



Short-Term Droughts Projection in Iran: A Comprehensive Analysis Based on the SSP5-8.5 Scenario

Ali Reza Karbalaee ^{1*}, Faeze Shoja ², Saeideh Ashrafi ³, Muhammad Kamangar ⁴

¹ Assistant Professor, Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

² Postdoctoral Researcher in Climatology, Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Ph.D. in Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁴ Ph.D. in Climatology, Department of Geography, Faculty of Humanities, Zanjan University, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 25 June 2025

Revised: 03 October 2025

Accepted: 04 October 2025

Available Online: 08 October 2025

Keywords:

Drought

Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

Precipitation Projection

Multi-Model Ensemble

Water Resource Management

Iran

ABSTRACT

Drought is one of the greatest environmental and social challenges globally, with serious implications for food security and water resource management. This study focuses on short-term drought Projection in Iran using Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios. Data from 95 synoptic stations for 1985–2014 served as the baseline. Five General Circulation Models (GCMs) GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, and UKESM1-0-LL were used to project precipitation. The data underwent Kriging interpolation and bias correction. To reduce uncertainty, a multi-model ensemble approach was applied. Results show that ensemble-processed data align closely with observations, exhibiting reduced errors and higher correlation coefficients. The ensemble model outperformed individual models. Analysis of baseline precipitation patterns revealed strong influences from geographic and climatic factors, with high precipitation in the Zagros Mountains and southwestern Caspian Sea coasts during cold months. Projections for 2021–2040 under the SSP5-8.5 scenario indicate significant shifts: increased precipitation is expected in high-altitude regions and along the Caspian coasts, though rising temperatures may offset these benefits. Conversely, precipitation is projected to decline in northwestern and central Iran, especially in spring and summer. These changes pose significant challenges for water and agricultural management, underscoring the necessity for proactive planning. By providing more precise projections, this study supports policymakers in developing effective strategies to cope with drought.

* Corresponding author: Alireza Karbalaee

E-mail address: karbalaee@khu.ac.ir

How to cite this article: Karbalaee, A. R., Shoja, F., Ashrafi, S., & Kamangar, M. (2025). Short-Term Droughts Projection in Iran: A Comprehensive Analysis Based on the SSP5-8.5 Scenario. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 129-152. <https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.94153.1586>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The escalating frequency of extreme climatic events represents one of the most palpable consequences of anthropogenic climate change, posing severe threats to ecosystem integrity, public health, and economic stability. Among these hazards, drought is globally recognized as the most detrimental due to its creeping onset, extensive spatial footprint, and prolonged duration. Iran, situated within the global arid and semi-arid belt, has historically contended with water scarcity. However, recent decades have witnessed a convergence of climatic shifts and managerial challenges, propelling the nation toward a pervasive water crisis. Predictive models identify Iran as a highly vulnerable region to future hydrological anomalies. While previous investigations predominantly relied on the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5), the advent of CMIP6 offers enhanced physical parameterization and higher spatial resolution. This study employs a strategic approach by utilizing CMIP6 models under the high-emission SSP5-8.5 scenario. This scenario serves as a systemic "stress test" for Iran's water resource management infrastructure, evaluating resilience against the most severe plausible climatic trajectory. The primary objective is to analyze the spatiotemporal patterns of short-term droughts for the near-future horizon (2021–2040) and to delineate critical hotspots, thereby facilitating a paradigm shift from reactive crisis management to proactive risk mitigation.

Material and Methods

The study area encompasses the entire territory of Iran. Observational data for precipitation and temperature were obtained from 95 synoptic stations for the baseline period (1985–2014) to validate model performance. For future projections (2021–2040), outputs from five CMIP6 General Circulation Models (GCMs) specifically GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2 and UKESM1-0-LL—were utilized under the SSP5-8.5 scenario. To address the scale mismatch between GCM outputs and local observations, a robust downscaling procedure was implemented using Kriging interpolation to generate a 19×19 km grid, followed by bias correction via the Delta Correction Factor (DCF) method. To mitigate structural uncertainties inherent in individual models, a weighted Multi-Model Ensemble (MME) approach was adopted, with weights assigned based on the Pearson correlation coefficients between model outputs and historical observations. The Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) was selected to characterize drought conditions, as its incorporation of potential evapotranspiration (calculated via the Thornthwaite method) makes it particularly sensitive to the thermal amplification of drought under global warming. Model accuracy and the ensemble performance were rigorously evaluated using Taylor diagrams and statistical metrics, including RMSE, MAE, MBE and R².

Results and Discussion

The validation analysis, utilizing Taylor diagrams and statistical metrics, demonstrated that the Multi-Model Ensemble (MME) approach significantly mitigated the structural uncertainties inherent in individual CMIP6 models. While individual models exhibited biases ranging from 28% to 78% in parameter estimation, the ensemble-adjusted data showed negligible deviations (less than 2%) and high correlation coefficients, indicating a robust alignment with baseline observational records (1985–2014).

Baseline analysis confirmed the topographic control over moisture distribution, identifying the Zagros Mountains and the Caspian coast as primary precipitation zones, in contrast to the arid central and eastern basins. However, projections for the near-future horizon (2021–2040) under the SSP5-8.5 scenario reveal critical shifts in spatiotemporal precipitation patterns. Although a potential increase in precipitation is projected for high-altitude regions and the southern Caspian coast during specific cold months (e.g., January), this trend is reversed during critical growing seasons. Notably, northwestern, central and southeastern Iran are projected to experience precipitation deficits and negative anomalies during spring and summer months.

The most pivotal finding emerges from the SPEI analysis, which underscores the thermodynamic dominance of climate change in the region. The results indicate that the substantial rise in surface temperatures and the consequent surge in atmospheric evaporative demand will likely offset any localized precipitation gains, driving a negative water balance. This phenomenon signifies a transition toward a "Hot Drought" regime, characterized by increased frequency and severity of drought events across most of the country. Spatial risk mapping identifies southern regions (such as the Persian Gulf coast), eastern, and parts of central Iran as vulnerability "hotspots." In these areas, the recurrence interval of severe droughts is projected to shorten, while wet periods diminish. These spatial patterns display strong concordance with previous literature, confirming that the primary driver of future droughts in Iran is shifting from precipitation deficits to thermal stress and intensified evapotranspiration. This trajectory poses profound challenges for rainfed agriculture and reservoir management, particularly during the warm season when water demand peaks.

Conclusion

This study demonstrates the efficacy of the Multi-Model Ensemble (MME) approach utilizing CMIP6 datasets under the SSP5-8.5 scenario in minimizing simulation uncertainties and enhancing the fidelity of short-term drought projections for Iran. The results indicate that for the 2021–2040 horizon, although precipitation patterns exhibit regional variability, the dominant climatic driver will be the substantial rise in surface temperatures; this warming trend is projected to amplify potential evapotranspiration rates, effectively negating localized precipitation gains and driving a transition toward more frequent and widespread "hot droughts." Spatiotemporal analysis identifies the southern, eastern, and central regions of the country as critical hotspots of vulnerability, where the intensification of drought severity is expected to be most pronounced. These findings underscore the imperative for a strategic paradigm shift from reactive crisis management to proactive risk management, necessitating robust policy interventions that prioritize demand-side water management, climate-adaptive agricultural practices and the implementation of advanced early warning systems to safeguard national water and food security against escalating climatic stresses.



