



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 7, No. 27, Autumn 2026



Selecting the Optimal CMIP6 Model and Spatial Heterogeneity of Downscaled Precipitation and Temperature Projections in a Semi-Arid Basin, Central Iran

Maryam Aghaie¹ , Seyedhassan Alavinia^{2*} , Hoda Ghasemieh³

¹ Ph.D. Candidate in Watershed Science and Engineering, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: m.ghaie348@gmail.com

² (Corresponding Author), Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: s.h.alavinia@kashanu.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:

Received: 2026-08-08

Revised: 2026-09-05

Accepted: 2026-09-16

Keywords:

CMIP6
LARS-WG
SSPs
Spatial heterogeneity of precipitation
GCMs
Water resources management

ABSTRACT

Escalating climate change challenges in arid and semi-arid regions necessitate precise hydro-climatic evaluations for sustainable water resource management. This study aimed to simulate and project future temperature and precipitation changes across five synoptic stations in the Kashan Plain watershed (Natanz, Kashan, Meymeh, Kahak, and Delijan) using daily baseline data (2004–2024) and CMIP6 models. Outputs from eleven General Circulation Models (GCMs) were evaluated using five performance metrics (MAD, MSE, RMSE, MAPE, and R^2), leading to the selection of four top-performing models: ACCESS-ESM1-5, CESM2, MPI-ESM1-2-LR, and BCC-CSM2-MR. Results revealed that CESM2 consistently exhibited the lowest error and highest coefficient of determination across all stations for temperature, serving as the benchmark model for temperature downscaling. For precipitation, the optimal model varied by station; however, MPI-ESM1-2-LR, BCC-CSM2-MR, and ACCESS-ESM1-5 delivered the best performance. Statistical downscaling was performed using LARS-WG8 under three scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5) for near-future (2021–2040) and mid-future (2041–2060) horizons. Results indicate that mean basin temperature in the mid-future will rise by 0.64°C (SSP1-2.6) to 1.29°C (SSP5-8.5), whereas warming signals in the near-future remain weaker (0.05–0.33°C). Contrary to common perception, mean basin precipitation shows a minor increase (1.5% to 7.2%) across most scenarios; however, this basin-wide average is driven by pronounced spatial heterogeneity. Natanz shows a significant increase (up to 25%), while Meymeh, despite its highest elevation, demonstrates a persistent decline (up to 15% under SSP5-8.5), whereas Kashan experiences minor changes (-4.4% to +7.7%). These findings indicate that a simple higher elevation equals greater precipitation relationship does not hold true in this basin, highlighting the necessity of station-specific monitoring and integrating these outputs with the WEAP water resource management model.

Cite this article: Aghaie, M., Alavinia, S.h., Ghasemieh, H. (2026). Selecting the Optimal CMIP6 Model and Spatial Heterogeneity of Downscaled Precipitation and Temperature Projections in a Semi-Arid Basin, Central Iran. Journal of the Climate Change research, 7 (27), 105-126.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

DOI: 10.30488/ccr.2026.596189.1353



انتخاب مدل بهینه CMIP6 و ناهمگونی مکانی پیش‌بینی‌های ریزمقیاس شده بارش و دما در یک حوضه نیمه‌خشک، مرکز ایران

مریم آقایی^۱، سیدحسن علوی‌نیا^{۲*}، هدی قاسمیه^۳

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران،

رایانامه: m.ghaie348@gmail.com

^۲ (نویسنده مسئول) استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، رایانامه: s.h.alavinia@kashanu.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، رایانامه: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
تشدید چالش‌های تغییر اقلیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ارزیابی دقیق مؤلفه‌های هیدرو-اقلیمی را برای مدیریت پایدار منابع آب ضروری ساخته است. این پژوهش با هدف شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات آبی دما و بارش در پنج ایستگاه سینوپتیک حوزه آبخیز دشت کاشان (نطنز، کاشان، میمه، کهک و دلیجان) با استفاده از داده‌های روزانه دوره پایه (۲۰۰۴-۲۰۲۴) و مدل‌های CMIP6 انجام شد. خروجی ۱۱ مدل گردش عمومی جو با پنج شاخص عملکردی MAPE، RMSE، MSE، MAE و R^2 ارزیابی و چهار مدل برتر ACCESS-ESM1-5، CESM2، MPI-ESM1-2-LR و BCC-CSM2-MR انتخاب شدند. نتایج نشان داد مدل CESM2 شبیه‌سازی دما در تمامی ایستگاه‌ها کمترین خطا و بالاترین ضریب تبیین را دارد و به عنوان مدل شاخص ریزمقیاس‌نمایی دما انتخاب شد. برای بارش، بهینه‌ترین مدل بسته به ایستگاه متفاوت بود اما مدل‌های MPI-ESM1-2-LR، BCC-CSM2-MR و ACCESS-ESM1-5 بهترین عملکرد را ارائه دادند. ریزمقیاس‌نمایی آماری با مدل LARS-WG8 تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دو افق آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و آینده میانی (۲۰۶۰-۲۰۴۱) انجام شد. نتایج نشان می‌دهد میانگین دمای حوضه در آینده میانی بین ۰/۶۴ (SSP1-2.6) تا ۱/۲۹ (SSP5-8.5) درجه سانتی‌گراد (SSP5-8.5) افزایش می‌یابد، درحالی‌که سیگنال گرمایش در آینده نزدیک ضعیف‌تر است (۰/۰۵ تا ۰/۳۳ درجه). برخلاف تصور رایج، میانگین بارش حوضه در اغلب سناریوها افزایش جزئی (۱/۵ تا ۷/۲ درصد) دارد، اما این میانگین حوضه‌ای، تحت تأثیر ناهمگونی شدید مکانی می‌باشد. ایستگاه نطنز افزایش قابل‌توجه (تا ۲۵ درصد) و ایستگاه میمه، با وجود بالاترین ارتفاع، کاهش پیوسته (تا ۱۵ درصد تحت SSP5-8.5) را نشان می‌دهد، درحالی‌که کاشان تغییری اندک دارد (۴/۴- تا ۷/۷+ درصد). این یافته‌ها نشان می‌دهد رابطه ساده ارتفاع بیشتر برابر با افزایش بارش بیشتر در این حوضه صدق نمی‌کند و ضرورت پایش ایستگاهی و پیوند این خروجی‌ها با مدل مدیریت منابع آب WEAP را تأیید می‌کند.	نوع مقاله: مقاله کامل علمی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

واژه‌های کلیدی:

CMIP6
LARS-WG

سناریوهای SSP

ناهمگونی مکانی بارش

مدل‌های GCM

مدیریت منابع آب

استناد: آقایی، مریم؛ علوی‌نیا، سیدحسن؛ قاسمیه، هدی (۱۴۰۵). انتخاب مدل بهینه CMIP6 و ناهمگونی مکانی

پیش‌بینی‌های ریزمقیاس شده بارش و دما در یک حوضه نیمه‌خشک، مرکز ایران. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و

هوایی، ۷ (۲۷)، ۱۲۶-۱۰۵.



مقدمه

تغییر اقلیم از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست‌ویکم، اثرات عمیقی بر چرخه هیدرولوژیک جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، برجای گذاشته است (IPCC^۱, 2021). این تغییرات به‌ویژه در کمربند خشک خاورمیانه و شمال آفریقا با شدت بیشتری بروز کرده و این منطقه را در زمره آسیب‌پذیرترین نواحی جهان در برابر تغییر اقلیم قرار داده است (Azad and Ahmadi, 2024). بررسی آمار بلندمدت دما و بارش ایران نشان می‌دهد افزایش گازهای گلخانه‌ای، الگوهای بارش را در پهنه‌های مختلف کشور به‌گونه‌ای متفاوت بازآرایی می‌کند و مناطق مرکزی کشور را با عدم قطعیت و ناهمگونی بیشتری نسبت به تغییرات بارش روبه‌رو می‌کند (Naderi et al., 2025). ایران با قرارگیری در کمربند خشک جهان، پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی در برابر این تغییرات دارد. تحلیل روند گرمایش حوضه‌های رودخانه‌ای ایران در بازه ۱۹۵۰-۲۰۴۰ نیز تشدید روند گرمایش را در بیشتر حوضه‌های کشور را تأیید کرده است (Rousta et al., 2026)، در حالی که رفتار بارش به‌شدت وابسته به منطقه بوده و کاهش بارش مؤثر در بسیاری از حوضه‌های داخلی کشور پیش‌بینی می‌شود. این شرایط می‌تواند فشار مضاعفی بر منابع آب، کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی وارد کند (IPCC, 2021). حوضه‌های آبخیز بسته فلات مرکزی (مانند حوضه کاشان) به دلیل ویژگی‌های اقلیمی خاص، محدودیت منابع آب سطحی، وابستگی شدید به آبخوان‌ها و نرخ بالای برداشت از منابع زیرزمینی، بیش از سایر مناطق در معرض پیامدهای تغییر اقلیم قرار دارد (Motagh et al., 2008). کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها، افزایش تبخیر-تعرق، افت سطح آب زیرزمینی و گسترش فرونشست زمین از مهم‌ترین مخاطراتی هستند که آینده توسعه پایدار این منطقه را تهدید می‌کنند. بنابراین، شناخت رفتار آینده متغیرهای اقلیمی در مقیاس حوضه آبخیز، یکی از الزامات اصلی برنامه‌ریزی منابع آب و تدوین

سیاست‌های سازگاری محسوب می‌شود (Naderi et al., 2025).

استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs^۲) رویکردی اساسی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی (مانند دما و بارش) تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌شمار می‌رود (Alasqah et al., 2025). نسل ششم این مدل‌ها در قالب مجموعه CMIP6 معرفی شده و نسبت به CMIP5 از قدرت تفکیک مکانی بالاتر و جایگزینی سناریوهای مسیر غلظت نماینده (RCP^۳) با سناریوهای مسیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP^۴) بهره می‌برد (Alasqah et al., 2025; Hamed et al., 2022). با این حال، خروجی این مدل‌ها به‌دلیل تفکیک مکانی درشت (معمولاً ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر)، مستقیماً در مطالعات هیدرولوژی مقیاس حوضه‌ای قابل استفاده نیست و نیازمند ریزمقیاس‌نمایی است (Azad and Ahmadi, 2024). از میان روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری، مولد آب‌وهوای احتمالاتی LARS-WG به‌طور گسترده در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک به‌کار رفته است. نسخه ارتقاء یافته آن (LARS-WG8) و نسخه اصلاح‌شده M-LARS-WG در مطالعات اخیر روی تهران برای پیش‌بینی خشکسالی تحت چهار سناریوی SSP-RCP از CMIP6 به‌کار گرفته شده‌اند (Khazaei, 2025). در مقیاس منطقه‌ای، عملکرد ترکیبی LARS-WG و SDSM در غرب ایران مقایسه و کارایی مناسب LARS-WG در بازتولید ساختار دوره‌های خشک و تر تأیید شده است (Lotfi et al., 2022)، و کاربرد توأمان LARS-WG و CMIP6 در مرز غربی ایران (کردستان عراق) نیز برای برآورد تغییرات دما و بارش گسترش یافته است (Abdulsahib et al., 2024).

