انجام‌شده در مقیاس ایران هم‌خوانی دارد.

Azad & Ahmadi در سال ۲۰۲۴، در ارزیابی ۴۰ مدل CMIP6 گزارش کردند که مدل MPI-ESM1-2-HR پس از تصحیح ارزیابی در میان مدل‌های برتر شبیه‌سازی دمای ایران قرار می‌گیرد. همچنین، مدل MPI-ESM1-2-LR برای شبیه‌سازی هر دو متغیر دما و بارش در شمار

ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6

نتایج ارزیابی دوره تاریخی نشان داد که مدل MPI-ESM1-2-HR در مقایسه با سایر مدل‌های بررسی‌شده، توانایی بیشتری در شبیه‌سازی بارش و دمای دشت مشهد دارد. این مدل برای بارش در ایستگاه‌های مشهد و گل‌مکان، به‌ترتیب ضرایب همبستگی ۰/۷۸ و ۰/۷۷ و برای دما ضرایب همبستگی ۰/۸۳ و ۰/۸۰ را نشان داد. همچنین، مقادیر نسبتاً پایین RMSE و BIAS بیانگر آن است که این مدل، افزون بر بازتولید مناسب تغییرات زمانی، در برآورد مقادیر متوسط متغیرهای اقلیمی نیز عملکرد قابل‌قبولی داشته است. در مقابل، مدل CNRM-

پژوهش حاضر» معرفی شود، نه به عنوان بهترین مدل مطلق برای تمام مطالعات اقلیمی مشهد. یافته‌های Yazdandoost et al. در سال ۲۰۲۱ نیز نشان داد که عملکرد مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش ایران به شدت تابع منطقه اقلیمی و مقیاس زمانی است و هر مدل ممکن است در یک منطقه اقلیمی یا فصل خاص عملکرد مناسب‌تری داشته باشد. آنان همچنین تغییرپذیری و عدم قطعیت بین مدلی قابل توجهی را برای بارش گزارش کردند. در نتیجه، عملکرد مطلوب-MPI-ESM1-2-HR در دشت مشهد می‌تواند ناشی از توانایی نسبی این مدل در بازنمایی شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و ویژگی‌های منطقه‌ای شمال شرق ایران باشد؛ با این حال، این نتیجه باید در محدوده مدل‌ها، معیارها و دو ایستگاه مورد استفاده در پژوهش حاضر تفسیر شود.

تغییرات آینده دما

نتایج پیش‌نگری دما، افزایش پیوسته دمای سالانه دشت مشهد را در تمام دوره‌های آینده نشان داد. شدت گرمایش در دوره نزدیک در دو سناریو نسبتاً مشابه است، اما از اواسط قرن به بعد اختلاف میان SSP2-4.5 و SSP5-8.5 آشکارتر می‌شود. در دوره دور، افزایش دما تحت SSP2-4.5 حدود ۳ درجه سانتی‌گراد و تحت SSP5-8.5 برای بخش‌هایی از دشت تا حدود ۵/۶ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. این اختلاف نشان می‌دهد که مسیر انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت گرمایش نیمه دوم قرن بیست و یکم خواهد داشت (شکل ۴ و ۵). روند گرمایش به دست آمده با نتایج مطالعات دیگر در ایران سازگار است. Usta et al. در سال ۲۰۲۲ با استفاده از مجموعه‌ای شامل ۲۲ مدل CMIP6، افزایش مداوم دمای ایران را در طول قرن بیست و یکم گزارش کردند و نشان دادند که شدت گرمایش در SSP5-8.5 به مراتب بیشتر از SSP2-4.5 است. در آن مطالعه، روند گرمایش ایران برای

مدل‌های دارای عملکرد مناسب قرار داشت. با این حال، مدل‌های برتر بارش در مقیاس کل ایران الزاماً با مدل‌های برتر در مقیاس دشت مشهد یکسان نبودند. این تفاوت نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌های اقلیمی به متغیر مورد بررسی، مقیاس مکانی، نوع داده‌های مشاهداتی، روش تصحیح ارببی و شاخص‌های مورد استفاده برای انتخاب مدل وابسته است.