پیش‌نمایی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در ایران: تحلیل جامع بر اساس سناریوی SSP5-8.5

علیرضا کربلایی درئی^{۱*}، ^{id}فائزه شجاع^۲، ^{id}سعیده اشرفی^۳، ^{id}محمدکمانگر^۴

^{۱*} استادیار گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران

^۲ محقق پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۴ دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲	خشکسالی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و اجتماعی جهانی است که پیامدهای جدی برای امنیت غذایی و مدیریت منابع آب دارد. این پژوهش به پیش‌بینی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در ایران با استفاده از سناریوهای اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSP) می‌پردازد. داده‌های ۹۵ ایستگاه سینوپتیک در دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ به‌عنوان پایه در نظر گرفته شدند. پنج مدل گردش عمومی جو (GCM) شامل UKESM1-0-LL و MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR، GFDL-ESM4، شامل برای پیش‌بینی بارش به‌کار رفتند. داده‌ها با روش کریجینگ همگون‌سازی و سپس اصلاح سوگیری شدند. برای کاهش عدم قطعیت، از رویکرد همادی چندمدلی استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد داده‌های همادی‌شده هم‌خوانی بالایی با مشاهدات دارند، خطاهای کمتری ارائه می‌دهند و ضریب همبستگی آن‌ها افزایش یافته است. مدل همادی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های منفرد داشت. تحلیل الگوهای بارش در دوره پایه نشان داد که بارش تحت تأثیر عوامل جغرافیایی و اقلیمی است و بیشترین مقادیر آن در ماه‌های سرد در زاگرس و سواحل جنوب‌غربی خزر رخ می‌دهد. پیش‌بینی‌های دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوی SSP5-8.5 تغییرات چشمگیری را نشان می‌دهند: افزایش بارش در مناطق مرتفع و سواحل خزر، هر چند افزایش دما ممکن است اثرات مثبت آن را کاهش دهد؛ در مقابل، کاهش بارش در شمال‌غرب و مرکز کشور، به‌ویژه در بهار و تابستان، پیش‌بینی شده است. این تغییرات چالش‌های جدی برای مدیریت آب و کشاورزی ایجاد می‌کند و لزوم برنامه‌ریزی پیشگیرانه را برجسته می‌سازد. این مطالعه با ارائه پیش‌بینی‌های دقیق‌تر، به سیاست‌گذاران در تدوین راهبردهای مؤثر برای مقابله با خشکسالی کمک می‌کند.
کلمات کلیدی: خشکسالی مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) پیش‌بینی بارش همادی چند مدلی مدیریت منابع آب ایران	

مقدمه

وقوع پدیده‌های حدی آب‌وهوایی، به عنوان یکی از بارزترین پیامدهای تغییر اقلیم، می‌تواند منجر به مخاطرات طبیعی ویرانگر، تهدید یکپارچگی زیست‌بوم‌ها و تحمیل هزینه‌های سنگین بر سلامت و اقتصاد جوامع شود (Zhou, Zheng & Guo, 2021). در این میان، خشکسالی به دلیل ماهیت خزنده، دامنه تأثیر گسترده و دوره بازگشت طولانی، به عنوان زیان‌بارترین مخاطره آب‌وهوایی در سطح جهان شناخته می‌شود. این پدیده که با توجه به روندهای فزاینده دمای جهانی می‌تواند در تمامی رژیم‌های اقلیمی، حتی مناطق سردسیر، رخ دهد (Carrao, Barbosa & Dos Santos, 2018; Lanen, Van Lanen & Heggen, 2007) تأثیرات عمیقی بر امنیت آبی و غذایی و در نتیجه ثبات اقتصادی کشورها دارد (Zhang & Yao, 2012). خطر آتی ناشی از خشکسالی، ترکیبی پیچیده از تغییرات فیزیکی اقلیم و آسیب‌پذیری‌های اجتماعی-اقتصادی است که این پیامدها به طور نامتناسبی در کشورهای کمتر توسعه‌یافته، شدیدتر احساس می‌شود (Elkouk, Amiraslani & Ashraf, 2022).

ایران، به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، به طور تاریخی با چالش کم‌آبی دست‌وپنجه نرم کرده است. با این حال، در دهه‌های اخیر، هم‌افزایی عواملی چون تغییرات اقلیمی، الگوهای ناپایدار مصرف و چالش‌های ساختاری در مدیریت منابع آب، کشور را در آستانه یک بحران آبی فراگیر قرار داده است. مدل‌های پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی، ایران را به عنوان یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق جهان در برابر خشکسالی‌های آتی ارزیابی کرده‌اند (World Bank Group, 2016). خشکسالی گسترده سال 2021 که منجر به بحران‌های جدی در تأمین آب بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت و بروز تنش‌های اجتماعی گردید، شواهدی آشکار بر این واقعیت است که رویکردهای سنتی مبتنی بر مدیریت بحران و واکنش پس از وقوع، دیگر پاسخگوی شدت و تکرار این پدیده نیست. این شرایط، ضرورت یک تحول پارادایمی به سمت مدیریت ریسک را آشکار می‌سازد؛ رویکردی که بر پایه پیش‌بینی علمی، سامانه‌های هشدار سریع و افزایش تاب‌آوری استوار باشد (Zarrin, Dadashi-Roudbari & Kadkhoda, 2022).

سنگ بنای چنین رویکرد پیشگیرانه‌ای، درک علمی و پایش دقیق الگوهای مکانی-زمانی خشکسالی است که از تحلیل توصیفی اولیه (Whipple, 1966) به استفاده از شاخص‌های کمی دقیق تغییر پیدا کرده است. وجود یک شاخص مشخص برای تعیین دوره‌های مرطوب و خشک، گامی اساسی در تحلیل کمی خشکسالی محسوب می‌شود (Silva, 2003) و انتخاب شاخص مناسب، نقشی کلیدی در اثربخشی سامانه‌های پایش ایفا می‌کند (Farahmand & Agha Kouchak, 2015). در این راستا، مطالعات متعددی در سطح جهانی و منطقه‌ای با بهره‌گیری از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) متعلق به پروژه‌هایی مانند CMIP5 و سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)، به بررسی تغییرات اقلیمی پرداخته‌اند (Nasrollahi et al., 2015; Lu, Carbone & Grego, 2019; Khan, Koch & Tahir, 2020; Alemu, Wubneh, Worku, Womber & Chanie, 2023). با این حال، علم اقلیم با معرفی نسل جدید مدل‌ها در قالب فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6)، گام بلندی به پیش برداشته است. این مدل‌های نوین با بهبود فرآیندهای فیزیکی، افزایش وضوح مکانی و تلفیق سناریوهای مسیرهای اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSPs) با مسیرهای غلظت نماینده (RCPs) تصویری واقع‌بینانه‌تر و دقیق‌تر از آینده اقلیم ارائه می‌دهند (Eyring et al., 2016; O'Neill et al., 2016).

شواهد علمی رو به رشدی، برتری عملکرد مدل‌های CMIP6 را در شبیه‌سازی پدیده‌های حدی اقلیمی تأیید می‌کند. برای مثال، ژو و همکاران (Zhu et al., 2020) نشان دادند که مدل‌های CMIP6 در بازتولید شرایط حدی در چین، عملکرد بهتری نسبت به CMIP5 دارند. یو و همکاران (You et al., 2021) نیز با استفاده از همین مدل‌ها، افزایش قابل توجه دما در نواحی مختلف چین را پیش‌بینی کردند. در سطح منطقه‌ای، مطالعاتی مانند پژوهش آیوگی و همکاران (Ayugi et al., 2021) در شرق آفریقا و آلمازروی و همکاران (Almazroui et al., 2021) در آمریکای جنوبی، همگی بر تشدید پدیده‌های حدی تحت سناریوهای مختلف SSP تأکید دارند. در حوزه خاص خشکسالی نیز، پژوهشگران به طور فزاینده‌ای از داده‌های CMIP6 برای پیش‌نگری‌های آتی بهره گرفته‌اند (Cook et al., 2020; Li et al., 2020; Zhao & Dai, 2022; Chen et al., 2023). با این حال، همانطور که لی و همکاران

(Li, Liu, Huang, Peng & Ling, 2022) به درستی اشاره کرده‌اند، هیچ مدل منفردی در تمامی مناطق عملکرد بهینه ندارد و ارزیابی و کاربرد این مدل‌ها برای هر منطقه جغرافیایی خاص، یک ضرورت پژوهشی است.

با وجود حجم قابل توجه مطالعات پیشین در زمینه خشکسالی در ایران، بررسی دقیق این آثار (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021; Babaeian et al., 2021; Ahadi et al., 2025) نشان‌دهنده یک شکاف علمی مشخص است که پژوهش حاضر مستقیماً به آن می‌پردازد. این شکاف در دو لایه قابل تبیین است؛ لایه روش‌شناختی و لایه راهبردی. در لایه روش‌شناختی، اگرچه استفاده از مدل‌های نوین CMIP6 در حال گسترش است (Behzadi et al., 2024)، اما بسیاری از تحلیل‌های جامع و ملی‌نگر همچنان بر پایه داده‌های نسل قدیم (CMIP5) استوار بوده و یا مطالعات مبتنی بر CMIP6 به مقیاس‌های مکانی محدود (مانند حوضه آبریز یا یک کلان‌شهر) پرداخته‌اند (Zarrin et al., 2022; Khazaei, 2025). این امر از دستیابی به یک چشم‌انداز یکپارچه ملی مبتنی بر دقیق‌ترین ابزارهای موجود جلوگیری می‌کند.