ارزیابی و انتخاب مدل‌های GCM مناسب برای هر منطقه، از مراحل کلیدی هر مطالعه ریزمقیاس‌نمایی است (Toosi et al., 2020)، زیرا هیچ مدل واحدی در همه مناطق و برای همه متغیرها برتری مطلق ندارد

². General Circulation Model

³. Representative Concentration Pathways

⁴. Shared Socioeconomic Pathways

¹. Intergovernmental Panel on Climate Change

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی دقیق و پیش‌بینی سناریومحور تغییرات اقلیمی منطقه‌ای بر پایه جدیدترین خروجی‌های گزارش ارزیابی ششم (CMIP6) و ابزار ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG8 است. در این راستا، ابتدا کارایی ۱۱ مدل اقلیمی CMIP6 در شبیه‌سازی اقلیم تاریخی منطقه بر اساس شاخص‌های عملکردی آماری MAE ، MSE ، $RMSE$ ، $MAPE$ و R^2 به تفکیک هر ایستگاه و هر متغیر مورد ارزیابی قرار گرفت تا به جای فرض یک مجموعه ثابت مدل برای کل حوزه، مدل‌های بهینه برای هر متغیر و ایستگاه به صورت مستقل انتخاب شوند. سپس، با ریزمقیاس‌نمایی آماری متغیرهای دمای میانگین و بارش روزانه، تغییرات اقلیمی آینده تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دو دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۶۰ و ۲۰۲۱-۲۰۴۰ پیش‌بینی گردید.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های هیدرومورفوکلیماتیک منطقه مطالعه: حوزه آبخیز دشت کاشان، از زیرحوضه‌های کلیدی فلات مرکزی ایران و حوزه آبریز دریاچه نمک، در محدوده جغرافیایی $45^{\circ}50'$ تا $40^{\circ}51'$ طول شرقی و $33^{\circ}10'$ تا $34^{\circ}15'$ عرض شمالی واقع شده است و بخش‌های عمده‌ای از شهرستان‌های کاشان، نطنز و آران و بیدگل را دربر می‌گیرد (شکل ۱). توپوگرافی این منطقه به شدت ناهمگن است، از ارتفاعات رشته‌کوه کرکس در جنوب و غرب (حداکثر ارتفاع بیش از ۳۵۹۰ متر) تا دشت‌های هموار و ساختار کویری در شمال و شرق (حداقل ارتفاع حدود ۷۵۳ متر). این اختلاف ارتفاع در فواصل مکانی کوتاه، همان‌طور که در نتایج این پژوهش و دیگر مطالعات (Mariam et al., 2025) نیز مشهود است، به گرا دیان اقلیمی پیچیده و غیریکنواختی می‌انجامد که لزوماً از الگوی ساده ارتفاع بیشتر، بارش بیشتر پیروی نمی‌کند.

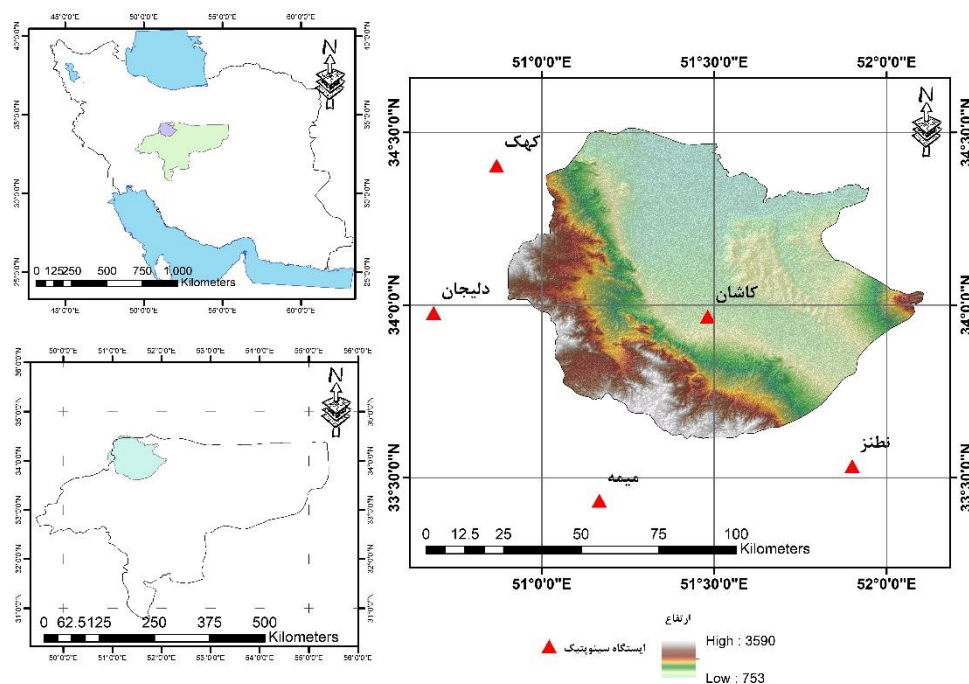
مطالعات مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نرخ فرونشست دشت کاشان را بیش از ۹۰ میلی‌متر

(Çelik et al., 2025). ارزیابی جامع اخیر ۴۰ مدل CMIP6 روی ایستگاه‌های سینوپتیک سراسر ایران نشان داد رتبه مدل‌ها به شدت به شاخص ارزیابی و متغیر موردنظر وابسته است و ترکیب یا انتخاب هدفمند مدل‌ها به طور محسوسی خطا را نسبت به انتخاب تصادفی کاهش می‌دهد (Azad and Ahmadi, 2024). ارزیابی چندمعیاره مشابهی با داده پایه UDEL در کل کشور نیز بر ناهمگونی مکانی عملکرد مدل‌ها تأکید کرده است (Zabihi and Ahmadi, 2024)، و در مقیاس منطقه‌ای‌تر، ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 روی ایران و مناطق پیرامونی با داده‌های بازتحلیل ERA5 الگوی مشابهی از پراکندگی عملکرد را نشان داده است (Zareian et al., 2024). در سطح منطقه‌ای MENAP، ارزیابی ۱۱ مدل CMIP6 تحت سه سناریوی SSP و مقایسه آن با دوره پایه، طراحی مشابهی با پژوهش حاضر را دنبال کرده است (Mesgari et al., 2022). در سطح ملی، مطالعه مقایسه‌ای CMIP6 و CMIP5 در شمال شرق ایران برتری نسبی خروجی‌های CMIP6 در بازتولید بارش مشاهداتی را نشان داده (Zamani et al., 2020)، و ارزیابی اثر سناریوهای RCP بر دما و بارش ایران روند صعودی قطعی دما را در اکثر پهنه‌های کشور تأیید کرده است (Doulabian et al., 2021). در سطح حوزه‌ای، بررسی خشکسالی‌های آتی ایران با ۴۱ مدل CMIP6 افزایش معنادار فراوانی و شدت خشکسالی را برای دهه‌های آینده پیش‌بینی کرده است (Yousefi et al., 2024).

با وجود این پیشرفت‌ها، شکاف علمی محسوسی در حوزه کاشان دیده می‌شود و بیشتر مطالعات پیشین در فلات مرکزی ایران مبتنی بر داده‌های CMIP5 بوده و یا بر یک ایستگاه منفرد متمرکز بوده‌اند و رفتار نوسانی-ارتفاعی حوزه را به طور جامع پوشش نداده‌اند. این پژوهش با پوشش هم‌زمان ۵ ایستگاه سینوپتیک کلیدی، ارزیابی ۱۱ مدل GCM از نسل CMIP6 و انتخاب مدل بهینه به جای فرض یکنواختی عملکرد مدل‌ها در سطح حوزه، درصدد رفع این خلأ برآمده است.

به پایین‌ترین حد رسانده است (Ashraf et al., 2021; Motagh et al., 2008). افزایش تقاضای برداشت برای جبران کسری آب ناشی از خشکسالی‌های اقلیمی، تخلیه منافذ لایه‌های آبرفتی را به همراه داشته و فرآیند تحکیم ناپایدار خاک و فرونشست زمین را شتاب بخشیده است، به طوری که فرونشست در این منطقه را می‌توان پیامد مستقیم و انباشت‌یافته‌ی نوسانات اقلیمی و فشار بر منابع آب زیرزمینی دانست (Hasan et al., 2023; Herrera-García et al., 2021).

در سال برآورد کرده‌اند (Shami et al., 2022). این یافته‌ها با گزارش ملی اخیر مبتنی بر سنجش از دور درباره گسترش فرونشست در دشت‌های ممنوعه ایران هم‌راستا است (Haghshenas Haghighi and Motagh, 2024). شواهد علمی و هیدرولوژی منطقه‌ای تأیید می‌کنند که در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک فلات مرکزی ایران (مانند دشت کاشان)، تغییرات اقلیمی از طریق کاهش بارندگی، افزایش دمای هوا و تشدید تبخیر-تعرق، فرآیند تغذیه طبیعی آبخوان‌ها را به شدت محدود کرده و سطح تراز آب‌های زیرزمینی را



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان

کامل و بدون نقص روزانه در تمامی ایستگاه‌های پنج‌گانه صورت گرفته است. با این حال، عدم قطعیت ناشی از کوتاه‌تر بودن این دوره نسبت به بازه استاندارد ۳۰ ساله در بخش روش‌شناسی لحاظ شده است. همچنین کنترل کیفیت داده‌های هواشناسی در سه گام شامل بررسی داده‌های گمشده، شناسایی مقادیر پرت با استفاده از آستانه سه برابر انحراف معیار و ارزیابی همگونی داده‌ها با آزمون منحنی جرم مضاعف انجام گردید.

شبکه دیده‌بانی و داده‌های هیدرو-اقلیمی دوره پایه: در این مطالعه از داده‌های روزانه بارش و دمای پنج ایستگاه سینوپتیک کاشان، نطنز، میمه، کهک و دلجان استفاده شد. دوره آماری پایه، بازه بیست و یکساله ۲۰۲۴-۲۰۰۴ است. داده‌های دریافت شده از سازمان هواشناسی کشور شامل دمای حداکثر، حداقل و میانگین روزانه و همچنین بارش روزانه می‌باشد. جدول ۱ مشخصات ارتفاعی و میانگین‌های اقلیمی محاسبه شده هر ایستگاه در دوره پایه را نشان می‌دهد. انتخاب دوره پایه ۲۱ ساله به دلیل دسترسی به آمار

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه مورد مطالعه در دوره بلندمدت تأسیس تا سال ۲۰۲۴

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	میانگین دمای سالانه (°C)	بارش سالانه (mm)
کاشان	51° 29'	33° 56'	955	19.92	108.1
دلیجان	51° 41'	33° 59'	1524	16.60	172.1
کهنک	51° 52'	33° 24'	1403	17.22	152.4
میمه	51° 10'	33° 26'	1980	12.48	170.1
نطنز	51° 54'	33° 32'	1685	16.15	156.3
میانگین حوضه	—	—	1509	16.47	151.8

یک سری زمانی یکپارچه و بدون وقفه برای کل دوره پایه (۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴)، از تلفیق دو بخش از داده‌های مدل‌های CMIP6 استفاده شد. ابتدا داده‌های روزانه مربوط به دوره تاریخی از سال ۲۰۰۴ تا پایان ۲۰۱۴ استخراج گردید. سپس برای پوشش سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴، داده‌های شبیه‌سازی شده تحت سه سناریوی آینده به‌طور دقیق به انتهای فایل‌های تاریخی متصل شد تا یک دوره پایه همگن ۲۱ ساله شکل گیرد. همچنین، از آنجا که مدل‌های اقلیمی تفکیک مکانی متفاوتی دارند، برای استخراج داده‌های متناظر با هر ایستگاه، از روش درون‌یابی دوقطبی استفاده شد. در این روش، با در نظر گرفتن مختصات دقیق جغرافیایی هر یک از ۵ ایستگاه سینوپتیک حوضه، مقدار متغیرهای اقلیمی از نزدیک‌ترین سلول‌های شبکه استخراج گردید تا خطای مکانی ناشی از جابجایی سلول‌های مدل به حداقل برسد.