Zabihi & Ahmadi در سال ۲۰۲۴ نیز در ارزیابی ۳۷ مدل CMIP6 در سطح ایران، دامنه ضریب همبستگی مدل‌ها را برای بارش بین ۰/۳۵ تا ۰/۷۵ و برای دما بین ۰/۶۰ تا ۰/۹۰ گزارش کردند. ضرایب همبستگی به دست آمده در پژوهش حاضر عموماً درون یا نزدیک به این دامنه قرار دارند و نشان می‌دهند که شبیه‌سازی دما نسبت به بارش از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است. این تفاوت را می‌توان به پیوستگی مکانی بیشتر میدان دما و در مقابل، تغییرپذیری زمانی و مکانی زیاد بارش و پیچیدگی فرایندهای همرفتی و توپوگرافی مؤثر بر آن نسبت داد.

در مطالعه‌ای دیگر در مشهد، Chamanehfar et al. در سال ۲۰۲۲، از میان مدل‌های ACCESS-CM2، MIROC6 و MRI-ESM2-0، مدل ACCESS-CM2 را برای شبیه‌سازی شاخص‌های حدی دما و بارش مناسب‌تر تشخیص دادند. تفاوت میان مدل منتخب آن مطالعه و پژوهش حاضر را نباید لزوماً به عنوان تناقض تلقی کرد؛ زیرا در مطالعه مذکور شاخص‌های حدی روزانه بررسی شده‌اند، در حالی که ارزیابی پژوهش حاضر بر میانگین دمای سالانه، مجموع بارش سالانه و شاخص‌های RMSE، BIAS و ضریب همبستگی پیرسون استوار است؛ بنابراین، مناسب‌تر است MPI-ESM1-2-HR به عنوان «بهترین مدل در میان مدل‌ها و معیارهای بررسی شده در

است. با این حال، تفکیک سهم توپوگرافی، شهرنشینی و تغییر اقلیم جهانی به داده‌های کاربری زمین و تحلیل‌های جداگانه نیاز دارد و تنها بر اساس خروجی یک مدل اقلیمی نمی‌توان سهم هر عامل را به‌صورت دقیق تعیین کرد.

تغییرات آینده بارش

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که میانگین بارش سالانه دشت مشهد در دوره‌های آینده، به‌ویژه در مناطق شمالی و غربی، افزایش می‌یابد. در دوره دور، مقدار افزایش نسبت به دوره تاریخی تحت SSP2-4.5 حدود ۴/۴ درصد و تحت SSP5-8.5 حدود ۸/۸ درصد برآورد شده است. تمرکز افزایش بارش در بخش‌های شمالی و غربی می‌تواند با نقش ارتفاعات و تقویت فرایندهای بارش توپوگرافی مرتبط باشد. در مقابل، تغییرات محدود یا کاهش جزئی بارش در بخش‌های مرکزی دشت نشان‌دهنده ناهمگنی مکانی پاسخ بارش به تغییر اقلیم است (شکل ۷ و ۸).

جهت کلی این تغییرات با نتایج برخی مطالعات جدید درباره مشهد و سایر کلان‌شهرهای ایران هم‌خوانی دارد. Afsari et al. در سال ۲۰۲۴، گزارش کردند که سناریوهای دارای انتشار بیشتر، به‌ویژه SSP3-7.0 و SSP5-8.5، با افزایش تعداد روزهای دارای بارش بسیار سنگین در کلان‌شهرهای ایران همراه هستند. نتایج آنان برای مشهد نیز احتمال افزایش روزهای دارای بارش بسیار سنگین را تحت سناریوهای انتشار متوسط و زیاد نشان داد. این یافته‌ها از احتمال تمرکز بیشتر بارش در رخداد‌های سنگین حمایت می‌کنند؛ هرچند تغییر بارش سالانه و تغییر شاخص‌های بارش حدی دو موضوع متفاوت هستند و افزایش یکی الزاماً به معنای افزایش دیگری نیست.