اما نوآوری اصلی این پژوهش در لایه راهبردی آن نهفته است. در شرایطی که ایران با یک بحران ساختاری آب مواجه است، تحلیل‌های آینده‌نگر اقلیمی باید از یک تمرین علمی صرف فراتر رفته و به ابزاری برای مدیریت ریسک و آزمون تاب‌آوری تبدیل شوند. از این منظر، تمرکز غالب پژوهش‌ها بر سناریوهای میانه‌رو، هرچند ارزشمند، اما برای آماده‌سازی کشور در برابر شوک‌های شدید اقلیمی کافی نیست. پژوهش حاضر با انتخاب سناریوی پرناتشار SSP5-8.5، این مسیر را به عنوان یک «سناریوی آزمون تنش» برای سیستم مدیریت آب کشور در نظر می‌گیرد. هدف، پاسخ به این پرسش کلیدی است که زیرساخت‌ها، الگوهای کشت و ساختارهای اجتماعی - اقتصادی فعلی تا چه حد در برابر بدترین آینده محتمل اقلیمی آسیب‌پذیر هستند. این رویکرد، تحلیل خشکسالی را مستقیماً به حوزه سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی برای شرایط بحرانی پیوند می‌زند.

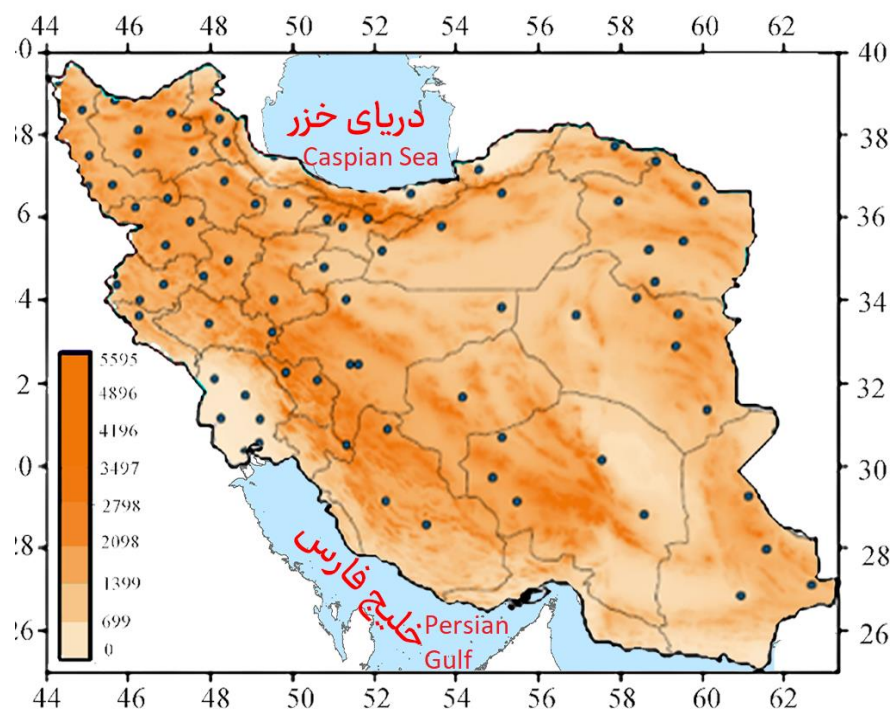
بنابراین، مطالعه حاضر با هدف ارائه یک تحلیل جامع ملی، مبتنی بر جدیدترین مدل‌های اقلیمی و با یک رویکرد راهبردی مدیریت ریسک، به دنبال پاسخگویی به پرسش‌های اساسی زیر است که در ابعاد مختلف تفکیک شده‌اند:

- الگوهای زمانی و مکانی مشخصه‌های کلیدی خشکسالی کوتاه‌مدت (فراوانی، شدت و مدت) در ایران تحت سناریوی SSP5-8.5 در افق‌های زمانی آینده (نزدیک، میانی و دور) چگونه تکامل خواهند یافت؟
 - بر اساس این پیش‌نمایی کدام مناطق، با بیشترین ریسک تشدید خشکسالی مواجه شده و به کانون‌های بالقوه بحران آب در آینده تبدیل می‌شوند؟
 - دلالت‌های کاربردی یافته‌های این پژوهش برای بازنگری در سیاست‌های تخصیص آب، تقویت زیرساخت‌های مقابله با خشکسالی و طراحی سامانه‌های هشدار سریع مؤثر در سطح ملی و منطقه‌ای چیست؟
- در ادامه پژوهش، با تکیه بر تحلیل‌های آماری و مکانی، به این پرسش‌ها پاسخ داده می‌شود تا یک چشم‌انداز جامع از آسیب‌پذیری کشور در برابر خشکسالی‌های آتی ترسیم گردد.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه کشور ایران در جنوب غرب آسیا بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی با مساحت ۱,۶۴۸,۱۹۵ کیلومترمربع است (شکل ۱). به علت گستردگی ایران زمین و وجود عوامل متعدد جغرافیایی از یک طرف و از طرف دیگر قرارگیری در محل گذار سامانه‌های متفاوت گردش جوی، تنوع اقلیمی در سرتاسر آن وجود دارد. ایران از لحاظ دمایی به دو بخش سرد کوهستانی و گرم کم ارتفاع تقسیم می‌شود. میانگین دمای کشور حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. حاکمیت سامانه‌های همدید، نظیر کم‌فشار گنگ و پرفشار آזור از یک سو و محتوای رطوبتی جو نیز از سوی دیگر در شکل‌گیری نواحی دمایی ایران نقش دارند (Masoudian & Kaviani, 2008). وضعیت دمایی ایران در تابستان همگن‌تر از زمستان است. میانگین بارش سالانه در ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که ایران را جزو کشورهای خشک دنیا قرار داده است.

در دوره سرد سال، به علت حاکمیت بادهای غربی و نزدیکی به منبع رطوبتی دریای مدیترانه بارندگی زیادی دارد، اما دوره گرم سال نفوذ پرفشار آזור باعث کاهش بارندگی می‌شود. توزیع زمانی و مکانی باران در کشور نیز پراکندگی یکسانی ندارد. بیشترین مقدار بارش‌ها مربوط به کرانه‌های جنوبی دریای خزر و کمترین مقدار مربوط به بیابان‌های مرکزی لوت و کویر نمک است (Alijani, 2011).



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig.1. The Map of the Study Area

مواد و روش‌ها

الف) داده‌های ایستگاهی

در این پژوهش داده‌های زمینی ۹۵ ایستگاه همدیدی در دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ به عنوان دوره پایه استفاده و پردازش شده است. در انتخاب ایستگاه‌ها افزون بر لحاظ نمودن مناطق آب‌وهوایی گوناگون کشور سعی شد تا ایستگاه‌هایی که خلأ آماری کمتر داشته و به لحاظ کیفی آزمون‌های کمی را گذارنده اند استفاده شود. پراکندگی ایستگاه‌های زمینی مورد مطالعه در شکل ۱ دیده می‌شود.