مجموعه داده CMIP6 و سناریوهای SSP: در گزارش ششم ارزیابی هیأت بین دول تغییرات اقلیمی، از خروجی مدل CMIP6 استفاده شده که سناریوهای SSP را جایگزین RCP در گزارش پنجم ارزیابی کرده است. در این پژوهش سه سناریو به کار رفته است که شامل SSP1-2.6 (پایدار، واداشت تابشی $2/6 \text{ W/m}^2$ تا ۲۱۰۰)، SSP2-4.5 (میان، واداشت تابشی $4/5 \text{ W/m}^2$) و SSP5-8.5 (مبتنی بر سوخت فسیلی، واداشت تابشی $8/5 \text{ W/m}^2$ می‌باشند. همچنین در ادامه خروجی روزانه ۱۱ مدل GCM (جدول ۲) برای دوره تاریخی و دو افق آتی (آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و آینده میانی ۲۰۴۱-۲۰۶۰) دریافت شد. این افق‌بندی با چارچوب زمانی مطالعات اخیر روی خشکسالی‌های تهران (که چهار GCM تحت چهار سناریوی SSP-RCP از مجموعه CMIP6 به کار گرفته‌اند و مطالعات منطقه‌ای MENAP قابل مقایسه است (Khazaei, 2025; Mesgari et al., 2022)). برای به دست آوردن

جدول ۲. مشخصات، تفکیک مکانی و مراکز توسعه‌دهنده ۱۱ مدل GCM از مجموعه CMIP6 مورد استفاده در پژوهش

ردیف	نام مدل	موسسه سازنده	کشور	تفکیک اتمسفری	تفکیک زمینی	رفرنس
۱	ACCESS_ESM1_5	CSIRO	Australia	$1.9^\circ \times 1.3^\circ$	250 km	(Ziehn et al., 2019)
۲	BCC_CSM2_MR	BCC	China	$1.1^\circ \times 1.1^\circ$	250 km	(Wu et al., 2019)
۳	CanESM5	CCCma	Canada	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$	500 km	(Swart et al., 2019)
۴	CESM2	NCAR	USA	$1.3^\circ \times 0.9^\circ$	100 km	(Danabasoglu, 2020)
۵	GFDL_ESM4	NOAA	USA	$1.3^\circ \times 1^\circ$	100 km	(Horowitz et al., 2020)
۶	INM_CM5_0	INM	Russia	$2^\circ \times 1.5^\circ$	100 km	(Volodin et al., 2020)
۷	MIROC6	MIROC	Japan	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$	250 km	(Tatebe, 2019)
۸	MPI-ESM1-2-LR	M, DWD, DKRZ	Germany	$1.875^\circ \times 1.865^\circ$	100 km	(Mauritsen et al., 2019)
۹	MRI_ESM2_0	MRI	Japan	$1.1^\circ \times 1.1^\circ$	100 km	(Yukimoto et al., 2019)
۱۰	CMCC-ESM2	CMCC	Italy	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$	100 km	(Lovato et al., 2022)
۱۱	TaiESM1	TCCIP	China	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$	100 km	(Tsai et al., 2020)

شاخص‌ها عبارت‌اند از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) که جهت سنجش میزان انحراف معیار خطاهای پیش‌بینی و حساسیت به خطاهای بزرگ استفاده شد (رابطه ۱)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) که برای اندازه‌گیری میانگین قدر مطلق خطاهای شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن جهت آن‌ها استفاده شد (رابطه ۲)، میانگین مربعات خطا (MSE) برای برآورد میانگین مجذور خطاهای شبیه‌سازی (رابطه ۳)، میانگین درصد قدر مطلق خطا (MAPE) جهت سنجش میزان خطا به صورت درصدی نسبت به مقادیر واقعی (رابطه ۴) و ضریب تبیین (R^2) جهت ارزیابی میزان توانایی مدل در تبیین و توجیه واریانس داده‌های مشاهداتی (رابطه ۵).

(رابطه ۱)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}$$

(رابطه ۲)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i|$$

(رابطه ۳)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2$$

(رابطه ۴)

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right|$$

(رابطه ۵)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$$

در روابط فوق، O_i و P_i به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در روز i ام، $\bar{O}$ و $\bar{P}$ به ترتیب بیانگر میانگین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در طول دوره آماری، و n معرف تعداد کل داده‌های روزانه مورد استفاده در ارزیابی هستند. لازم به ذکر است که تمامی شاخص‌های آماری فوق بر اساس سری زمانی میانگین‌های ماهانه محاسبه شده‌اند تا عدم هم‌فازی روزانه در خروجی مدل اقلیمی، بر ارزیابی عملکرد کلی آن تأثیرگذار نباشد. امتیاز مرکب نهایی برای متغیر دما بر اساس ۵ شاخص RMSE، MSE، MAE، MAPE و R^2

ارزیابی مدل‌ها و انتخاب مدل بهینه: از آنجا که مدل‌های GCM فرضیات ساختاری و تفکیک مکانی متفاوتی دارند، عملکردشان در نواحی با توپوگرافی ناهمگون یکسان نیست. این ناهمگونی در پژوهش اخیر ارزیابی‌های چندمعیاره CMIP6 در ایران به وضوح بیان شده است (Azad and Ahmadi, 2024; Zabihi and Ahmadi, 2024; Zareian et al., 2024). بر این اساس استفاده از میانگین ترکیبی مدل‌های برتر، عدم قطعیت ساختاری انتخاب مدل را کاهش می‌دهد.

مدل‌های گردش عمومی (GCMها) به صورت گسترده برای شبیه‌سازی اقلیم‌های گذشته و تولید متغیرهای اقلیمی آینده به کار گرفته می‌شوند (Maraun et al., 2010). با این حال، به دلیل تفاوت‌های موجود میان هر یک از این مدل‌ها، از جمله قدرت تفکیک (ریز یا درشت)، سازوکار پاسخ اقلیمی (ریزگردها، و سیکلون‌های خشکی، اقیانوسی و جوی) و مقیاس‌های مکانی-زمانی، عدم قطعیت قابل توجهی در برآورد کاربردهای منطقه‌ای GCMها وجود دارد (Jain et al., 2019). از این‌رو، به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌ها هنگام به‌کارگیری این مدل‌ها، تحلیل تک‌تک GCMهای انتخاب‌شده نیازی ضروری است. ارزیابی عملکرد شبیه‌سازی GCMها عموماً از طریق مقایسه آن‌ها با داده‌های بازتحلیل یا داده‌های مشاهداتی اقلیمی صورت می‌پذیرد. تاکنون شاخص‌های متعددی توسط پژوهشگران مختلف در حوزه مدلسازی اقلیمی استفاده شده است. راجو و کومار با مرور بیش از صدها پژوهش انجام‌شده روی مدل‌های اقلیمی به بررسی برترین GCMها پرداختند (Raju et al., 2020). آنان استفاده از شاخص‌های دسته‌بندی‌شده، نظیر خطای سنجش و ضریب همبستگی را هنگام ارزیابی GCMها توصیه کردند.

در پژوهش حاضر، به‌منظور ارزیابی دقیق توانمندی و دقت شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی، عملکرد ۱۱ مدل مورد بررسی با استفاده از پنج شاخص آماری معتبر سنجش خطا و همبستگی ارزیابی گردید. این

نتایج

به منظور معرفی مدل‌های بهینه برای هر ایستگاه در دوره پایه، پنج شاخص آماری MAE ، MSE ، $RMSE$ ، $MAPE$ و R^2 صرفاً بر اساس مقایسه داده‌های دوره تاریخی مدل‌های CMIP6 با داده‌های مشاهداتی دوره پایه محاسبه گردید. سپس بر اساس نمره مرکب به دست آمده از این شاخص‌های آماری، مدل‌ها رتبه‌بندی شده و مدل‌های برتر برای پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده انتخاب شدند. نمودار تیلور امکان مقایسه شبیه‌سازی‌ها مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی را با استفاده از ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و انحراف معیار را بین خروجی مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی فراهم می‌سازد (Taylor, 2001). همبستگی بالا و میزان خطای اندک، نشان‌دهنده مناسب بودن مدل‌های گردش عمومی (GCM) انتخاب شده برای سیستم اقلیمی منطقه‌ای است. از این رو، در پژوهش حاضر از نمودار تیلور به منظور مقایسه خروجی‌های CMIP6 با داده‌های منطقه‌ای و متعاقباً شناسایی برترین GCM‌های CMIP6 برای مدلسازی دما و بارش در سراسر حوزه دشت کاشان استفاده شد (شکل ۲ و ۳). این نمودار بر اساس رابطه هندسی میان سه شاخص آماری شامل ضریب همبستگی پیرسون (R)، انحراف معیار نرمال شده و خطای میانگین مربعات استوار است. لازم به ذکر است که مقادیر R^2 ارائه شده در جداول ارزیابی، حاصل توان دوم ضریب همبستگی پیرسون به کار رفته در این نمودارها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد مدل CESM2 در هر پنج ایستگاه حوزه (نطنز، دلیجان، کهک، میمه و کاشان) بدون استثنا کمترین $RMSE$ میانگین (در بازه ۰/۵۵ تا ۰/۸۹ درجه سانتی‌گراد) را در مقایسه با ۱۰ مدل دیگر داراست. این یکنواختی در عملکرد، مستقل از تفاوت‌های ارتفاعی و اقلیمی میان ایستگاه‌ها، شواهد قوی برای معرفی CESM2 به عنوان مدل منتخب یکتا و پایه برای ریزمقیاس‌نمایی دمای کل حوزه کاشان فراهم می‌آورد (جدول ۳).

محاسبه شد. اما برای متغیر بارش، به دلیل حساسیت شدید شاخص $MAPE$ به روزهای بدون بارندگی و مقادیر نزدیک به صفر در اقلیم دشت کاشان، این شاخص از فرآیند امتیازدهی نهایی حذف گردید و رتبه‌بندی مدل‌های بارش صرفاً بر اساس تلفیق ۴ شاخص تفاضلی و همبستگی شامل $RMSE$ ، MSE ، MAE و R^2 انجام گرفت تا از انحراف عددی رتبه‌بندی جلوگیری شود. به منظور ادغام شاخص‌های ارزیابی با جهات و مقیاس‌های متفاوت، ابتدا تمامی شاخص‌ها با استفاده از روش نرمال‌سازی کمینه-بیشینه به مقادیر بی‌بعد بین ۰ و ۱ تبدیل شدند. برای شاخص‌هایی که جهت مطلوب آن‌ها صعودی است (مانند ضریب R^2 از رابطه (۶) و برای شاخص‌های خطا که جهت مطلوب آن‌ها نزولی است (MSE ، $RMSE$ ، MAE و $MAPE$) از رابطه (۷) استفاده گردید.

$$S_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j,min}}{X_{j,max} - X_{j,min}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$S_{ij} = \frac{X_{j,max} - X_{ij}}{X_{j,max} - X_{j,min}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

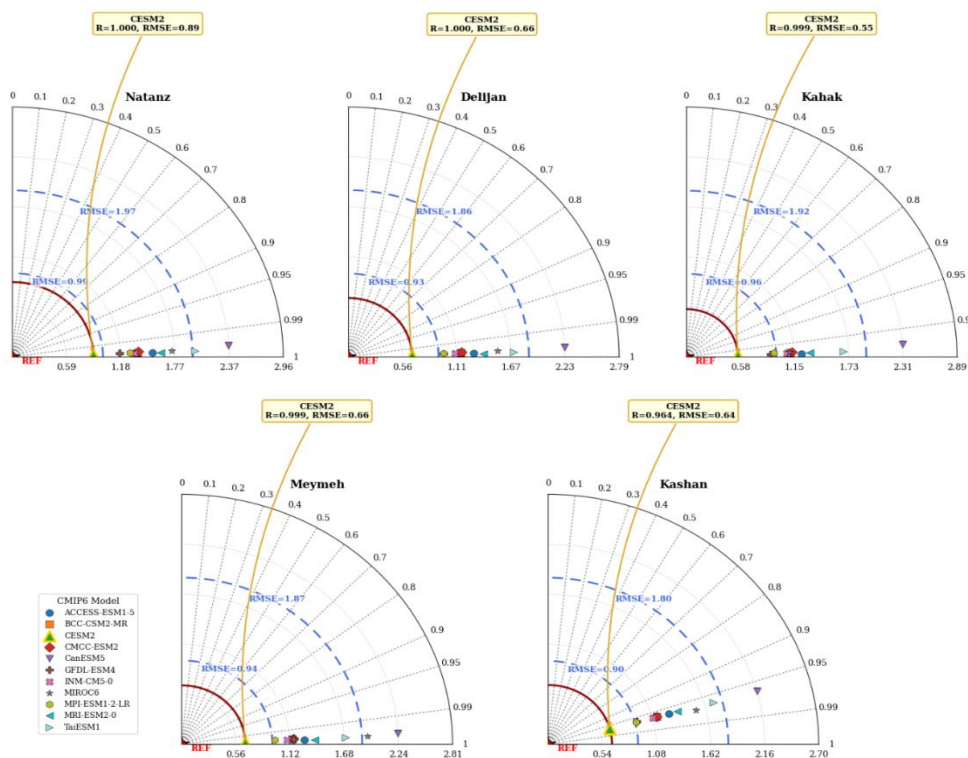
که در آن X_{ij} مقدار خام شاخص j برای مدل i و $X_{j,max}$ و $X_{j,min}$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار آن شاخص در میان تمامی ۱۱ مدل هستند. امتیاز نهایی هر مدل از میانگین‌گیری ساده با وزن یکسان از امتیازهای نرمال شده محاسبه شد (رابطه ۸):

$$CS_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M S_{ij} \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن M تعداد شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده است. استفاده همزمان از $RMSE$ (به عنوان خطای فیزیکی هم‌واحد با متغیر) و MSE (به عنوان وزن‌دهنده به خطاهای بزرگ و مقادیر فرین) تضمین‌کننده انتخاب مدلی با کمترین نوسانات شدید شبیه‌سازی است. به منظور شفاف‌سازی رویه تحلیل، لازم به ذکر است که ارائه خروجی تمامی ۱۱ مدل CMIP6 در نمودارهای پیش‌بینی، صرفاً جهت نمایش محدوده عدم قطعیت و دامنه پراکندگی پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی صورت گرفته است. با این حال، برای محاسبات عددی نهایی و ریزمقیاس‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آینده، تنها از خروجی مدل‌های بهینه منتخب استفاده شده است.