Khansalari & Mohammadi در سال ۲۰۲۴، نیز با استفاده از یک مجموعه چندمدلی وزنی CMIP6، افزایش

دوره ۲۰۱۴ تا ۲۱۰۰ تحت SSP2-4.5 حدود ۳/۳۶ درجه سانتی‌گراد در قرن و تحت SSP5-8.5 حدود ۷/۴۶ درجه سانتی‌گراد در قرن برآورد شد. با وجود تفاوت در دوره مرجع، مقیاس مکانی و روش محاسبه، ترتیب سناریوها و تشدید گرمایش در انتهای قرن با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

نتایج Chamanehfar et al. در سال ۲۰۲۲، برای مشهد نیز نشان داد که درصد شب‌های گرم و تعداد روزهای تابستانی در دوره‌های آینده افزایش می‌یابد، درحالی‌که فراوانی شب‌های سرد کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین، افزایش دمای میانگین سالانه در پژوهش حاضر احتمالاً با تغییر توزیع دما و افزایش فراوانی رخداد‌های گرم همراه خواهد بود. این وضعیت می‌تواند پیامدهایی مانند افزایش نیاز آبی گیاهان، افزایش تبخیر و تعرق، افزایش تقاضای برق برای سرمایش و تشدید تنش گرمایی در مناطق شهری به همراه داشته باشد.

الگوی مکانی دمای دوره تاریخی که افزایش دما را از شمال به جنوب دشت نشان می‌دهد، می‌تواند تا حد زیادی با اختلاف ارتفاع و شرایط توپوگرافی مرتبط باشد. مناطق شمالی و شمال غربی دشت بیشتر تحت تأثیر ارتفاعات قرار دارند، درحالی‌که بخش‌های جنوبی عموماً کم‌ارتفاع‌تر و خشک‌تر هستند. اطلس گزارش ششم IPCC نیز به وجود گرادیان‌های شدید دما و بارش میان ارتفاعات و دشت‌های جنوب غرب آسیا و دشواری مدل‌های اقلیمی در بازنمایی توپوگرافی پیچیده منطقه اشاره کرده است (IPCC, 2021).

در محدوده شهری مشهد، تغییرات کاربری زمین و شکل‌گیری جزیره گرمایی شهری نیز ممکن است افزایش دما را در مقیاس محلی تشدید کند. Saberifar در سال ۲۰۲۳، افزایش معنی‌دار دمای حداقل، حداکثر و میانگین مشهد را طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ گزارش کرده و نقش احتمالی توسعه شهری و جزیره گرمایی را مطرح کرده

زود هنگام برف، می‌تواند حجم رواناب و احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی را افزایش دهد. گرم شدن مناطق مرتفع جنوب غرب آسیا می‌تواند موجب کاهش پوشش برف، افزایش سهم باران نسبت به برف و تغییر زمان ذوب برف شود. با این حال، از آنجا که در پژوهش حاضر بارش میانگین سالانه بررسی شده است، نمی‌توان تنها بر اساس این متغیر درباره افزایش قطعی فراوانی یا شدت سیل نتیجه‌گیری کرد (IPCC, 2021).

ارزیابی دقیق خطر سیل به تحلیل شاخص‌های بارش حدی، شدت و مدت بارش، رطوبت پیشین خاک، تغییرات کاربری زمین، ظرفیت نفوذ خاک، ویژگی‌های شبکه زهکشی و اجرای مدل‌های بارش-رواناب نیاز دارد؛ بنابراین، مناسب‌تر است نتایج پژوهش حاضر به‌عنوان نشانه‌ای از «افزایش بالقوه خطر سیل» مطرح شوند. مطالعات مربوط به بارش‌های حدی کلان‌شهرهای ایران نیز بر اهمیت توسعه سامانه‌های هشدار سریع، بهبود شبکه‌های زهکشی و طراحی زیرساخت‌های مقاوم در برابر رخداد‌های بارشی سنگین تأکید کرده‌اند (Afsari et al., 2024).