ب) داده‌های مدل‌های اقلیمی (CMIP6)

برای پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی دوره مشاهداتی، GCMهای فاز ششم پروژه مقایسه‌ای مدل جفت شده (CMIP6) مورد استفاده قرار گرفت. پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده گزارش ششم هیئت بین دولتی تغییر اقلیم از سناریوهای جدیدی به نام مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSP) استفاده می‌کند که با نماینده خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) پروژه گزارش پنجم IPCC ترکیب شده است (Eyring et al., 2016). سناریوهای جدید اضافه شده در CMIP6 شامل SSP1-1.9، SSP4-6.0، SSP5-8.5، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP1-2.6، SSP4-6.0، SSP5-8.5 و SSP2-4.5 نیز به روز شده سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 موجود در CMIP5 می‌باشند که در این مطالعه از سناریو SSP5-8.5 بهره گرفته شد. مدل‌های

آب‌وهوایی فعلی قوی‌تر از مجموعه‌های قبلی CMIP هستند و پیشرفت‌های مؤثری را در بازتولید الگوهای بزرگ مقیاس متغیرهای آب‌وهوایی نشان داده‌اند (Chen et al., 2020; Akinsanola, Kooperman, Pendergrass, Hannah & Reed, 2020; Zhai et al., 2020; Wang, Jin & Liu, 2020). در تحقیق حاضر نیز خروجی ۵ GCMs شامل UKESM1-0-LL، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2 و MPI-ESM1-2-HR و GFDL-ESM4 برای دوره تاریخی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و شبیه‌سازی‌های آینده شامل آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، از وب سایت پروژه مقایسه مدل جفت شده گزارش ششم به آدرس <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/> دریافت گردید. انتخاب مدل‌های نهایی بر اساس یک رویکرد چندمعیاره دقیق صورت پذیرفت که شامل در دسترس بودن کامل داده‌ها برای دوره‌های تاریخی و سناریوهای آینده، عملکرد مطلوب و اثبات‌شده در شبیه‌سازی اقلیم ایران بر اساس مطالعات پیشین و پوشش طیف متنوعی از حساسیت‌های اقلیمی (Climate Sensitivity) به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در پیش‌بینی‌ها بود. علاوه بر این، تمرکز ویژه‌ای بر انتخاب مدل‌های سیستم زمین (ESMs) قرار گرفت؛ این نسل از مدل‌ها با شبیه‌سازی چرخه‌های بیوژئوشیمیایی حیاتی مانند چرخه کربن، فراتر از فرآیندهای صرفاً فیزیکی در GCMs عمل کرده و در نتیجه، بازتابی کامل‌تر و یکپارچه‌تری از سیستم اقلیم زمین ارائه می‌دهند. فرایند انتخاب مدل‌ها بر مبنای یک رویکرد چندمعیاره دقیق صورت پذیرفت که علاوه بر دسترس بودن کامل داده‌ها، عملکرد مطلوب و مستند شده آن‌ها در منابع علمی را نیز مد نظر قرار می‌داد. مدل‌های منتخب و مراجع اصلی توسعه‌دهنده آن‌ها عبارتند از: IPSL-CM6A-LR (Sentman et al., 2018)، MRI-ESM2-0 (Sellar et al., 2020)، UKESM1-0-LL (Müller et al., 2018)، MPI-ESM1-2-HR (Boucher et al., 2020) و GFDL-ESM4 (Kawai et al., 2019; Oshima et al., 2020). حساسیت اقلیمی معمولاً به‌عنوان افزایش دمای جهانی پس از دو برابر شدن غلظت CO2 در جو در مقایسه با سطوح پیش از صنعتی شدن تعریف می‌شود CO2 قبل از صنعتی حدود ۲۶۰ قسمت در میلیون (ppm) بود، بنابراین دو برابر شدن آن تقریباً ۵۲۰ ppm خواهد بود. جزئیات مربوط به مدل‌ها و مؤسسه‌های توسعه دهنده آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده جهت همادی و پیش‌نگری خشکسالی
Table 1- Models Used for Drought Monitoring and Forecasting

مدل Model	نام مؤسسه Institute Name	تقریبی Approximate Spatial Resolution	کشور Country	واریانت Variant
MRI-ESM2	مؤسسه تحقیقات هواشناسی Meteorological Research Institute (MRI)	1.25 * 1.25	ژاپن Japan	r1i1p1
IPSL-CM6A-LR	Institut pierre-simon laplace مؤسسه پیر سیمون لاپلاس	2.5 * 1.26	فرانسه France	r1i1p1
UKESM1-0-LL	مرکز هادلی مت آفیس Met Office Hadley Center	2.25 * 2.25	انگلیس UK	r1i1p1
MPI-ESM1-2-HR	مؤسسه ماکس پلانک Max Planck Institute	0.94 * 0.94	آلمان Germany	r1i1p1
GFDL-ESM4	آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	1.25 * 1/0	امریکا USA	r1i1p1

استخراج، باز شبکه‌بندی و تصحیح اریبی داده‌ها

در گام نخست داده‌های مدل‌های مورد استفاده در نزدیک‌ترین نقاط به ایستگاه‌های همدیدی استخراج گردید. پس از این مرحله و برای یکسان‌سازی ابعاد پیکسل‌های نقشه‌های حاصل از مدل‌ها و داده‌های زمینی اقدام به شبکه‌بندی داده‌های زمینی و نیز داده‌های مستخرج از مدل‌ها گردید. برای باز شبکه‌بندی داده‌ها از روش کریجینگ استفاده شد. با بررسی‌های انجام‌شده قدرت تفکیک مکانی ۱۹ کیلومتری برای ابعاد پیکسل‌ها مناسب تشخیص داده شد؛ بنابراین با انجام شبکه‌بندی، پیکسل‌هایی با ابعاد ۱۹ کیلومتر در ۱۹ کیلومتر به دست آمد. سپس با استفاده از داده‌های بارش مدل‌های مورد استفاده ریزمقیاس سازی با روش تغییر عامل دلتا (DCF) برای پیکسل‌های مذکور، به شرح زیر انجام شد. جهت تصحیح اریبی مدل‌ها از روش تغییر عامل دلتا (DCF) استفاده شد. شرح محاسباتی روش DCF در رابطه (۱) آمده است (Hamidianpour & Shoja, 2022).

$$T_{frc}^{BC}(t) = P_{obs}(t), \left[\frac{\mu_m P_{frc}(t)}{\mu_m P_{conter}(t)} \right] \quad (1)$$

در رابطه فوق، T (متغیر موردنظر) است؛ $contr$ تعداد سری‌های شبیه‌سازی‌شده CMIP6-DCCP در طول دوره کنترل است، obs دوره زمانی مشاهداتی؛ f سری زمانی پیش‌بینی‌شده آینده که باید اریبی آن تصحیح شود؛ BC سری زمانی پیش‌نگری شده آینده که اریبی آن تصحیح‌شده است، t گام زمانی و μ_m میانگین بلندمدت ماهانه است. پس از مرحله ریزمقیاس‌نمایی، خطای مدل‌ها با استفاده از روش‌های متعددی نظیر RMSE، MAE، MBE و R^2 محاسبه و موردبررسی قرار گرفت. تمام مراحل ذکرشده در بالا در محیط برنامه‌نویسی متلب کد نویسی شده است و داده‌ها و کد آن از این لینک^۱ قابل استفاده است.

روش همدادی چندمدلی (Multi-Model Ensemble)

خروجی GCMS به طور ذاتی با سوگیری‌ها (Biases) و عدم قطعیت‌های ساختاری همراه است. به منظور کاهش این عدم قطعیت‌ها و دستیابی به یک برآورد پایدارتر و قابل اعتمادتر از شرایط اقلیمی آینده، در این پژوهش از رویکرد همدادی چندمدلی مبتنی بر روش میانگین وزنی استفاده شد. منطق اصلی این روش، تخصیص وزن بیشتر به مدل‌هایی است که توانایی بالاتری در بازتولید شرایط اقلیمی دوره تاریخی (دوره مشاهداتی) از خود نشان داده‌اند و در مقابل، کاهش سهم مدل‌های با عملکرد ضعیف‌تر در برآورد نهایی است.

بر این اساس، برون‌داد نهایی سامانه همدادی از طریق محاسبه میانگین وزنی خروجی تمام مدل‌ها، مطابق با رابطه (۲) به دست آمد:

$$w^T X^j = \sum_{k=1}^K w_k x_k^j \quad (2)$$

که در آن w_k وزن داده‌های هر کدام از مدل‌ها و x_k داده برآورد شده از مدل است (Bai et al., 2020). در ادامه به منظور تعیین وزن داده‌های حاصل از هر مدل از روش همبستگی پیرسون بهره گرفته شد. زیرا توانایی مدل در شبیه‌سازی الگوی نوسانات زمانی متغیر اقلیمی را به خوبی ارزیابی می‌کند. برای نرمال‌سازی این ضرایب و تبدیل آن‌ها به وزن‌های استاندارد که مجموعشان برابر با یک باشد، از رابطه (۳) استفاده گردید (Kamangar, Ahmadi, Rabiei-Dastjerdi & Hazbavi, 2025):

$$w_k = \frac{r_k}{\sum_{k=1}^K r_k} \quad (3)$$

در این رابطه r_k ضریب همبستگی پیرسون برای هر مدل است.