جدول ۳. مدل بهینه اقلیمی هر ایستگاه برای متغیر دما

ایستگاه	مدل منتخب	MAE	MSE	RMSE	MAPE	R ²
نطنز	CESM2	0.830	0.783	0.885	7.87	0.9991
دلیجان	CESM2	0.598	0.432	0.657	5.55	0.9992
کهک	CESM2	0.487	0.305	0.552	4.41	0.9988
میمه	CESM2	0.602	0.436	0.660	15.22	0.9989
کاشان	CESM2	0.593	0.410	0.640	4.18	0.9300



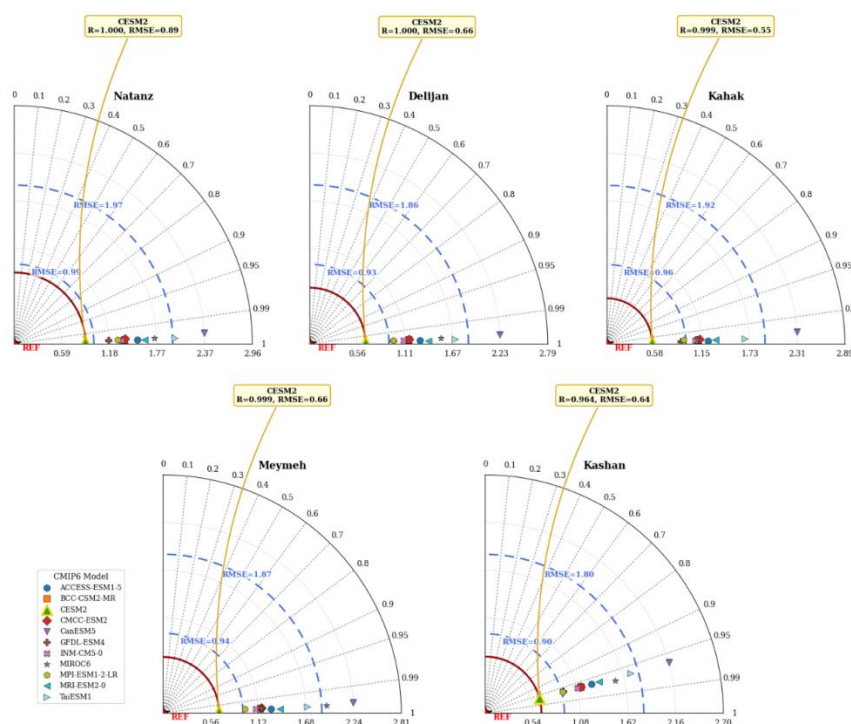
شکل ۲. نمودارهای تیلور دما برای هر GCM در هر ایستگاه

دادند. این تفاوت الگو در مقایسه با یکنواختی کامل مشاهده شده برای دما، بازتاب حساسیت بیشتر بارش به ویژگی‌های موضعی توپوگرافی و عدم قطعیت ذاتی بالاتر مدل‌های GCM در شبیه‌سازی این متغیر است، و ضرورت انتخاب مدل به صورت مجزا برای هر ایستگاه (به جای فرض یک مدل بهینه واحد در سطح حوضه) را برای مؤلفه بارش تأیید می‌کند (جدول ۴). دستیابی به R^2 بالا در این ارزیابی، ناشی از مقایسه رفتار اقلیمی مدل در مقیاس تجمعی ماهانه و همچنین اعمال فرایند تصحیح خطاهاست که توانسته توزیع آماری بارش را به خوبی بازتولید نماید.

به منظور انتخاب مدل بهینه، عملکرد ۱۱ مدل CMIP6 برای مؤلفه بارش در سطح هر ایستگاه بر اساس انحراف از داده‌های مشاهداتی دوره پایه (تاریخی ۲۰۰۴-۲۰۲۴) ارزیابی گردید. برخلاف متغیر دما، نتایج نشان‌دهنده عدم یکنواختی مکانی در انتخاب مدل بهینه برای متغیر بارش است که ضرورت ارزیابی ایستگاهی را تأیید می‌کند. مدل-ACCESS-ESM1-5 در ایستگاه‌های کهک، میمه و کاشان کمترین RMSE میانگین را داراست (به ترتیب ۰/۰۸، ۰/۱۰ و ۰/۰۷ میلی‌متر)، در حالی که در ایستگاه دلیجان مدل CanESM5 و در ایستگاه نطنز مدل MPI-ESM1-2-LR عملکرد میانگین بهتری نشان

جدول ۴. مدل بهینه اقلیمی هر ایستگاه برای متغیر بارش

ایستگاه	مدل منتخب	MAE	MSE	RMSE	R ²
نطنز	MPI-ESM1-2-LR	0.100	0.022	0.153	0.8887
دلیجان	CanESM5	0.097	0.018	0.132	0.8778
کهنک	ACCESS-ESM1-5	0.062	0.007	0.080	0.9513
میمه	ACCESS-ESM1-5	0.070	0.010	0.102	0.9225
کاشان	ACCESS-ESM1-5	0.048	0.006	0.070	0.9800



شکل ۳. نمودارهای تیلور بارش برای هر ایستگاه GCM

کمترین میزان خطا و بالاترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی نشان دادند، به‌عنوان مجموعه مدل‌های بهینه جهت تولید سناریوهای اقلیمی آتی در حوضه کاشان انتخاب شدند. برای مؤلفه دما، مدل CESM2 در تمامی پنج ایستگاه و در تقریباً تمامی ترکیب‌های سناریو-دوره، کمترین RMSE و بالاترین R² را در مقایسه با ۱۰ مدل دیگر نشان داد و به‌عنوان مدل منتخب واحد برای ریزمقیاس‌نمایی دما انتخاب شد. برای مؤلفه بارش، برخلاف دما، مدل بهینه در سطح حوضه یکنواخت و واحد نبود. در ایستگاه نطنز MPI-ESM1-2-LR و در دلیجان مدل CanESM5، و در ایستگاه‌های کهنک، میمه و کاشان عمده‌تاً مدل ACCESS-ESM1-5 کمترین خطا را نشان دادند.

این یافته‌ها با نتایج مطالعات مشابه در مناطق نیمه‌خشک (یحیوی دیزج و همکاران، ۱۴۰۴؛ Ara et al., 2026) هم‌راستا است که در آن‌ها نیز دقت مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما به‌طور معناداری بیشتر از بارش گزارش شده است. بر این اساس، و بر پایه‌ی معیارهای ارزیابی جدول ۳ و ۴، مدل مناسب برای هر ایستگاه، سناریو و دوره‌ی زمانی به‌صورت جداگانه انتخاب و برای شبیه‌سازی تغییرات آینده به‌کار گرفته شد.

پس از محاسبه شاخص‌های مذکور و رتبه‌بندی جامع مدل‌ها بر اساس میانگین عملکرد آن‌ها، چهار مدل برتر شامل ACCESS-ESM1-5، CESM2، MPI-ESM1-2-LR و BCC-CSM2-MR ک

فرآیند تصادفی غیرایستا با تحلیل فوریه (روند فصلی) و مدل خودبازگشتی مرتبه اول شبیه‌سازی می‌شود (روابط ۱۰ و ۱۱):

$$T(t) = \overline{T}(t) + \sigma(t) \cdot Z(t) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$Z(t) = \phi \cdot Z(t-1) + \varepsilon_t \sqrt{(1-\phi^2)} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن $\overline{T}(t)$ میانگین فصلی، $\sigma(t)$ انحراف معیار فصلی، ϕ ضریب خودهمبستگی تأخیر یک‌روزه و $\varepsilon_t \sim N(0,1)$ است.

فرآیند شبیه‌سازی تصادفی با مدل LARS-WG8 در سه گام مشخص انجام شد. واسنجی که در این گام، ویژگی‌های آماری داده‌های روزانه مشاهداتی در بازه ۱۱ ساله ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴ به مدل معرفی گردید تا پارامترهای اقلیمی منطقه استخراج و در فایل‌های پایه ذخیره شوند. صحت‌سنجی که به منظور ارزیابی توانایی مدل در بازتولید اقلیم منطقه، مدل برای یک دوره ۱۰ ساله مستقل (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴) با ۱۰۰ اجرای شبیه‌سازی تصادفی به کار گرفته شد. در نهایت تولید سناریوهای آتی که با الحاق ضرایب تغییر اقلیم استخراج‌شده از مدل‌های GCM منتخب، ریزمقیاس‌نمایی متغیرها تحت سه سناریوی SSP و برای دو افق زمانی انجام گرفت. به منظور ارزیابی صحت عملکرد مدل در دوره صحت‌سنجی مستقل، از آزمون ناپارامتری کلموگروف-اسمیرنوف جهت مقایسه توزیع فراوانی بارش روزانه و طول دوره‌های خشک و تر، و از آزمون پارامتریک t-test برای مقایسه میانگین‌های ماهانه دما و بارش استفاده شد. نتایج آماری حاصل از این آزمون‌ها در سطح خطای ۵ درصد در جدول ۵ ارائه شده است. مقادیر بالای p-value نرخ پذیرش فرضیه صفر عدم تفاوت معنادار بین داده مشاهداتی و شبیه‌سازی نشان‌دهنده توانمندی عالی مدل LARS-WG8 در بازتولید واقع‌گرایانه رفتار اقلیمی دشت کاشان است.

این ناهمگونی، گویای قابلیت پراکندگی شناخته‌شده توانایی مدل‌های GCM در شبیه‌سازی بارش را در برابر دما (که سیگنال فیزیکی قوی‌تر و همگن‌تری دارد) بازتاب می‌دهد.

مدل مولد آب‌وهوای تصادفی LARS-WG8:

LARS-WG از معتبرترین مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری روزانه است. نسخه هشتم آن با دریافت سیگنال تغییر اقلیم از مدل منتخب CMIP6 (ضریب تغییر ماهانه دما به صورت افزایشی و بارش به صورت ضریبی)، داده‌های روزانه مصنوعی همبسته با اقلیم آتی تولید می‌کند. ضرایب تغییر ماهانه دما و بارش برای هر ایستگاه از تفاضل (برای دما) و نسبت (برای بارش) میانگین‌های ماهانه خروجی هر مدل CMIP6 در دوره آتی نسبت به دوره تاریخی استخراج شد. کاربرد LARS-WG و نسخه‌های اصلاح‌شده آن با ورودی CMIP6/SSP در چند سال اخیر در ایران گسترش یافته است، از جمله در پیش‌بینی خشکسالی تهران با M-LARS-WG (Khazaei, 2025).