یکی از محدودیت‌های مهم پژوهش حاضر، استفاده از یک مدل منتخب برای تهیه پیش‌نگری‌های نهایی است. اگرچه انتخاب بهترین مدل بر اساس عملکرد تاریخی روشی متداول است، عملکرد مناسب یک مدل در دوره گذشته تضمین نمی‌کند که همان مدل پاسخ آینده سامانه اقلیمی را بدون عدم قطعیت بازنمایی کند. ارزیابی‌های انجام‌شده در ایران نشان داده‌اند که استفاده از مجموعه چندمدلی پس از تصحیح اریبی می‌تواند خطاها را کاهش دهد، دامنه عدم قطعیت را بهتر نشان دهد و وابستگی نتایج به یک مدل منفرد را کمتر کند؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود در کنار خروجی MPI-ESM1-2-HR، دامنه تغییرات چند مدل برتر یا نتایج یک مجموعه چندمدلی وزنی نیز گزارش

مقدار کل بارش‌های حدی و شدت مطلق بارش‌های حدی را در بیشتر دوره‌ها و سناریوهای آینده ایران محتمل دانستند. با این حال، تعداد روزهای دارای بارش حدی در نتایج آنان عموماً افزایش مشخصی نداشت و در برخی دوره‌ها کاهش یافت. از این‌رو، افزایش بارش سالانه یا افزایش مقدار بارش‌های حدی الزاماً به معنای افزایش تعداد روزهای بارانی نیست و ممکن است حجم بیشتری از بارش در تعداد کمتری از رخدادها متمرکز شود.

با وجود این هم‌خوانی‌ها، پیش‌نگری بارش در جنوب غرب آسیا و ایران همچنان با عدم قطعیت زیادی همراه است. اطلس گزارش ششم IPCC اعتماد پایینی به جهت تغییر میانگین بارش آینده در جنوب غرب آسیا نسبت داده است؛ زیرا مدل‌ها درباره افزایش یا کاهش بارش توافق کافی ندارند و تغییرات پیش‌نگری‌شده از نظر مکانی و فصلی بسیار متفاوت هستند؛ بنابراین، افزایش $4/4$ تا $8/8$ درصدی بارش در پژوهش حاضر باید به‌عنوان پیش‌نگری مدل MPI-ESM1-2-HR و نه یک نتیجه قطعی و بدون عدم قطعیت برای آینده دشت مشهد بیان شود (IPCC, 2021). افزایش احتمالی بارش سالانه نیز لزوماً به معنای کاهش تنش آبی منطقه نیست.

نتایج مطالعه چندمدلی Afsari et al. در سال ۲۰۲۴-الف، درباره خشکسالی کلان‌شهرهای ایران نشان داد که مشهد تحت SSP5-8.5 همچنان می‌تواند با خشکسالی‌های شدید مواجه شود. افزایش دما و تبخیر و تعرق، تغییر زمان وقوع بارش، کاهش سهم بارش برف و تمرکز بارش در رخداد‌های کوتاه‌مدت می‌تواند بخشی از اثر مثبت افزایش بارش سالانه را خنثی کند. در نتیجه، وقوع هم‌زمان دوره‌های خشک طولانی و بارش‌های کوتاه‌مدت و شدید در آینده امکان‌پذیر است (IPCC, 2021).

پیامدهای هیدرولوژیکی و عدم قطعیت نتایج

افزایش بارش پیش‌نگری‌شده در ارتفاعات شمالی و غربی، در صورت همراهی با افزایش شدت بارش و ذوب

هم‌زمان با افزایش خطر کم‌آبی، خشکسالی و سیلاب ناگهانی مواجه شود. این شرایط ضرورت مدیریت یکپارچه منابع آب، حفاظت از آبخوان، اصلاح شبکه زهکشی شهری، پایش شاخص‌های بارش حدی و توسعه سامانه‌های هشدار سریع را برجسته می‌سازد (Afsari et al., 2024a, 2024b; IPCC, 2021).

نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل جامع پیش‌نگری‌های اقلیمی برای دشت مشهد، شامل تغییرات در بارش و دما، بینش دقیقی در مورد چگونگی تغییرات شرایط اقلیمی در پاسخ به اثرات تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد. یافته‌های تغییر اقلیم بخصوص در سطح منطقه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار هستند و پیامدهای عمیقی برای آینده اقلیم و استراتژی‌های سازگاری در منطقه دارند. در این بررسی تغییرات بارش و دما برای سه دوره دو کوتاه‌مدت (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، میان‌مدت (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و بلندمدت (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت دو سناریو حد واسط (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) بررسی شد. بر اساس خروجی مدل CMIP6 افزایش مداوم میانگین سالانه دما در دشت مشهد در طول قرن بیست و یکم تحت سناریوی SSP (یعنی SSP2-4.5 و SSP5-8.5) را نشان می‌دهد. در قسمت‌های شمال غربی دشت مشهد، پیش‌بینی می‌شود که بزرگ‌ترین افزایش دما در آینده را تا پایان قرن بیست و یکم تحت SSP5-8.5 نسبت به اقلیم مرجع (۲۱۰۴-۱۹۹۰) تجربه کنند. روند گرمایش پیش‌بینی‌شده در دشت مشهد قوی هستند و در سطح اطمینان بالایی اتفاق می‌افتند. تحت همه سه سناریوی آینده، پیش‌بینی می‌شود افزایش دما بیشتر به سمت پایان قرن بیست و یکم باشد. تا پایان قرن بیست و یکم، پیش‌بینی می‌شود میانگین سالانه دما در دشت مشهد حداقل ۱ درجه سانتی‌گراد و حداکثر ۵ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای

شود (Azad & Ahmadi, 2024; Khansalari & Mohammadi, 2024).

همچنین، استفاده از دو ایستگاه برای ارزیابی عملکرد مدل، امکان بررسی کامل ناهمگنی اقلیمی دشت مشهد را محدود می‌کند. افزودن ایستگاه‌های باران‌سنجی و اقلیم‌شناسی، استفاده از داده‌های شبکه‌ای معتبر، انجام اعتبارسنجی متقابل و گزارش آزمون‌های معنی‌داری روند می‌تواند استحکام نتایج را افزایش دهد. مطالعات سراسری ایران نیز نشان داده‌اند که رتبه مدل‌ها با تغییر ایستگاه، منطقه اقلیمی، مقیاس زمانی و معیار ارزیابی تغییر می‌کند (Azad & Ahmadi, 2024; Zabihi & Ahmadi, 2024; Yazdandoost et al., 2021).

عبارت‌هایی مانند «روند با سطح اطمینان بالا» باید تنها زمانی استفاده شوند که معنی‌داری آماری روند، میزان توافق بین مدل‌ها یا دامنه عدم قطعیت سناریوها به طور مشخص محاسبه و گزارش شده باشد. در صورت انجام‌نشدن آزمون‌هایی مانند من-کندال، شیب سن یا تحلیل توافق مجموعه مدل‌ها، مناسب‌تر است از عبارت‌هایی مانند «نتایج مدل نشان‌دهنده روند افزایشی نسبتاً پایدار است» استفاده شود.

در مجموع، نتایج پژوهش حاضر درباره افزایش دمای دشت مشهد از پشتوانه نسبتاً قوی‌تری برخوردار است و با بیشتر مطالعات منطقه‌ای و ملی هم‌خوانی دارد. در مقابل، جهت و مقدار تغییر بارش با عدم قطعیت بیشتری همراه است؛ اگرچه نتایج پژوهش حاضر و برخی مطالعات جدید احتمال افزایش بارش سالانه، مقدار بارش‌های حدی یا تعداد روزهای دارای بارش بسیار سنگین را مطرح می‌کنند (Usta et al., 2022; Afsari et al., 2024b; Khansalari & Mohammadi, 2024; IPCC, 2021).

ترکیب گرمایش شدید، افزایش تقاضای تبخیری، تداوم خطر خشکسالی و احتمال تمرکز بارش در رخدادهای شدید نشان می‌دهد که دشت مشهد ممکن است به طور

این نتایج نشان می‌دهد که منطقه دشت مشهد در شمال شرقی ایران می‌تواند انتظار وقوع باران‌های شدیدتر و مکررتر را در دهه‌های آینده داشته باشد که به نوبه خود ممکن است خطرات سیل و آسیب‌پذیری‌ها را در زیرساخت‌های اجتماعی افزایش دهد و چالش‌هایی را برای کشاورزی و مدیریت منابع آب ایجاد کند.