این فرایند تضمین می‌کند که سهم هر مدل در برآورد نهایی، متناسب با عملکرد نسبی آن در مقایسه با سایر مدل‌های عضو سامانه همادی باشد و در نتیجه، برونداد نهایی به سمت واقع‌بینانه‌ترین پیش‌بینی سوق داده شود.

درستی‌سنجی برون‌داد سامانه همادی و مدل‌های عضو سامانه

برای درستی‌سنجی برونداد مستقیم مدل‌ها از نمودار تیلور استفاده شد. نمودار تیلور ابزار مناسبی جهت درستی‌سنجی برون‌داد مجموعه مدل‌های اقلیمی است و اخیراً در مطالعات اقلیم‌شناسی بسیار استفاده می‌شود (Wehner, 2013). نمودار تیلور بر مبنای ارتباط هندسی بین ضریب همبستگی، انحراف معیار و خطای جذر میانگین مربعات^۱ استوار است. نمودار تیلور به دو صورت نیم‌دایره نمایش همبستگی منفی و مثبت و ربع دایره فقط نمایش همبستگی مثبت ارائه می‌شود که در هر دو صورت، مقادیر ضریب همبستگی به صورت شعاع دایره روی قوس آن، مقادیر انحراف معیار به صورت دوایر متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع و RMSD به صورت دوایر متحدالمرکز نسبت به مرکز دایره ترسیم می‌شود. دایره توخالی روی محور افقی نقطه مرجع موقعیت ایستگاه زمینی را بر اساس انحراف معیار سری زمانی نشان می‌دهد. روش ارزیابی در این دیاگرام به این صورت است که موقعیت مکانی هر مدلی که به نقطه مرجع نزدیک‌تر باشد دقت بیشتری را دارد (Azizi, Safarrad, Mohammadi & Faraji Sabokbar, 2016).

شاخص خشک سالی هواشناسی SPEI

شاخص بارش - تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد^۲ (SPEI)، توسط ویسنت - سررانو و همکاران (Vicente-Serrano, Beguería & López-Moreno, 2010) ارائه شد و به عنوان یک شاخص خشک‌سالی اقلیمی معرفی گردید. این شاخص مبتنی بر محاسبه ترازمندی آب اقلیمی^۳ است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز دارد. SPEI علاوه بر بارش (P)، اثر دما را از طریق متغیر تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) لحاظ می‌کند که آن را برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم مناسب‌تر می‌سازد. مراحل محاسبه شاخص به شرح زیر است:

شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس رویکرد تورنت وایت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه (i) مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (4)$$

مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف نیز از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} F_{n-1} - PET_{n-i} \quad (5)$$

در رابطه بالا، k (ماه‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و n ماه مورد نظر در محاسبه است. یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشک‌سالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. فرم کلی تابع چگالی احتمال این تابع به صورت رابطه (۶) می‌باشد (Vicente-Serrano et al., 2010):

1- Root-Mean-Square Deviation (RMSD)

2- Standardized Precipitation minus Evapotranspiration Index

3- Climatic Water Balance

$$F(X) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{X - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{X - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (6)$$

که در آن α ، β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر Di در دامنه $-\infty < \gamma < \infty$ می‌باشند. بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌گردد. شاخص SPEI می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف مانند ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه محاسبه گردد. مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشکسالی هنگامی شروع می‌گردد که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. در جدول ۲ طبقات مختلف شاخص SPEI ارائه شده است.

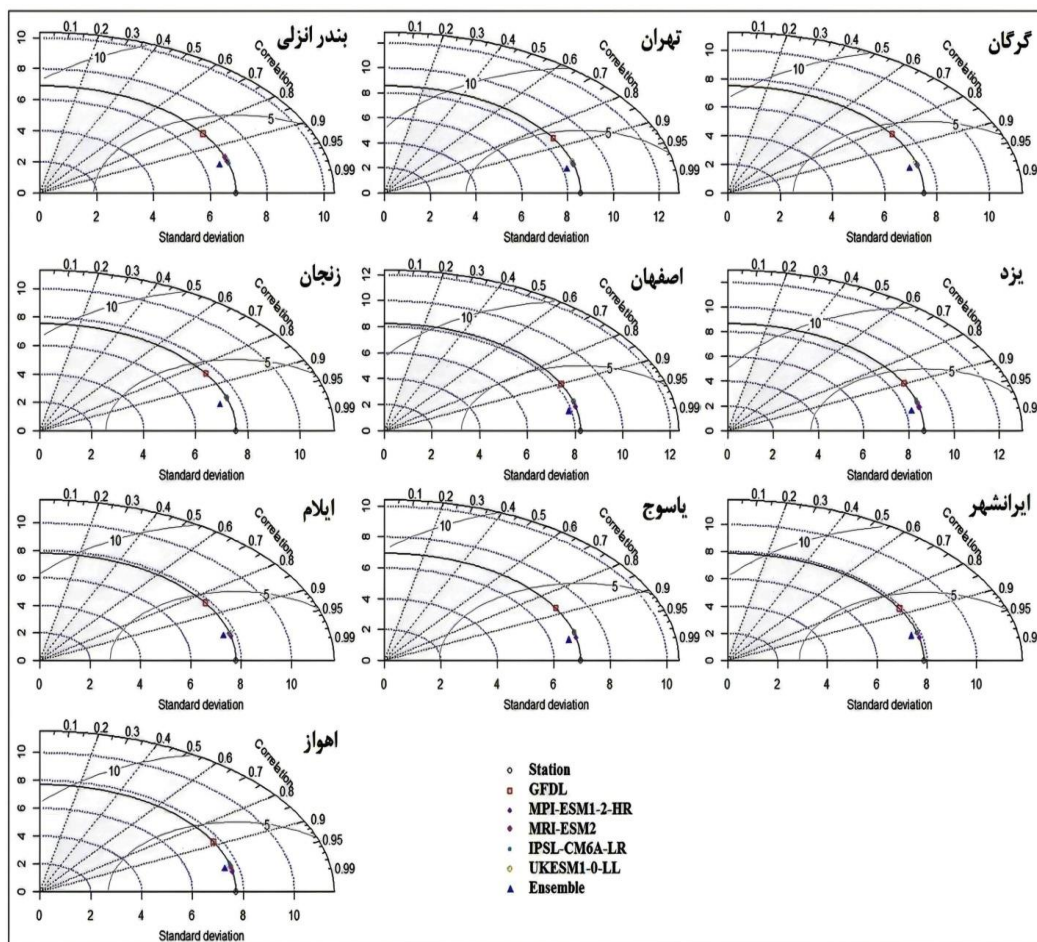
جدول ۲- طبقات مختلف شاخص خشکسالی SPEI

Table 2- Classification of the SPEI drought index

طبقه‌بندی	مقدار
classification	Value
ترسالی بسیار شدید	≥ 2
Extremely Wet	
رطوبت شدید	1.5 to 1.99
Very Wet	
رطوبت متوسط	1.00 to 1.49
Moderate Wet	
نرمال	-0.99 to 0.99
Normal	
خشکسالی متوسط	-1.00 to -1.49
Moderate Dry	
خشکسالی شدید	-1.50 to -1.99
Very Dry	
خشکسالی بسیار شدید	≤ -2
Extremely Dry	