شبیه‌سازی بارش روزانه بر پایه فرآیند زنجیره مارکوف مرتبه اول برای تعیین وضعیت روزهای تر و خشک، و توابع توزیع احتمال نیمه‌تجربی برای طول دوره‌های خشک و تر متوالی است (روابط ۸ و ۹).

$$P(W_t | W_{(t-1)}) = p_{(ww)} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$P(W_t | D_{(t-1)}) = p_{(dw)} \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن $P(W_t | W_{t-1})$ احتمال وقوع روز مرطوب به شرط مرطوب بودن روز قبل، p_{ww} احتمال انتقال از حالت مرطوب به مرطوب، $P(W_t | D_{t-1})$ احتمال وقوع روز مرطوب به شرط خشک بودن روز قبل و p_{dw} احتمال انتقال از حالت خشک به مرطوب است. طول دوره‌های خشک و تر متوالی با توابع توزیع احتمال نیمه‌تجربی و ۲۳ خط شکست آستانه‌ای شبیه‌سازی می‌شود تا نوسانات فرین بارش در اقلیم خشک بازتولید شود. همچنین دمای روزانه به صورت

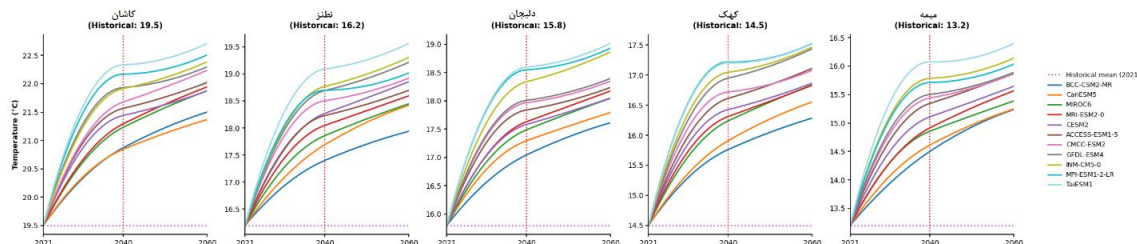
جدول ۵. نتایج آزمون‌های آماری مدل LARS-WG8 در دوره صحت‌سنجی

ایستگاه	قبولی K-S تر/خشک	قبولی K-S بارش	قبولی t-test بارش	قبولی t-test دما	p-value (بارش)	p-value (دما)
نطنز	95.8%	93.5%	91.7%	100%	0.61	0.88
دلیجان	100%	95.2%	100%	100%	0.58	0.91
کهرک	95.8%	94.1%	100%	100%	0.65	0.85
میمه	91.7%	92.8%	91.7%	100%	0.52	0.89
کاشان	100%	98.0%	100%	100%	0.70	0.93

تمامی آزمون‌های آماری در سطح معناداری ۵ درصد ($\alpha=0.05$) انجام شده‌اند.

می‌یابد اما با شیبی ملایم‌تر. همچنین عدم قطعیت و پراکندگی پاسخ مدل‌ها نسبت به یکدیگر در این دوره تا حدودی افزایش پیدا می‌کند. از نظر موقعیت مکانی، ایستگاه کاشان با میانگین تاریخی ۱۹/۵ درجه سانتی گراد، بیشترین مقادیر مطلق دما در آینده را تجربه خواهد کرد و بیشینه دما در برخی مدل‌ها (مانند MPI-ESM1-2-LR و TaiESM1) در پایان دوره (۲۰۶۰) به بیش از ۲۲/۵ درجه سانتی گراد می‌رسد. در مقابل، ایستگاه میمه با دمای پایه تاریخی ۱۳/۲ درجه سانتی گراد، خنک‌ترین ایستگاه منطقه باقی می‌ماند، هرچند که در این ایستگاه نیز روند گرمایش کاملاً مشهود بوده و افزایش دمایی بین ۲ تا ۳ درجه سانتی گراد نسبت به دوره پایه پیش‌بینی می‌شود.

ارزیابی مقادیر پیش‌بینی‌شده دمای سالانه در ۵ ایستگاه مورد مطالعه تحت سناریوهای ۱۱ مدل اقلیمی از مجموعه CMIP6 نشان دهنده یک روند صعودی یکنواخت و قطعی در تمامی ایستگاه‌ها در طول دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۶۰ می‌باشد (شکل ۴). بر اساس این نمودارها، تمامی ۱۱ مدل اقلیمی در تمام ایستگاه‌ها به طور همسو افزایش دما را نسبت به میانگین دوره پایه (تاریخی) پیش‌بینی می‌کنند. در دوره آینده نزدیک شیب افزایش دما در تمامی ایستگاه‌ها بسیار تندتر بوده و مدل‌ها رفتار همگرایی از خود نشان می‌دهند. در این گام زمانی، دما به سرعت از خط پایه تاریخی فاصله گرفته و افزایش صعودی شدیدی را تجربه می‌کند. از سوی دیگر در دوره آینده میانی، روند افزایش دما همچنان ادامه



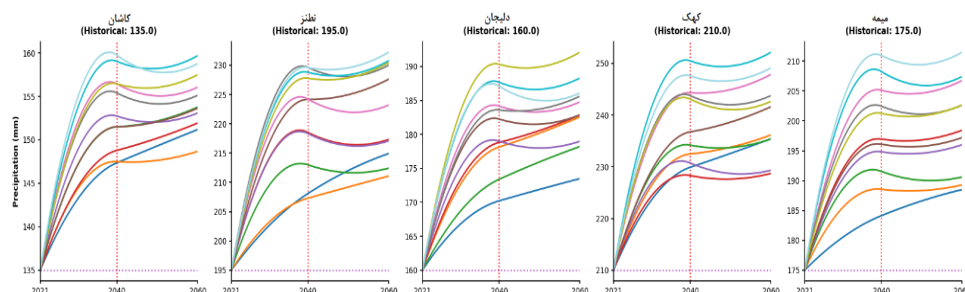
شکل ۴. روند پیش‌بینی تغییرات دمای سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه تحت ۱۱ مدل اقلیمی CMIP6 نسبت به دوره پایه شبیه‌سازی (۲۰۲۴-۲۰۰۴)

منطقه برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۶۰ نشان دهنده پیچیدگی بیشتر و وجود نوسانات و عدم قطعیت‌های رفتاری در مقایسه با متغیر دما است (شکل ۵). با این وجود، بررسی نمودارها نقاط مشترک و الگوی کلی را آشکار می‌سازد که در آینده نزدیک در اکثر ایستگاه‌ها

رسم خروجی تمامی ۱۱ مدل CMIP6 در شکل ۴ و ۵، صرفاً برای نمایش دامنه عدم قطعیت میان‌مدلی است و محاسبات دقیق ریزمقیاس‌سازی آینده بر پایه مدل‌های بهینه منتخب انجام گرفته است. تحلیل رفتار پیش‌بینی‌شده بارش سالانه در ایستگاه‌های پنج‌گانه

نطنز (با پایه ۱۹۵ میلی متر) بالاترین میزان دریافت بارش در آینده را خواهند داشت، به طوری که در برخی مدل‌های پربارش، بارش در ایستگاه کهک تا محدوده ۲۵۰ میلی متر نیز افزایش می‌یابد. در ایستگاه کاشان که خشک‌ترین ایستگاه منطقه محسوب می‌شود (با بارش ۱۳۵ میلی متر)، پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش بارش تا محدوده ۱۴۵ الی ۱۶۰ میلی متر در مدل‌های مختلف است. واگرایی خطوط مدل‌ها در این شکل ۵، لزوم استفاده از روش‌های کاهش عدم قطعیت و رویکرد چندمدلی را برای مدیریت منابع آب منطقه تأکید می‌کند.

(به ویژه دلجان، نطنز، کهک و میمه)، میانگین بارش پیش‌بینی شده توسط اکثر مدل‌ها تا سال ۲۰۴۰ روند صعودی قابل توجهی داشته و تمامی خروجی‌ها بالاتر از مقدار پایه تاریخی قرار می‌گیرند. همچنین رفتار مدل‌ها در آینده میانی و پس از سال ۲۰۴۰، دچار واگرایی و تثبیت نسبی می‌شود. در برخی مدل‌ها، میزان بارش پس از اوج‌گیری در سال ۲۰۴۰، وارد یک فاز کاهشی ملایم شده و سپس در انتهای دوره (۲۰۶۰) مجدداً شیب صعودی خفیفی پیدا می‌کند. دامنه تغییرات بارش در دوره پایه ارزیابی مدل نشان می‌دهد که ایستگاه کهک (با پایه ۲۱۰ میلی متر) و



شکل ۵. روند پیش‌بینی تغییرات بارش سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه تحت ۱۱ مدل اقلیمی CMIP6 نسبت به دوره پایه شبیه‌سازی (۲۰۲۴-۲۰۴۰)

نهایت به ۱/۲۹ درجه تحت سناریوی SSP5-8.5 می‌رسد. این توالی نظام‌مند و یکنواخت با شدت واداشت تابشی، اعتبار درونی نتایج مدل CESM2 را تأیید می‌کند. این یافته‌ها با شواهد منطقه‌ای و بین‌المللی همسو است. در حوضه بسته دریاچه ارومیه که از نظر ماهیت هیدرولوژیک (حوضه داخلی بدون خروجی به دریای آزاد) با فلات مرکزی ایران قابل مقایسه است (Yahyavi Dizaj et al., 2025). در این مطالعه با استفاده از مدل‌های CMIP6 نشان داده شد که افزایش دمای حداقل و حداکثر مستقیماً تبخیر و تعرق مرجع را افزایش می‌دهد، الگویی که با روند افزایشی قطعی دمای پیش‌بینی شده در حوضه کاشان (جدول ۶) و پیامدهای آن بر بیلان آبی همخوانی دارد. در مقیاس بین‌المللی نیز، در مطالعه‌ای در رابطه با ارزیابی ۱۵ مدل CMIP6 برای منطقه نیمه‌خشک زاکاتکاس در مکزیک که دارای اقلیمی با ویژگی‌های

بحث

تغییرات پیش‌بینی‌شده دما: خروجی‌های ریزمقیاس شده مبتنی بر مدل CESM2 روند صعودی دما را در همه ایستگاه‌ها و همه سناریوها نشان می‌دهند، اما شدت این روند در افق آینده نزدیک هنوز ضعیف و غیریکنواخت و نوسانی است (جدول ۶). چرا که میانگین حوضه‌ای افزایش دما در بازه ۲۰۴۰-۲۰۲۱ از ۰/۰۵ تا ۰/۳۳ درجه در سناریوی SSP2-4.5 تا ۲۰۲۱-۲۰۴۰ درجه برای سناریوی SSP1-2.6 در نوسان است، الگویی که بازتاب غلبه تغییرپذیری طبیعی بر سیگنال واداشت تابشی در افق نزدیک را نشان می‌دهد، پیش از آنکه واگرایی سناریوهای SSP میانه قرن آشکار شود. در افق آینده میانی این سیگنال به وضوح یکنواخت و متناسب با شدت سناریو می‌شود و افزایش میانگین حوضه از ۰/۶۴ درجه تحت SSP1-2.6 به ۰/۹۱ درجه برای سناریوی SSP2-4.5 و در

میلی‌متر بر ماه) را نشان می‌دهد (Robles Ortiz et al., 2026)، الگوی که مستقیماً با شکاف دقت مشاهده‌شده در پژوهش حاضر بین متغیر دما و بارش (جدول‌های ۳ و ۴) مطابقت دارد.

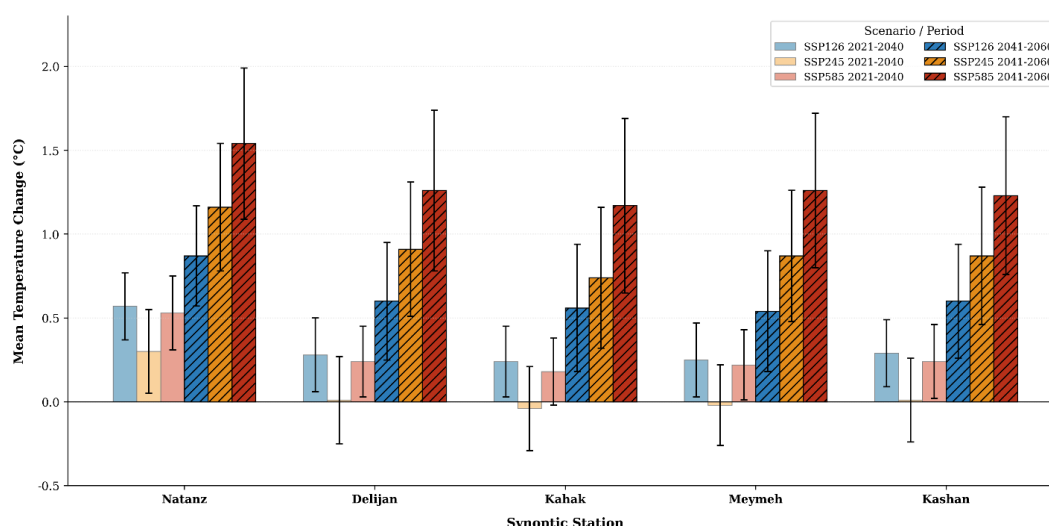
مشابه فلات ایران است، نتایج نشان داد بهترین مدل (BCC-CSM2-MR) خطای دمایی بسیار پایین‌تری (RMSE برابر ۲/۱۵ درجه سانتی‌گراد برای دمای حداکثر) نسبت به بارش (RMSE بین ۳۸ تا ۴۱

جدول ۶. تغییرات پیش‌بینی‌شده میانگین دمای سالانه نسبت به دوره پایه، به تفکیک ایستگاه، سناریو و افق زمانی برای مدل CESM2

ایستگاه	SSP1-2.6 (2021–2040)	SSP1-2.6 (2041–2060)	SSP2-4.5 (2021–2040)	SSP2-4.5 (2041–2060)	SSP5-8.5 (2021–2040)	SSP5-8.5 (2041–2060)
نطنز	+0.57	+0.87	+0.30	+1.16	+0.53	+1.54
دلیجان	+0.28	+0.60	+0.01	+0.91	+0.24	+1.26
کهک	+0.24	+0.56	-0.04	+0.74	+0.18	+1.17
میمه	+0.25	+0.54	-0.02	+0.87	+0.22	+1.26
کاشان	+0.29	+0.60	+0.01	+0.87	+0.24	+1.23
میانگین حوضه	+0.33	+0.64	+0.05	+0.91	+0.29	+1.29

(نظیر کهک و میمه) تغییرات ناچیز است. با این حال، در افق میانی (۲۰۴۱–۲۰۶۰)، سیگنال گرمایش کاملاً یکنواخت شده و بیشترین میزان افزایش دما تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 در ایستگاه نطنز ($^{\circ}\text{C}$) $1/54$ و سپس دلیجان و میمه ($^{\circ}\text{C}$) $1/26$ به ثبت رسیده است.