یافته‌های این مطالعه چندین پیامد مهم دارد. اولاً، نشانگر افزایش دما و بارش‌های سیل‌آسا است که بر جریان رودها و بخصوص سیل شهری تأکید دارد. این نشان‌دهنده نیاز به اقدامات تطبیقی برای مهار و مدیریت مؤثر سیلاب تحت شرایط تغییر اقلیم است. ثانیاً، این تحقیق به ایجاد تاب‌آوری اقلیم در منطقه کمک می‌کند. درک تأثیرات تغییر اقلیم برای تدوین برنامه‌های سازگاری حیاتی است. از نتایج این مطالعه می‌توان برای توسعه زیرساخت‌های مقاوم در برابر اقلیم مانند بهبود دفاع در برابر سیل و تأسیسات ذخیره آب را که برای مقابله با تغییرات الگوهای دما و بارش ضروری هستند، اطلاع دهد. سیاست‌گذاران می‌توانند از این اطلاعات برای تدوین مقررات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تدوین سیاست‌های استفاده از زمین که اثرات نامطلوب بر منابع آب را به حداقل می‌رسانند، استفاده کنند.

منابع

- Abdolalizadeh, F., Mohammad Khorshiddoust, A., & Jahanbakhsh, S. (2022). Assessment of the performance of CMIP6 model for analysis of temperature and precipitation in Urmia Lake basin. *Climate Change Research*, 3(11), 17–30. [In Persian].
<https://doi.org/10.30488/ccr.2022.361233.1093>
 Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024a). 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. <https://doi.org/10.3390/w16050711>
 Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024b). Projected climate change impacts on the number of dry and very heavy precipitation days by century's end: A case study of

SSP2-4.5 و SSP5-8.5 افزایش یابد. میانگین سالانه دمای میانگین متوسط دشت مشهد نیز نسبت به اقلیم مرجع تحت همه سناریوها افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. پیش‌نگری‌های دما افزایش قابل توجه و مداوم دما در مقیاس‌های زمانی و مناطق مختلف را نشان می‌دهد. سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نقش اساسی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را برای کاهش گرمایش جهانی آینده برجسته می‌کنند. این افزایش دما طیف گسترده‌ای از اثرات را به همراه خواهد داشت، از جمله افزایش تنش‌هایی گرمایی، افزایش تقاضای انرژی برای سرمایش، تغییر در اکوسیستم‌ها و تغییرات در شیوه‌های کشاورزی (Peacock., 2012).

درحالی‌که از داده‌های بارش معمولاً برای نشان‌دادن خطرات سیل استفاده می‌شوند، ضروری است که در تحقیقات آینده، با استفاده از شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی به شکل دقیق بارش-رواناب مورد بررسی قرار گیرد. این مطالعه با ارائه داده‌های با وضوح بالا از طریق پیش‌نگری‌های اقلیمی ریزمقیاس شده، می‌تواند مدل‌سازی هیدرولوژیکی و کاهش خطر سیل را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشد. درک تغییرات در الگوهای بارش و دما برای ارزیابی خطرات سیل و طراحی سیستم‌های زهکشی مؤثر ضروری است.

تجزیه و تحلیل تغییرات بارش و دما درک ما را از تغییرات زمانی این دو متغیر مهم افزایش می‌دهد. تغییر در الگوهای بارش، با خشک‌تر شدن فصل‌های خشک در برخی مناطق، پیامدهای قابل‌توجهی برای مدیریت منابع آب، کشاورزی و اکوسیستم‌ها دارد. هم‌زمان، افزایش دما می‌تواند موج‌های گرما را تشدید کند و زیرساخت‌های سرمایش را تحت فشار قرار دهد و چالش‌های جدی را همانند قطع برق برای مراکز بزرگ شهری در دشت مشهد همانند شهر مشهد را پیچیده‌تر از شرایط فعلی کند.