نتایج

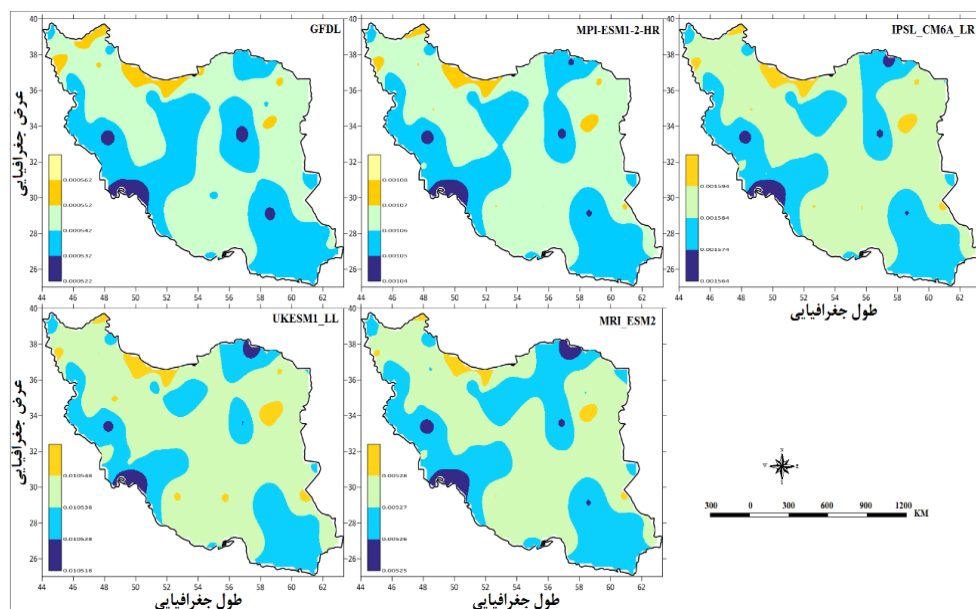
به دلیل بالا بودن تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش، ۱۰ ایستگاه به‌عنوان نماینده از تمامی پهنه‌های اقلیمی مختلف کشور انتخاب صحت سنجی داده‌های مدل و روش همادی مورد استفاده بر روی آن‌ها انجام شد. در انتخاب ایستگاه‌های مذکور نواحی اقلیمی کشور مدنظر بوده و ایستگاه‌های منتخب نماینده‌ی نواحی اقلیمی خود بوده‌اند. شکل ۲ نمودار تیلور دما برای ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد. با بررسی نمودارهای مذکور می‌توان دریافت که در تمامی ایستگاه‌ها داده‌های همادی شده بالاترین شباهت را به داده‌های واقعی داشته است. کمتر بودن میزان خطا و انحراف معیار و بالاتر بودن میزان ضریب همبستگی تأییدی بر این ادعاست. بنابراین می‌توان گفت که همادی داده‌ها توانسته است خطای داده‌های برآوردی را تا حد مطلوبی کاهش دهد.



شکل ۲- نمودار تیلور برای ایستگاه‌های منتخب کشور برای داده‌های بارش

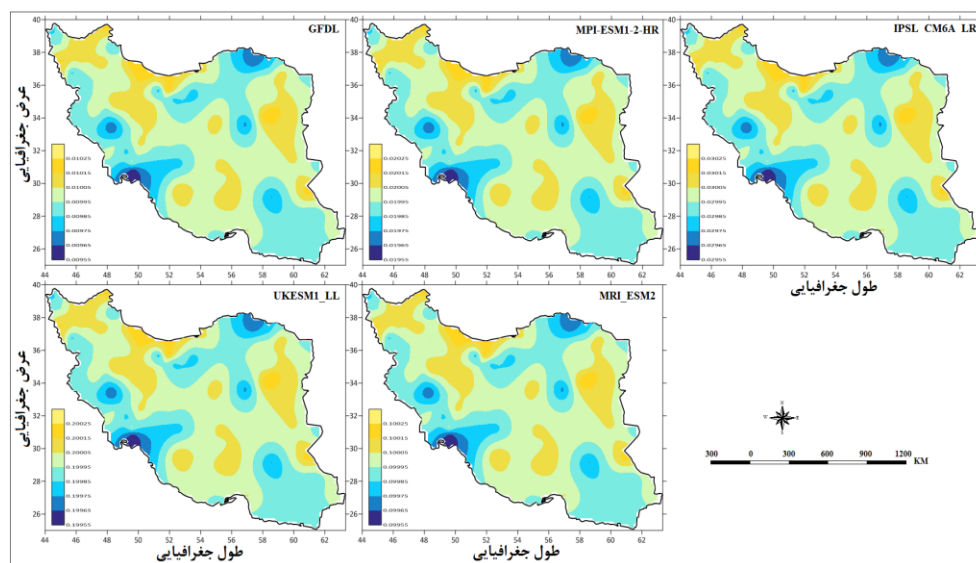
Fig.2. Taylor diagram for selected stations based on precipitation data

پس از انجام اصلاح اریبی و سپس همادی داده‌های حاصل از مدل‌ها، مقادیر خطا برای داده‌های مدل‌ها و نیز داده‌های همادی شده به دست آمد. شکل‌های ۳ تا ۶ مقادیر خطای محاسبه شده برای بارش مدل‌های مختلف در دوره پایه را نشان می‌دهند. خطاهای به‌دست آمده برای بارش بسیار کوچک و قابل اغماض هستند. میزان R^2 نیز برای ایستگاه‌های مورد استفاده بین ۰/۵ تا ۱ به‌دست آمده است. پس از همادی داده‌های برآورد شده بارش، میزان خطاها کاهش یافته است. مقدار پایین یا بالای خطا می‌تواند ناشی از چندین عامل از جمله تفکیک افقی مدل‌ها، برهمکنش دریا - خشکی و عدم برآورد صحیح مدل برای متغیر دما باشد. در مجموع، روش Ensemble نسبت به پنج مدل دیگر عملکرد بهتری ارائه داده است. با این حال، باید در نظر داشت که سنجه RMSE (شکل ۳) تحت تأثیر مقدار خود متغیر قرار می‌گیرد و بنابراین به‌تنهایی نمی‌تواند سنجه مناسبی برای تحلیل نتایج درستی سنجه باشد. به‌طور کلی، مدل‌های مورد بررسی حداقل ۲۸/۷ درصد کمتر و حداکثر ۷۸/۷ درصد بیشتر از مقدار واقعی دما را در ایران برآورد می‌کنند. میزان برآورد کمتر و بیشتر از مقدار واقعی در داده‌های همادی شده به ترتیب ۱ و ۱/۹ درصد است که نشان‌دهنده توانایی روش به کار رفته برای همادی مدل‌هاست. سنجه‌های MAE (شکل ۴) و MBE (شکل ۵) نیز حاکی از کمینه بودن مقادیر خطا برای داده‌های برآورد شده از طریق مدل‌ها هستند. نتایج بررسی میزان خطا برای داده‌های همادی شده (شکل ۶) نیز نشان‌دهنده توانایی بالای روش به کار برده شده برای همادی داده‌های حاصل از مدل‌ها و کاهش محسوس میزان خطاهاست.



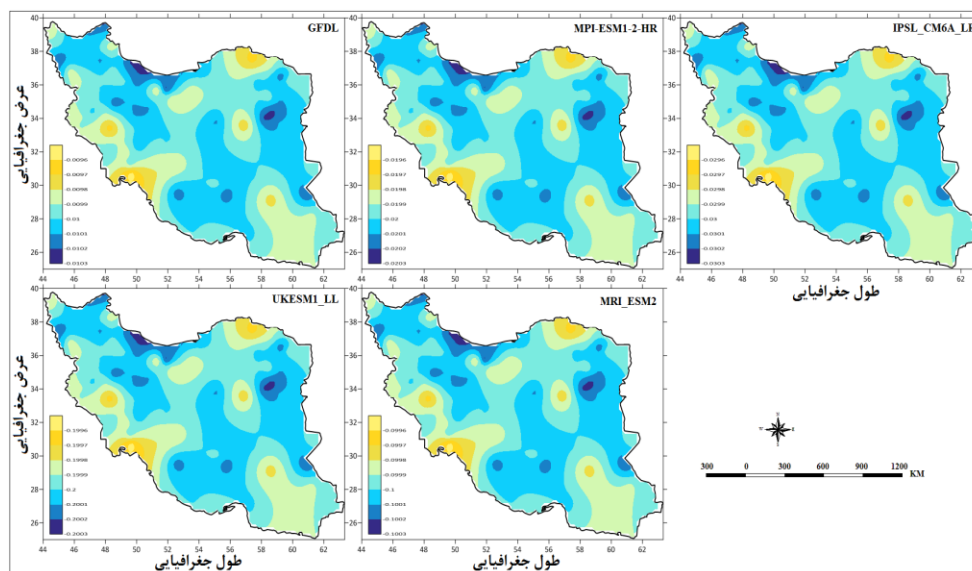
شکل ۳- خطای RMSE بارش برآورد شده از طریق مدل‌های مختلف