جزئیات مکانی این تغییرات به تفکیک ایستگاه‌ها و افق‌های زمانی در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، الگوی مکانی ایستگاه‌ها در افق نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۴۰) به‌وضوح نشان‌دهنده ضعیف بودن سیگنال گرمایش است، به‌طوری‌که تغییرات دما در ایستگاه‌ها نوسانی بوده و تحت سناریوی میانه SSP2-4.5 در برخی ایستگاه‌ها



شکل ۶. تغییرات پیش‌بینی‌شده میانگین دمای سالانه نسبت به دوره پایه در ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب تحت سناریوهای مختلف CMIP6 برای افق‌های زمانی نزدیک و دور بر اساس مدل CESM2

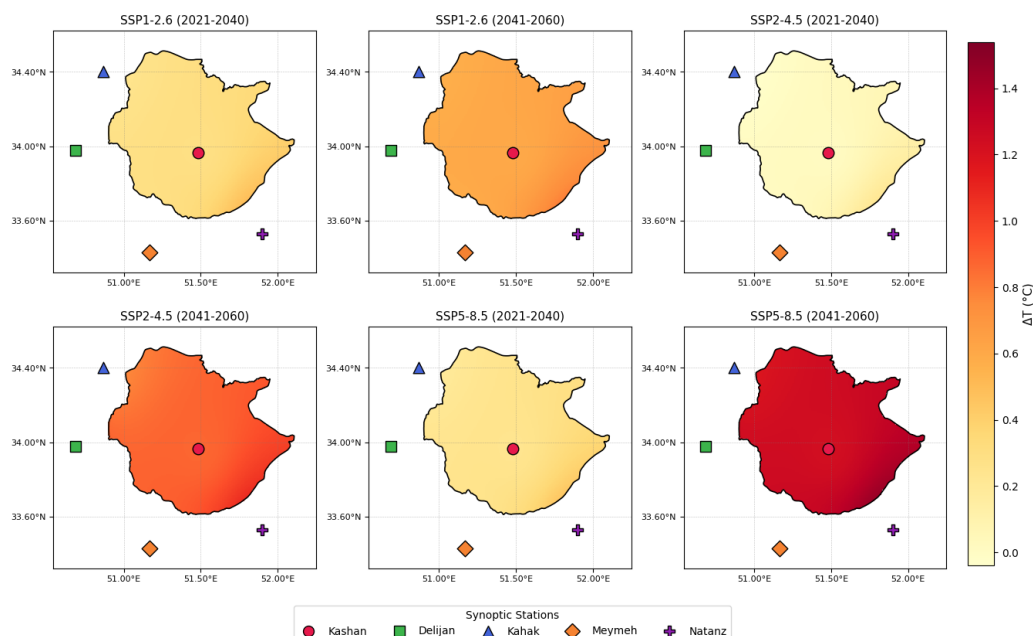
وزنی در شکل ۷ ارائه شده‌اند. این نقشه‌ها تأیید می‌کنند که سیگنال گرمایش در افق نزدیک به‌ویژه

برای تجسم بهتر الگوی مکانی این تغییرات در سطح حوضه، نقشه‌های درونیابی‌شده دما به روش

و بخش شمال شرقی حوضه (مجاور ایستگاه نطنز) در تمامی سناریوها بیشترین افزایش دما را نشان می‌دهد.

تحت سناریوی SSP2-4.5 نسبتاً ضعیف و از نظر مکانی نسبتاً یکنواخت توزیع شده است. درحالی‌که در افق میانی گرادیان دما به‌وضوح تشدید می‌شود

Spatial Changes in Mean Annual Temperature across the Kashan Plain Basin under SSP Scenarios (2021-2040 and 2041-2060) - CESM2 Model



شکل ۷. توزیع مکانی تغییرات پیش‌بینی‌شده‌ی میانگین دمای سالانه نسبت به دوره‌ی پایه بر اساس مدل CESM2

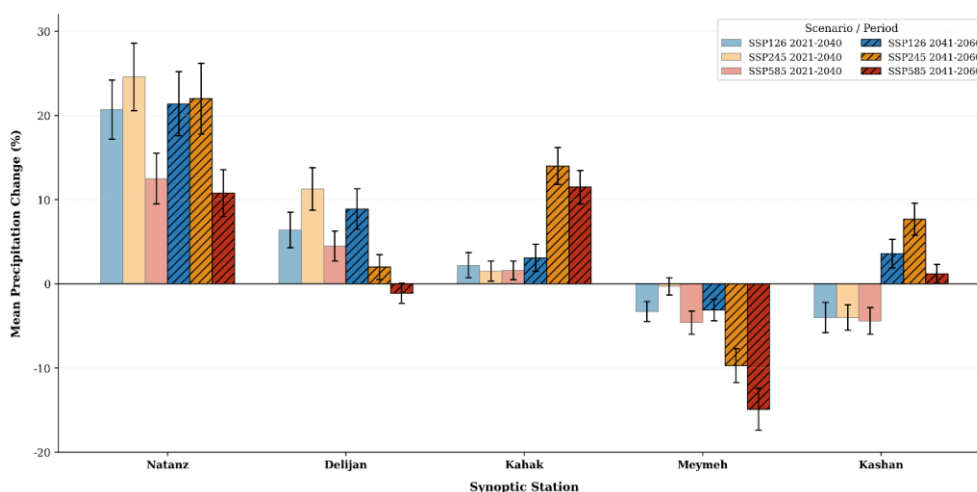
کاهشی در کل حوضه به این ایستگاه مرتفع تعلق دارد. ایستگاه کاشان (کم‌ارتفاع‌ترین ایستگاه) تغییری کوچک و نوسانی را نشان می‌دهد، از ۴/۴- درصد تا ۷/۷+ درصد، یعنی نه یک کاهش پیوسته و بزرگ، بلکه نوسانی حول صفر رخ داده است. در رابطه با ایستگاه‌های دلیجان و کهک باید بیان کرد آن‌ها از الگوی بینابینی و عمدتاً مثبت با شدت کمتر پیروی می‌کنند.

نمودار مقایسه‌ای تغییرات درصد بارش در سطح ایستگاه‌ها به تفکیک سناریوها و افق‌های زمانی نزدیک و دور در شکل ۸ نشان شده است. مطابق این شکل، تمایز آشکار رفتار مکانی ایستگاه‌ها، به‌ویژه تقابل روند افزایشی شدید در نطنز با روند کاهشی یکنواخت در میمه (به‌ویژه افت ۱۴/۹- درصدی تحت سناریوی SSP5-8.5 افق دور) و همچنین تغییرات نوسانی و خط صفر در کاشان، به‌وضوح قابل مشاهده است.

تغییرات پیش‌بینی‌شده بارش: رفتار بارش، برخلاف دما، الگوی به‌مراتب پیچیده‌تر و کمتر یکنواخت را نشان می‌دهد. میانگین حوضه‌ای بارش در اغلب سناریوها افزایشی جزئی را نشان می‌دهد که بیشترین آن در سناریوی SSP2-4.5 آینده میانی (۷/۲ درصد افزایش) و کمترین آن تحت سناریوی SSP5-8.5 آینده میانی (۱/۵ درصد افزایش) رخ می‌دهد، یعنی برخلاف دما، سیگنال بارش با شدت سناریو رابطه یکنواختی را نشان نمی‌دهد. همان‌طور که جدول ۷ نشان می‌دهد، ایستگاه نطنز در تمامی سناریوها افزایش قابل‌توجه و پیوسته‌ای را (۱۰/۸ تا ۲۴/۶ درصد) نشان می‌دهد. از سوی دیگر در ایستگاه میمه با وجود داشتن مرتفع‌ترین ارتفاع در بین پنج ایستگاه در تمامی شش ترکیب سناریو بدون استثنا کاهش را نشان می‌دهد. این کاهش از ۰/۳- درصد تا ۱۴/۹- درصد می‌باشد، یعنی شدیدترین و پیوسته‌ترین روند

جدول ۷. درصد تغییر بارش سالانه نسبت به دوره پایه، به تفکیک ایستگاه، سناریو و افق زمانی در مدل‌های منتخب

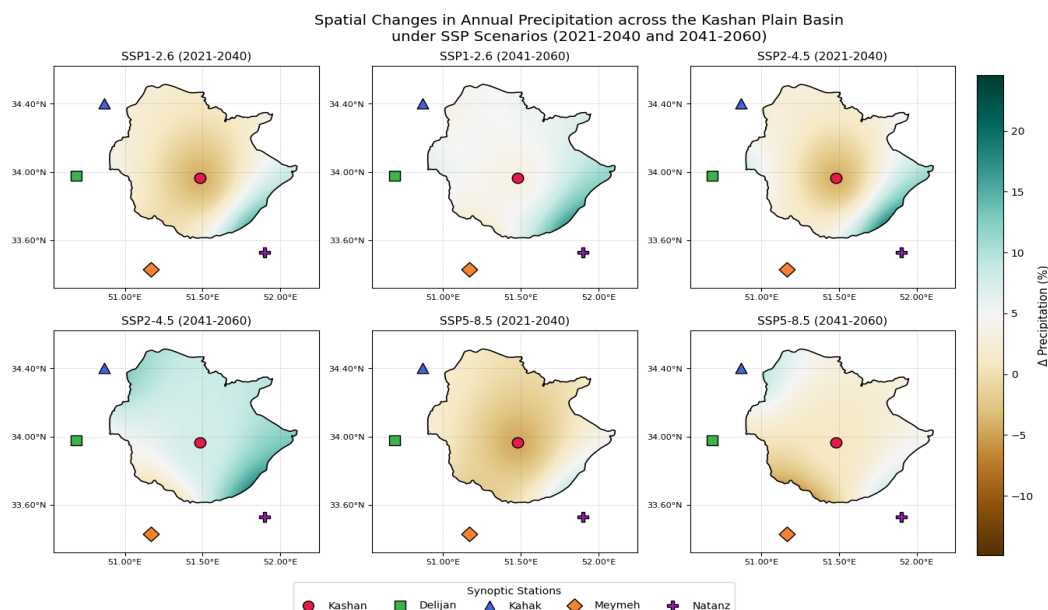
ایستگاه	SSP1-2.6 (2021–2040)	SSP1-2.6 (2041–2060)	SSP2-4.5 (2021–2040)	SSP2-4.5 (2041–2060)	SSP5-8.5 (2021–2040)	SSP5-8.5 (2041–2060)
نطنز	+20.7%	+21.4%	+24.6%	+22.0%	+12.5%	+10.8%
دلیجان	+6.4%	+8.9%	+11.3%	+2.0%	+4.5%	-1.1%
کهک	+2.2%	+3.1%	+1.5%	+14.0%	+1.6%	+11.5%
میمه	-3.3%	-3.1%	-0.3%	-9.7%	-4.6%	-14.9%
کاشان	-4.0%	+3.6%	-4.0%	+7.7%	-4.4%	+1.2%
میانگین حوضه	+4.4%	+6.8%	+6.6%	+7.2%	+1.9%	+1.5%



شکل ۸. تغییرات نسبی پیش‌بینی شده میانگین بارش سالانه نسبت به دوره پایه در ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب تحت سناریوهای مختلف CMIP6 برای افق‌های زمانی نزدیک و دور بر اساس مدل‌های منتخب

در مرتفع‌ترین نقطه‌ی حوضه، در همه سناریوها کاهش پیوسته را تجربه می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که در محدوده ایستگاه‌های مورد مطالعه، الگوی خطی ساده ارتفاع-بارش دیده نمی‌شود با این حال، تعمیم این امر به کل حوضه نیازمند تراکم بیشتر شبکه ایستگاهی است و ضرورت پایش ایستگاهی به‌جای اتکاء به میانگین حوضه‌ای را در برنامه‌ریزی منابع آب برجسته می‌سازد.