- Iran's metropolises. *Water*, 16(16), 2226. <https://doi.org/10.3390/w16162226>
- Afsharinia, M., Panahi, F., & Ehteram, M. (2024). Investigation of climate change using CMIP6 models outputs (case study: Kashan Plain). *Irrigation and Water Engineering*, 14(2), 237–256. [In Persian]. <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.383176.1704>
- Akbar, H., & Gheewala, S. H. (2020). Effect of climate change on cash crops yield in Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 390. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05333-7>
- Alem, H., Esmaeilzadeh Soudejani, A., & Fallahi, M. (2021). Estimate the amount of groundwater recharge in hard formations, case study: Mashhad, Iran. *Applied Water Science*, 11, 6. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01317-w>
- Almasi, A., Fatemi, S. E., & Eghbalzadeh, A. (2026). Assessing the impact of climate change on rainfall patterns in Kermanshah, Iran: A machine learning approach. *Applied Water Science*, 16, 105. <https://doi.org/10.1007/s13201-026-02768-3>
- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M. N., & Ismail, M. (2020). Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4, 297–320. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00157-7>
- Anandhi, A., Frei, A., Pierson, D. C., Schneiderman, E. M., Zion, M. S., Lounsbury, D., & Matonse, A. H. (2011). Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment. *Water Resources Research*, 47(3), W03501. <https://doi.org/10.1029/2010WR009104>
- Asadi-RahimBeygi, N., Mofidi, A., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2025). Near-term climate extremes in Iran based on compound hazards analysis. *Scientific Reports*, 15, 43843. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29026-x>
- Azad, N., & Ahmadi, A. (2024). Assessment of CMIP6 models and multi-model averaging for temperature and precipitation over Iran. *Scientific Reports*, 14, 24165. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74789-4>
- Bobde, V., Akinsanola, A. A., Folorunsho, A. H., Adebisi, A. A., & Adeyeri, O. E. (2024). Projected regional changes in mean and extreme precipitation over Africa in CMIP6 models. *Environmental Research Letters*, 19(7), 074009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad545c>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chamanehfar, S., Mousavi Baygi, M., Babaeian, I., & Modaresi, F. (2022). Future projection for extreme indices of precipitation and temperature over the period 2026–2100 based on the output of CMIP6 models (case study: Mashhad). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(5), 963–976. [In Persian]. <https://dori.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.5.7.2>
- Chen, H., Sun, J., Lin, W., & Xu, H. (2020). Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Science Bulletin*, 65(17), 1415–1418. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.05.015>
- Dariane, A. B., Rezaei, P., & Ghasemi, M. (2026). Evaluation of CMIP6 climate models and machine learning-based downscaling for precipitation projections over Iran. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 144, 104589. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2026.104589>
- Dong, T., & Dong, W. (2021). Evaluation of extreme precipitation over Asia in CMIP6 models. *Climate Dynamics*, 57, 1751–1769. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05773-1>
- Ettehad, M., Hashemi Monfared, S. A., Pirzadeh, B., Rezapour, A. A., & Azizyan, G. (2026). Future precipitation projections using CMIP6 multimodel ensemble: A deep learning-based bias correction approach. *Journal of Water and Climate Change*, 17(5), 1142–1160. <https://doi.org/10.2166/wcc.2026.025>
- Gashaw, T., Worqlul, A. W., Taye, M. T., Lakew, H. B., Seid, A., Ayele, G., & Hailelassie, A. (2024). Performance evaluations of CMIP6 model simulations and future projections of rainfall and temperature in the Bale Eco-Region, Southern Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(6), 5069–5092. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04904-y>
- Haider, S., Masood, M. U., Rashid, M., Alshehri, F., Pande, C. B., Katipoğlu, O. M., & Costache, R. (2023). Simulation of the potential impacts of projected climate and land use change on runoff under CMIP6 scenarios. *Water*, 15(19), 3421. <https://doi.org/10.3390/w15193421>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (Eds.). (2012). *Forecast verification: A practitioner's guide in atmospheric science* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119960003>
- Khansalari, S., & Mohammadi, A. (2024). Probabilistic projection of extreme precipitation changes over Iran by the CMIP6 multi-model ensemble. *Climatic Change*, 177, 115. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03771-w>
- Khosravi, Y., & Ouarda, T. B. (2025). Drought risks are projected to increase in the future in central and southern regions of the Middle East.