Fig.3. RMSE of precipitation estimated by different models



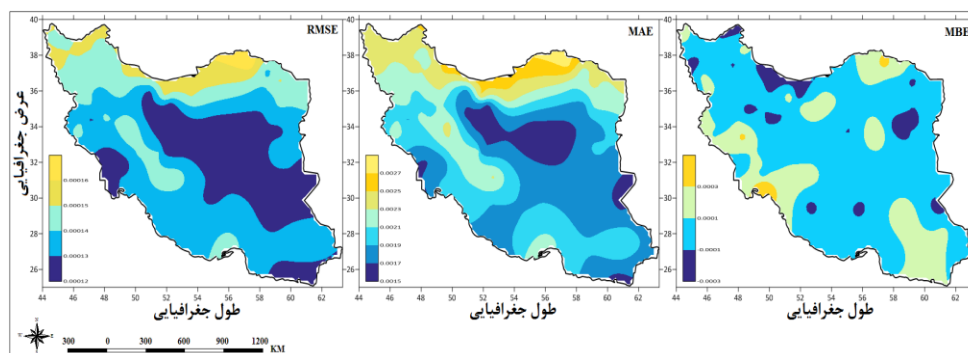
شکل ۴- خطای MAE بارش برآورد شده از طریق مدل‌های مختلف

Fig.4. MAE of precipitation estimated by different models



شکل ۵- خطای MBE بارش برآورد شده از طریق مدل‌های مختلف

Fig.5. MBE of precipitation estimated by different models



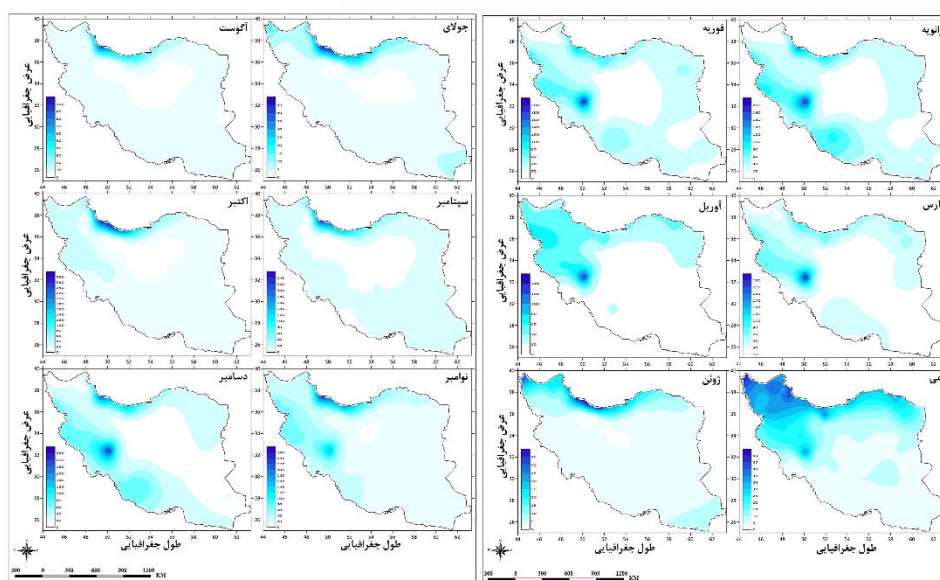
شکل ۶- خطاهای مختلف بارش همادی شده‌ی مدل‌های مختلف

Fig.6. Various errors of calibrated precipitation from different models

بارش - دوره پایه

شکل ۷ توزیع مکانی - زمانی میانگین بارش ماهانه ایران را در دوره پایه نشان می‌دهد. بررسی این نقشه‌ها بیانگر وجود الگوهای بارشی کاملاً فصلی و منطقه‌ای است که تحت تأثیر برهم کنش پیچیده سامانه‌های بزرگ‌مقیاس جوی، توپوگرافی ناهمگون کشور و منابع رطوبتی اطراف (دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان) شکل گرفته‌اند. در فصل سرد (دسامبر تا مارس) که اصلی‌ترین دوره بارش در ایران به‌شمار می‌رود، دو کانون اصلی بارشی دیده می‌شود. کانون نخست در زاگرس میانی و جنوبی قرار دارد که بیشترین بارش‌های کشور را دریافت می‌کند. مقادیر بارش در این منطقه به‌طور متوسط بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر در ماه و در برخی لکه‌ها بیش از ۳۰۰ میلی‌متر است. این شرایط ناشی از صعود اجباری هوای مرطوب مدیترانه‌ای و سودانی بر دامنه‌های زاگرس است. کانون دوم در سواحل جنوبی دریای خزر متمرکز است که بارش‌های سنگینی در محدوده ۲۵۰ تا بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در ماه ثبت کرده است. این بارش‌ها علاوه بر سامانه‌های غربی، تحت تأثیر رطوبت دریا و نفوذ زبانه‌های پرفشار سیبری رخ می‌دهد. در مقابل، مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی کشور در این دوره بارش اندکی، عموماً کمتر از ۲۰ تا ۳۰

میلی‌متر در ماه، دارند. در فصل بهار (آوریل و مه) با عقب‌نشینی سامانه‌های باران‌زای غربی به عرض‌های شمالی‌تر، بارش در زاگرس کاهش می‌یابد و در محدوده ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر در ماه قرار می‌گیرد. با این حال، شمال‌غرب کشور و دامنه‌های البرز غربی به کانون‌های تازه بارش تبدیل می‌شوند که بارش‌های همرفتی در این مناطق مقادیر ۶۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر در ماه را رقم می‌زنند. در همین زمان، بارش در نیمه مرکزی و جنوبی ایران به‌شدت کاهش یافته و اغلب کمتر از ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر باقی می‌ماند. فصل گرم و خشک (ژوئن تا سپتامبر) با استیلای پرفشار جنب‌حاره‌ای بر ایران مشخص می‌شود. در این دوره، بارش در بیشتر مناطق کشور تقریباً به صفر می‌رسد و مقادیر ۰ تا ۵ میلی‌متر در ماه رایج است. تنها دو استثنا وجود دارد: نخست نوار ساحلی دریای خزر که به دلیل رطوبت دریا همچنان بارش‌های مستمر را در محدوده ۳۰ تا ۹۰ میلی‌متر در ماه تجربه می‌کند؛ و دوم جنوب شرق کشور (به‌ویژه سیستان و بلوچستان) که در اثر نفوذ بارش‌های موسمی اقیانوس هند در ماه‌های جولای و آگوست بارش‌های پراکنده ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر ثبت می‌کند. فصل پاییز (اکتبر و نوامبر) آغازگر چرخه بارشی جدید است. در اکتبر نخستین امواج سامانه‌های مدیترانه‌ای وارد ایران شده و افزایش بارش در زاگرس و سواحل خزر رخ می‌دهد. در این دوره، بارش در زاگرس بین ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر و در سواحل خزر تا بیش از ۲۵۰ میلی‌متر در ماه می‌رسد. در مقابل، مناطق مرکزی و شرقی کشور هنوز مقادیر اندکی (کمتر از ۲۰ میلی‌متر) دریافت می‌کنند، اما روند افزایشی به‌تدریج مشاهده می‌شود.

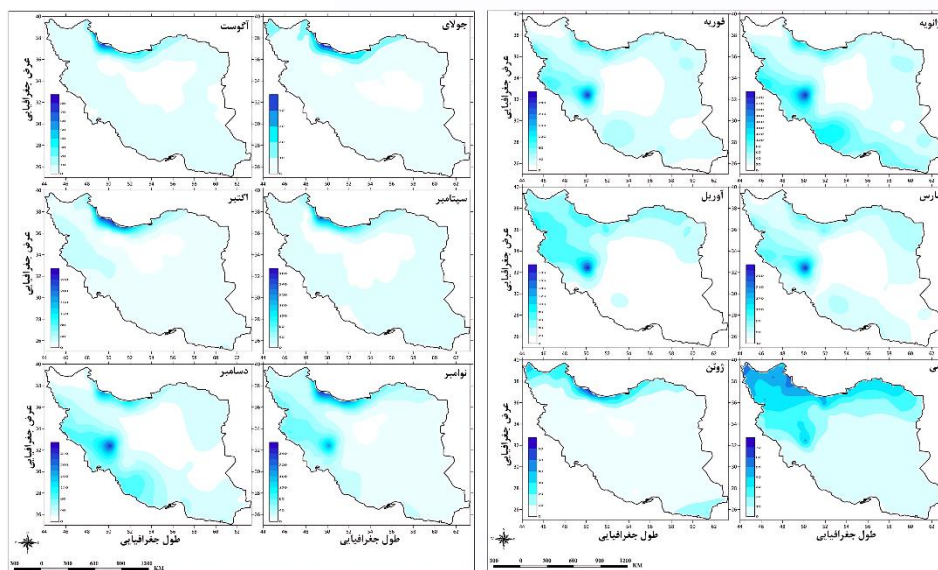


شکل ۷- نقشه میانگین مجموع بارش ماه‌های ژانویه تا دسامبر دوره آماری ۲۰۱۴ - ۱۹۸۵
Fig.7. Map of mean total precipitation from January to December during the 1985-2014