شکل ۹ ناهمگونی شدید مکانی بارش در سطح حوضه را که در جدول ۵ به آن اشاره شد، به‌روشنی در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی به روش وزنی نشان می‌دهد. برخلاف الگوی نسبتاً یکنواخت دما (شکل ۸)، توزیع مکانی تغییرات بارش در تمامی سناریوها و افق‌های زمانی یک تضاد پایدار میان بخش شمال شرقی و جنوب غربی حوضه را آشکار می‌سازد. به‌طوریکه ایستگاه نطنز به‌طور مستمر بیشترین افزایش را نشان می‌دهد، درحالی‌که ایستگاه میمه، با وجود قرارگیری



شکل ۹. توزیع مکانی تغییرات پیش‌بینی‌شده‌ی بارش سالانه نسبت به دوره‌ی پایه بر اساس مدل‌های بهینه منتخب هر ایستگاه

کم ایستگاه‌های مشاهداتی است. لذا نقشه‌های درون‌یابی شده صرفاً نمایشگر روندهای نقطه‌ای ایستگاهی در پهنه حوضه بوده و تعمیم قطعی آن به کل نقاط حوضه می‌تواند با عدم قطعیت مکانی همراه است و به عنوان یک ابزار کمکی برای تجسم بصری الگوهای ایستگاهی می‌باشند.

یافته محوری این پژوهش کاهش پیوسته و رو به تشدید بارش در ایستگاه مرتفع میمه در برابر افزایش قابل توجه در ایستگاه مرتفع نطنز، و تغییر کوچک و نوسانی در ایستگاه کم‌ارتفاع کاشان را نشان می‌دهد. تفاوت‌های مشاهده‌شده در رفتار اقلیمی دو ایستگاه نطنز و میمه می‌تواند به‌عنوان یک فرضیه محتمل به عواملی نظیر جهت‌گیری دامنه‌ها، موقعیت توپوگرافی نسبت به رشته‌کوه کرکس و نفوذ سامانه‌های بارشی منطقه‌ای نسبت داده شود. با این حال، اثبات قطعی مکانیسم‌های دینامیکی و سینوپتیکی این تفاوت‌ها نیازمند مدل‌سازی‌های تفکیک بالایی ارتفاعی و تحلیل الگوهای گردش عمومی جو است.

این پیچیدگی با یافته‌های منطقه‌ای زاگرس هم‌راستاست، جایی که کاهش بارش و رواناب تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 گزارش شده

این الگوی ناهمگون مکانی و شکاف دقت دما و بارش در ادبیات بین‌المللی و منطقه‌ای نیز به‌کرات گزارش شده است. لطفی و همکاران (Lotfi et al., 2022) در ارزیابی مدل‌های LARS-WG و SDSM برای ۱۷ ایستگاه در غرب ایران دریافتند هر دو مدل دمای منطقه را با دقت مناسب شبیه‌سازی کردند، اما عملکرد آن‌ها برای بارش به‌مراتب ضعیف‌تر بود. نتیجه‌ای که مستقیماً با تفاوت معیارهای خطا میان جدول ۳ (دما) و جدول ۴ (بارش) در پژوهش حاضر همسو است. در مقیاس بین‌المللی، آرا و همکاران (et al., 2026 Ara) تغییرات بارش در حوضه بویوک مندرس ترکیه (با اقلیم مدیترانه‌ای نیمه‌خشک) را تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و با استفاده از مدل HadGEM3-GC31-LL بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که کاهش بارش در انتهای قرن بین زیرحوضه‌های مختلف بین ۱۵ تا ۲۲ درصد متغیر است که بیانگر پایداری ناهمگونی مکانی حتی درون یک حوضه واحد است. این الگو با رفتارهای متفاوت و متضاد بارش که در پژوهش حاضر میان ایستگاه‌های نطنز، میمه و کاشان مشاهده شد، کاملاً همخوانی دارد (جدول ۷). لازم به ذکر است همانند متغیر دما، تحلیل فضایی بارش نیز تحت تأثیر چگالی

(Rahimi et al., 2025)، اما در سطح خردمقیاس تر و به صورت ناهمگون میان ایستگاه‌های هم‌ارتفاع رخ می‌دهد. با این حال، حتی در غیاب یک روند کاهشی یکنواخت بارش، افزایش قطعی دما (تا $1/29$ درجه در میانگین حوضه تحت سناریوی SSP5-8.5) به‌طور مستقل تبخیر-تعرق بالقوه را افزایش می‌دهد و می‌تواند اثر هرگونه افزایش جزئی بارش را در تعادل آب و خاک را خنثی کند، به‌ویژه در ایستگاه کاشان که در قلب دشت ممنوعه بحرانی و منطقه دارای فرونشست گزارش شده قرار دارد (Shami et al., 2022). کاهش پیوسته بارش در ارتفاعات میمه، در صورت همراهی با احتمال تغییر رژیم بارش از برف به باران، می‌تواند پتانسیل تغذیه فصلی آبخوان پایین‌دست را با چالش مواجه سازد. با این حال، تعیین کمیت دقیق این واکنش هیدرولوژیکی نیازمند شبیه‌سازی‌های مجزا با مدل‌های هیدرولوژیکی آب زیرزمینی در پژوهش‌های آتی است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ریزمقیاس‌نمایی چالش‌های اقلیمی آینده در دشت نیمه‌خشک کاشان بر پایه برون‌داد مدل‌های CMIP6 و فراهم‌آوردن نهاده‌های اقلیمی دقیق برای ورود به مدل‌های هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب (نظیر WEAP) انجام شد. نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی ۱۱ مدل گردش عمومی جو با به‌کارگیری یک چارچوب ارزیابی چندشاخصه نشان داد که عملکرد این مدل‌ها در فلات مرکزی ایران، متأثر از تفاوت در فرضیات ساختاری‌شان، یکسان نیست. بر این اساس، انتخاب و تلفیق ترکیبی از چهار مدل برتر (CESM2، ACCESS-ESM1-5، MPI-ESM1-2-LR و BCC-CSM2-MR) در قالب یک مجموعه چندمدلی توانست دامن‌ه و رفتار عدم قطعیت‌های ناشی از واداشت‌های دینامیکی جو را در مقیاس حوضه دشت کاشان به تصویر کشیده و پوشش دهد تا امکان برنامه‌ریزی پایدار و تاب‌آور منابع آب فراهم گردد. افزون بر این، نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریزمقیاس‌سازی LARS-WG8 با استفاده از شاخص‌های ارزیابی و آزمون‌های آماری

ناپارامتری کلوموگراف-اسمیرنوف و آزمون پارامتریک تی در سطح ۵ درصد نشان می‌دهد که مدل‌های برتر انتخابی از توانایی مناسب و قابل‌قبولی در بازتولید الگو و خصوصیات اقلیمی منطقه برخوردار هستند و خروجی آن‌ها جهت استفاده در ارزیابی‌های اثرات تغییر اقلیم قابل اتکا می‌باشد. تحلیل برون‌دادهای ریزمقیاس‌شده آینده تحت سناریوهای SSP برای دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۶۰)، دو سیگنال اقلیمی متمایز و تعیین‌کننده را برای حوضه آبخیز دشت کاشان آشکار ساخت. از یک سو سیگنال حرارتی بیانگر روند صعودی و قطعی دما است. نتایج شبیه‌سازی، افزایشی همگون و اجتناب‌ناپذیر در دمای تمامی ایستگاه‌های حوضه را نشان می‌دهد. بر این اساس در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، میانگین دمای حوضه در افق آینده میانی تا $1/29$ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. این بی‌نظمی دمایی مثبت، به‌طور مستقیم به تشدید تبخیر-تعرق بالقوه، کاهش رطوبت خاک و افزایش نیاز آبی اراضی کشاورزی دشت کاشان می‌انجامد. همچنین، افزایش چشمگیر دمای حداقل بیانگر دگرگونی در بیلان انرژی شبانه و کاهش دوره یخبندان است. از سویی دیگر در مورد سیگنال بارشی باید بیان کرد که دارای الگویی ناهمگون و دوگانه، برخلاف روند یکنواخت دما، از نظر مکانی و ارتفاعی از خود نشان می‌دهد. در نواحی دشتی و پست حوضه (ایستگاه کاشان)، بارش سالانه تغییری کوچک و نوسانی (بین $4/4$ - تا $7/7$ درصد، بسته به سناریو و افق) نشان می‌دهد که با توجه به موقعیت این ایستگاه در قلب دشت ممنوعه بحرانی کاشان، حتی همین نوسان کوچک، در کنار افزایش قطعی دما و تبخیر-تعرق، می‌تواند به تشدید کسری بیلان آبخوان دامن بزند. در مقابل، در نواحی کوهستانی مرتفع (ایستگاه نطنز)، افزایشی جزئی و فصلی در بارش شبیه‌سازی شد. با این حال، تحلیل‌های اقلیمی نشان می‌دهد که هم‌زمانی این افزایش بارش با گرمایش $1/29$ درجه سانتی‌گراد می‌تواند احتمال تبدیل بارش‌های برفی به باران را در ارتفاعات کرکس افزایش دهد. این تغییر رژیم بارش، در صورت وقوع، این پتانسیل را دارد که با

کاهش ذخیره برفی، زمان‌بندی رواناب سطحی را تغییر داده و خطر رواناب‌های شدید را بیشتر کند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر اقلیم در دشت کاشان صرفاً یک پدیده هواشناسی نیست، بلکه محرکی بحران ساز در سیستم هیدرولوژیکی منطقه به شمار می‌رود. کاهش بارش در دشت، همراه با تشدید تبخیر ناشی از گرمایش هوا، می‌تواند به عنوان یک عامل تشدیدکننده بالقوه بر بیلان آبخوان اثرگذار باشد. این امر همچنین می‌تواند به طور غیرمستقیم فرآیند فرونشست زمین را شتاب بخشد، هرچند که اثبات و کمی‌سازی دقیق این فرآیندها مستلزم شبیه‌سازی‌های مجزای هیدرولوژیکی و آب زیرزمینی در مطالعات آتی است. از سوی دیگر، تغییر رژیم هیدرولوژیکی ارتفاعات کرکس از برفی به بارانی، پایداری جریان‌های سطحی پاییزه و زمستانه را مختل کرده و ورودی آب به دشت را به رواناب‌های سیلابی کوتاه‌مدتی محدود می‌سازد که عمده‌تاً بدون فرصت کافی برای نفوذ به سفره، از دسترس خارج می‌شوند. داده‌های اقلیمی ریزمقیاس‌شده دوره‌های آتی (۲۰۲۱-۲۰۶۰)، پایگاه‌داده‌ای دقیق و حیاتی برای مدل‌ها و سیستم‌های ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب (از قبیل WEAP) در حوضه کاشان فراهم می‌سازد. با ورود این متغیرها به این‌گونه مدل‌ها، امکان شبیه‌سازی سناریوهای پویای عرضه و تقاضای آب در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت فراهم می‌شود و می‌توان اثرات راهبردهای سازگاری، نظیر کاهش داوطلبانه پروانه‌های بهره‌برداری، به‌کارگیری سیستم‌های آبیاری هوشمند، تغییر الگوی کشت به سمت گیاهان کم‌آب‌بر و مقاوم به شوری، و اجرای پروژه‌های پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی را به‌طور کمی بر تراز آب زیرزمینی دشت پایش کرد. از این‌رو با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ارائه مجموعه‌ای از پیشنهاد‌های راهبردی و پژوهشی برای مدیریت ریسک تغییر اقلیم در دشت کاشان الزامی است. برای نمونه بهینه‌سازی الگوی کشت و مدیریت تقاضای آب توسط

وزارت جهاد کشاورزی و ادارات محلی ضروری است. این برنامه‌ها می‌تواند شامل محدودسازی سطح زیر کشت محصولات غرقابی و جایگزینی تدریجی آن‌ها با گیاهان دارویی سازگار با اقلیم منطقه و کم‌آب‌بر باشند. همچنین توسعه و اجرای سازه‌های نوین آبخیزداری و آبخوان‌داری، با توجه به تغییر فاز بارش از برف به باران در ارتفاعات کرکس و افزایش احتمال وقوع سیلاب‌های بهاره، همانند احداث سازه‌های تأخیری، بندهای خاکی و سامانه‌های پخش سیلاب برای کنترل رواناب‌ها و هدایت آن‌ها به مناطق تغذیه مصنوعی آبخوان دشت کاشان پیشنهاد می‌شود. تجهیز چاه‌های کشاورزی به کنتورهای هوشمند، به‌منظور پیشگیری از برداشت‌های بی‌رویه واکنشی ناشی از خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی آتی و اعمال مدیریت سخت‌گیرانه بر دبی تخلیه‌ای از سفره آب زیرزمینی، از طریق بسترسازی قانونی و فناورانه نیز ضروری است.