- Communications Earth & Environment*, 6, 384. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02359-1>
- Li, Z., Liu, T., Huang, Y., Peng, J., & Ling, Y. (2022). Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global land. *Earth's Future*, 10(8), e2021EF002500. <https://doi.org/10.1029/2021EF002500>
- Mohammadi, N., & Mostafazadeh, R. (2026). Intensification of extreme and compound hazards in urban areas under climate change in Iran: A scoping review. *Climate*, 14(6), 126. <https://doi.org/10.3390/cli14060126>
- Naderi, M., Harris, I., Mozafari, M., & Nematollahi, M. J. (2026). Impact of climate change on long-term distribution of precipitation and temperature in Iran. *Results in Engineering*, 30, 111002. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.111002>
- Nagra, M., Masood, M. U., Haider, S., & Rashid, M. (2022, November). *Assessment of spatiotemporal droughts through machine learning algorithm over Pakistan* [Conference paper]. 2nd National Conference on Sustainable Water Resources Management (SWRM-22), Lahore, Pakistan.
- Panahi, G., Hassanzadeh Eskafi, M., Faridhosseini, A., Khodashenas, S. R., & Rohani, A. (2023). Prediction of groundwater level fluctuations under climate change based on machine learning algorithms in the Mashhad aquifer, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 1039–1059. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.027>
- Peacock, S. (2012). Projected twenty-first-century changes in temperature, precipitation, and snow cover over North America in CCSM4. *Journal of Climate*, 25(13), 4405–4429. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00214.1>
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J. G. (2016). *CMhyd user manual: Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies*. Texas A&M University. https://swat.tamu.edu/media/115265/bias_cor_man.pdf
- Rezaei, H., Pashapour, H., & Sadeghi, F. (2024). Performance evaluation of CMIP6 models and forecasting of temperature and precipitation changes under Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios in Iran. *Strategic Futures Studies*, 3(10), 7–30. [In Persian]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.28212592.1403.3.10.1.5>
- Saberifar, R. (2023). Climate change and water crisis: Case study, Mashhad in northeastern Iran. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(1), 705–716. <https://doi.org/10.15244/pjoes/151988>
- Salazar, A., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., & Squeo, F. (2024). CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile. *Climate Dynamics*, 62(3), 2475–2498. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07034-9>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- 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*, 456–457, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Try, S., Tanaka, S., Tanaka, K., Sayama, T., Khujanazarov, T., & Oeurng, C. (2022). Comparison of CMIP5 and CMIP6 GCM performance for flood projections in the Mekong River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, 101035. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101035>
- Usta, D. F. B., Teymouri, M., & Chatterjee, U. (2022). Assessment of temperature changes over Iran during the twenty-first century using CMIP6 models under SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 416. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09709-9>
- 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(8), 1181. <https://doi.org/10.3390/w17081181>
- Wilks, D. S. (2011). Forecast verification. In *Statistical methods in the atmospheric sciences* (3rd ed., Vol. 100, pp. 301–394). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385022-5.00008-7>
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- World Meteorological Organization. (2026). *State of the global climate 2025*. <https://doi.org/10.59327/WMO/S/CRI/SOC1>
- Yalcin, E. (2024). A CMIP6 multi-model ensemble-based analysis of potential climate change impacts on irrigation water demand and supply using SWAT and CROPWAT models: A case study of Akmes Dam, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(1), 679–699. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04657-0>
- Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 250, 105369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105369>
- Yesuph, A. Y., & Dagnew, A. B. (2019). Land use/cover spatiotemporal dynamics, driving forces

- and implications at the Beshillo catchment of the Blue Nile Basin, North Eastern Highlands of Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 8, 21. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0148-y>
- Zabihi, O., & Ahmadi, A. (2024). Multi-criteria evaluation of CMIP6 precipitation and temperature simulations over Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101707. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101707>
- Zarei, M., Ghazavi, R., Abdollahi, K., Ranzi, R., Teegavarapu, R. S. V., & Barontini, S. (2024). Spatiotemporal variation of water balance components in Mashhad catchment, Iran: Investigating the impact of changes in climatic data and land use. *Water Supply*, 24(2), 397–415. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.018>
- Zareian, M. J., Dehban, H., & Gohari, A. (2023). Evaluation of the accuracy of CMIP6 models in estimating the temperature and precipitation of Iran based on a network analysis. *Water and Irrigation Management*, 12(4), 783–797. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.345975.1006>
- Zhang, Y., Su, F., Hao, Z., Xu, C., Yu, Z., Wang, L., & Tong, K. (2015). Impact of projected climate change on the hydrology in the headwaters of the Yellow River basin. *Hydrological Processes*, 29(20), 4379–4397. <https://doi.org/10.1002/hyp.10497>