روندهای پیش‌بینی‌شده برای دما و بارش می‌تواند به‌عنوان سناریوهای محرک، پیامدهای محیطی احتمالی را برای منطقه به همراه داشته باشد. بر همین اساس، افزایش میانگین دما در کنار تغییرات الگوی بارش می‌تواند به طور بالقوه موجب تغییر در رژیم بارش‌ها، افزایش تبخیر و تعرق و در نتیجه فشار بیشتر بر منابع آب زیرزمینی گردد. با این حال، ارزیابی دقیق و کمی پدیده‌هایی نظیر تغذیه آبخوان، میزان رواناب و فرونشست نیازمند بکارگیری مدل‌های هیدرولوژیکی و آب‌های زیرزمینی مستقل بر پایه خروجی‌های این پژوهش است. در نهایت پیشنهاد می‌شود برای مطالعات آتی خروجی‌های اقلیمی این پژوهش پس از استفاده در مدل‌های مدیریت منابع آب نظیر WEAP، در مدل‌های بهینه‌سازی اقتصادی-اجتماعی به کار گرفته شوند تا اثرات سیاست‌های سازگاری اقلیمی بر معیشت کشاورزان، پدیده مهاجرت اقلیمی و پایداری اقتصادی دشت کاشان به صورت نظام‌مند ارزیابی گردد.

منابع

۱. یحیوی دیزج آمنه، اکبری ازیرانی طیبه، جوان خدیجه. (۱۴۰۴). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر دماهای کمینه، بیشینه و تبخیر تعرق مرجع در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل های CMIP ۶ پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز ۱۶ (۱): ۲۶-۱۴. ۲۰۲۴, ۱۲۶۹/jwmr. ۱۰.۶۱۸۸۲
2. Abdulsahib, S. M., Zubaidi, S.L., Almamalachy, Y., & Dulaimi, A. (2024). Temperature and precipitation change assessment in the North of Iraq using LARS-WG and CMIP6 models. *Water*, 16(19), 2869. <https://doi.org/10.3390/w16192869>.
3. Alasqah, A., Tayyeh, H. K., Mohammed, R., Hussein, A. M., Khedher, K. M., & Benzougagh, B. (2025). Integrating double techniques of statistical downscaling and bias correction to reduce bias in projections trends of future climate datasets. *Scientific Reports*, 15(1), 30654. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15483-x>.
4. Ara, I., Yasar, M., & Gurarslan, G. (2026). Assessing climate change impacts on future precipitation using random forest statistical downscaling of CMIP6 HadGEM3 projections in the Büyük Menderes Basin. *Water*, 18(2), 277. <https://doi.org/10.3390/w18020277>.
5. Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific reports*, 11(1), 9135. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y>.
6. Azad, N., & Ahmadi, A. (2024). Assessment of CMIP6 models and multi-model averaging for temperature and precipitation over Iran. *Scientific Reports*, 14(1), 24165. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74789-4>.
7. Çelik, M. Ö., Orhan, O., & Kurt, M. A. (2025). Drivers and impacts of climate change: Comprehensive review of natural and anthropogenic forcing with GCM-based projections. *Geomatics and Environmental Engineering*, 19(5), 71-101. <https://doi.org/10.7494/geom.2025.19.5.71>.
8. Danabasoglu, G., Lamarque, J. F., Bacmeister, J., Bailey, D. A., DuVivier, A. K., Edwards, J., Emmons, L. K., Fasullo, J., Garcia, R. R., Gettelman, A., & Hannay, C. (2020). The Community Earth System Model version 2 (CESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(2), e2019MS001916. <https://doi.org/10.1029/2019MS001916>.
9. Doulabian, S., Golian, S., Toosi, A. S., & Murphy, C. (2021). Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. *Journal of Water and Climate Change*, 12(1), 166-184. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.114>.
10. Elizbarashvili, M., Beglarashvili, N., Pipia, M., Elizbarashvili, E., & Chikhradze, N. (2025). Seasonal temperature and precipitation patterns in Caucasus landscapes. *Atmosphere*, 16(7), 889. <https://doi.org/10.3390/atmos16070889>.
11. Haghshenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2024). Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science Advances*, 10(19), eadk3039. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk3039>.
12. Hamed, M. M., Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2022). Inter-comparison of historical simulation and future projections of rainfall and temperature by CMIP5 and CMIP6 GCMs over Egypt. *International Journal of Climatology*, 42(8), 4316-4332. <https://doi.org/10.1002/joc.7468>.
13. Hasan, M. F., Smith, R., Vajedian, S., Pommerenke, R., & Majumdar, S. (2023). Global land subsidence mapping reveals widespread loss of aquifer storage capacity. *Nature Communications*, 14(1), 6180. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41933-z>.
14. Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., ... & Ye, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34-36. <https://doi.org/10.1126/science.abb8549>.
15. Horowitz, L. W., Naik, V., Paulot, F., Ginoux, P., Dunne, J. P., Mao, J., Schnell, J. L., Chen, X., Lin, M., Lin, S. J., & Malyshev, S. (2020). The GFDL Earth System Model version 4.1 (GFDL-ESM4.1): Model description and simulation characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(10), e2019MS002032. <https://doi.org/10.1029/2019MS002032>.
16. IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
17. Jain, S., Salunke, P., Mishra, S. K., & Sahany, S. (2019). Performance of CMIP5 models in the simulation of Indian summer monsoon: S. Jain et al. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1), 1429-1447. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2674-3>.
18. Khazaei, M. R. (2025). Projected changes to drought characteristics in Tehran under CMIP6 SSP-RCP climate change scenarios. *Heliyon*, 11(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41811>.

19. Lotfi, M., Kamali, G. A., Meshkatee, A. H., & Varshavian, V. (2022). Performance analysis of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulating temperature and precipitation changes in the West of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 4649-4659. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01393-8>.
20. Lovato, T., Peano, D., Butenschön, M., Materia, S., Iovino, D., Scoccimarro, E., Fogli, P. G., Cherchi, A., Bellucci, A., & Gualdi, S. (2022). CMCC-ESM2: Description and evaluation of the CMCC Earth System Model version 2. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(8), e2021MS002814. <https://doi.org/10.1029/2021MS002814>.
21. Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., ... & Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of geophysics*, 48(3). <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>.
22. Mauritsen, T., Bader, J., Becker, T., Behrens, J., Bittner, M., Brovkin, V., Claussen, M., Crispim, J. H., Gayler, V., Giorgetta, M., & Gullbekk, J. (2019). Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and its response to increasing CO₂. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(4), 998–1038. <https://doi.org/10.1029/2018MS001400>.
23. Mesgari, E., Hosseini, S. A., Hemmesy, M. S., Houshyar, M., & Partoo, L. G. (2022). Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the MENAP region. *Journal of Water and Climate Change*, 13(10), 3607-3619. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195>.
24. Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16). <https://doi.org/10.1029/2008GL033814>.
25. Naderi, M. (2025). Projections of major climate change indicators over Iran from 2021 to 2080. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(11), 7002-7024. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36186-w>.
26. Rahimi, D., Hasheminasab, S., & Bashirian, F. (2025). Impact of climate change on river flow in the Zagros Mountain Region, Iran. *Journal of Mountain Science*, 22(7), 2527-2540. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-9225-4>.
27. Raju, K. S., & Kumar, D. N. (2020). Review of approaches for selection and ensembling of GCMs. *Journal of Water and Climate Change*, 11(3), 577-599. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.128>.
28. Robles Ortiz, R., González Trinidad, J., Bautista Capetillo, C., Júnez Ferreira, H. E., Robles Rovelo, C. O., Veyna Gomez, A. I., ... & Torres, M. D. R. (2026). Spatiotemporal Distribution in Rainfall and Temperature from CMIP6 Models: A Downscaling and Correction Study in a Semi-Arid Region of Mexico. *Water*, 18(7), 874. <https://doi.org/10.3390/w18070874>.
29. Roustia, I., Izadian, S., Olafsson, H., Dalvi, M., & Krzyszczak, J. (2026). Warming and Drying Intensification Across Iran's River Basins (1950–2040): Historical Trends and LightGBM-Based Projections. *Atmosphere*, 17(5), 446. <https://doi.org/10.3390/atmos17050446>.
30. Shami, S., Azar, M. K., Nilfouroushan, F., Salimi, M., & Reshadi, M. A. M. (2022). Assessments of ground subsidence along the railway in the Kashan plain, Iran, using Sentinel-1 data and NSBAS algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102898. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102898>.
31. Swart, N. C., Cole, J. N., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., Anstey, J., Arora, V. K., Christian, J. R., Hanna, S., Jiao, Y., Lee, W. G., Marshall, F. J., Seiler, C., Seinen, J. R., Xiang, Y., & Winter, B. (2019). The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5). *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4823–4873. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>.
32. Tatebe, H., Ogura, T., Nakaegawa, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., Watanabe, M., Kimoto, M., Saitoh, U., & Hasumi, H. (2019). Description and basic evaluation of MIROC6: Atmospheric climate and ocean variability. *Geoscientific Model Development*, 12(7), 2727–2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>.
33. 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>.
34. Toosi, A. S., Doulabian, S., Tousi, E. G., Calbimonte, G. H., & Alaghmand, S. (2020). Large-scale flood hazard assessment under climate change: A case study. *Ecological Engineering*, 147, 105765. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105765>.

35. Tsai, I. C., Lu, C. H., Hsu, H. H., Lee, W. L., Wang, Y. C., & Chen, Y. L. (2020). The Taiwan Earth System Model version 1 (TaiESM1): Model description and baseline evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11), e2020MS002283. <https://doi.org/10.1029/2020MS002283>.
36. Volodin, E. M., Mortikov, E. V., Kostykin, S. V., Galin, V. Y., Vasilyev, A. N., Gritsun, A. S., Diansky, N. A., Gusev, A. V., & Yakovlev, N. G. (2019). Simulation of the present-day climate with the INMCM5 climate model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(3), 205–214. <https://doi.org/10.1134/S0001433819030132>.
37. Wu, T., Lu, Y., Fang, Y., Xin, X., Li, L., Li, W., Zhang, J., Zhang, F., Zhang, L., Zhou, M., & Liu, X. (2019). The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM2-MR): Description and gradient evaluation. *Geoscientific Model Development*, 12(4), 1573–1600. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1573-2019>.
38. Yousefi, H., Ahani, A., Moridi, A., & Razavi, S. (2024). The future of droughts in Iran according to CMIP6 projections. *Hydrological Sciences Journal*, 69(7), 951–970. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2348720>.
39. Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Ose, T., Hosaka, M., Taura, A., Baba, Y., Deushi, M., Tanaka, T. Y., Nishizawa, S., & Kitoh, A. (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*, 97(5), 931–965. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>.
40. 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>.
41. Zamani, Y., Hashemi Monfared, S. A., Azhdari Moghaddam, M., & Hamidianpour, M. (2020). A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: the case of Northeastern Iran: Y. Zamani et al. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1613–1623. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03406-x>.
42. Zareian, M. J., Dehban, H., Gohari, A., & Torabi Haghighi, A. (2024). Assessment of CMIP6 models performance in simulation precipitation and temperature over Iran and surrounding regions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(8), 701. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12878-7>.
43. Ziehn, T., Chamberlain, M. A., Law, R. M., Lenton, A., Bodman, R. W., Dix, M., Stevens, L., Wang, Y. P., & Srbinovsky, J. (2020). The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 70(1), 193–214. <https://doi.org/10.1071/ES19035>.