آینده نزدیک

شکل ۸ میانگین ماهانه بارش پیش‌بینی شده برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ را بر اساس سناریوی SSP5-8.5 نشان می‌دهد. همان‌طور که پیشتر نیز اشاره گردید، توزیع بارش کشور ارتباط تنگاتنگی با توزیع ارتفاعات دارد. به‌طوری‌که در بسیاری از نواحی مرتفع مقادیر بارش نسبت به نواحی اطراف بالاتر است. مقادیر افزایش بارش طی ماه‌های مختلف، متفاوت بوده و در برخی ماه‌ها کمتر و در برخی ماه‌ها بیشتر خواهد بود. البته لازم به ذکر است که افزایش دما طی دهه‌های آینده می‌تواند اثر افزایش بارش را خنثی کند.

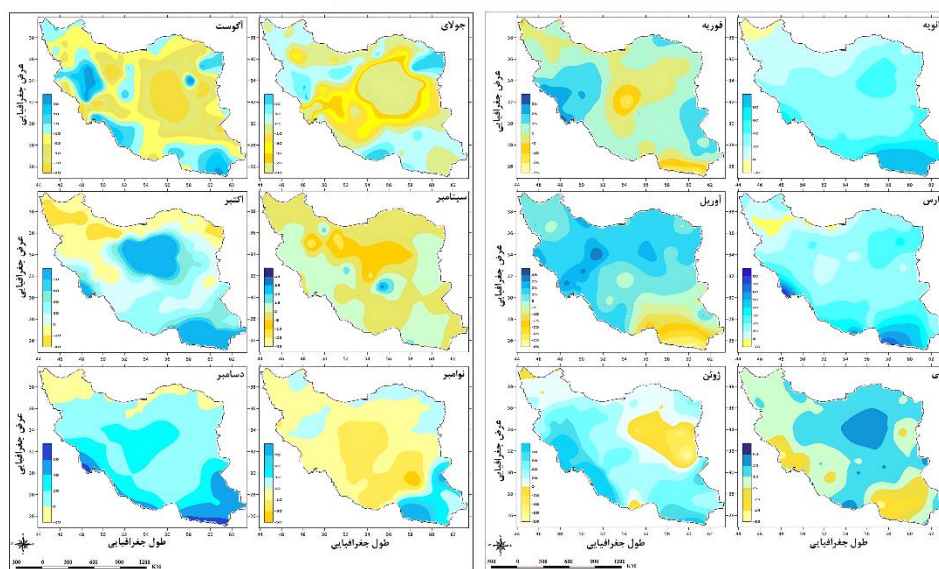
به این صورت که افزایش دما موجب افزایش تبخیر و تعرق شده و از این طریق بارش دریافت شده در نواحی مختلف را از دسترس خارج نماید. در ماه ژانویه از سناریوی SSP5-8.5 دو هفته بارشی بیش از ۲۴۰ میلی متر در زاگرس و نیز جنوب غربی دریای خزر مشاهده می‌شود. این هفته بارشی تا ماه می در کشور قابل مشاهده است. در ماه می، اکثر نواحی شمالی ایران دارای بارش‌های بیش از ۷۰ میلیمتر هستند. از ماه ژوئن تا آگوست کرانه‌های دریای خزر بارشی به طور متوسط برابر ۷۰ میلیمتر دریافت می‌کند. از ماه سپتامبر تا دسامبر بیشینه بارشی کشور در کرانه‌های دریای خزر با مقدار ۲۶۰ میلی متر می‌باشد.



شکل ۸- نقشه میانگین مجموع بارش ماه‌های ژانویه تا دسامبر دوره آماری ۲۰۲۱ - ۲۰۴۰ بر اساس سناریوی SSP5-8.5

Fig.8. Map of mean total precipitation from January to December during the 2021–2040 based on the SSP5 8.5 scenario

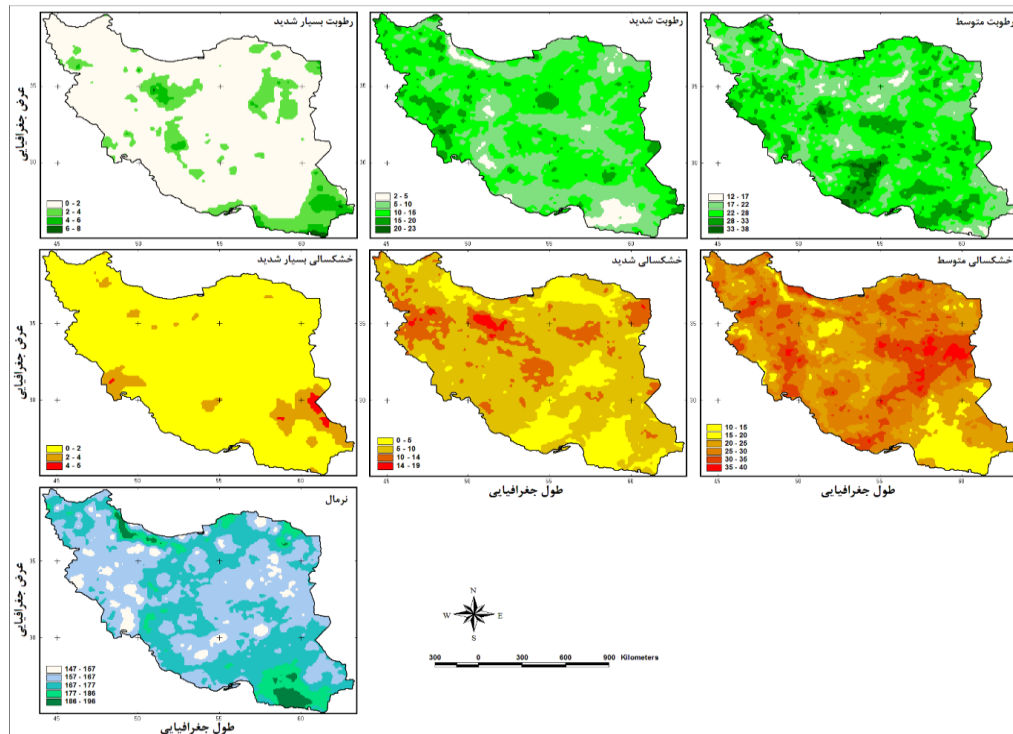
شکل ۹ ناهنجاری بارش دوره آینده نزدیک را نسبت به داده‌های گذشته کشور به درصد و برای سناریوی SSP5-8.5 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نقاط مختلف کشور ترکیبی از افزایش و کاهش بارندگی در دوره آینده دور پیش‌بینی می‌شود. افزایش بارندگی در شش ماه اول سال میلادی در قسمت‌های جنوبی کشور بیشترین میزان را خواهد داشت. همچنین در برخی از ماه‌ها نواحی غربی کشور نیز افزایش بارندگی قابل توجهی را تجربه خواهند کرد. لازم به ذکر است که در این شش ماه، سطح وسیعی از کشور افزایش بارندگی با درصدهای مختلف را تجربه خواهد کرد. کاهش بارندگی در آینده دور در ماه ژانویه در نواحی شمال غربی کشور مشاهده می‌شود. در ماه فوریه، علاوه بر نواحی شمال غربی، کاهش بارندگی در نواحی مرکزی و جنوب شرقی نیز گزارش شده است. در ماه‌های آوریل و مه، بیشترین کاهش بارندگی در نواحی جنوب شرقی کشور رخ می‌دهد. در ماه ژوئن، بیشترین کاهش بارش در شرق کشور ایران قابل مشاهده است. از ماه جولای تا سپتامبر، اکثر نواحی ایران با کاهش بارش مواجه خواهند بود و تنها بخش‌هایی از نواحی ارتفاعی و کرانه‌های دریای عمان و خلیج فارس افزایش بارش را تجربه می‌کنند. در ماه اکتبر، افزایش بارش عمدتاً در نواحی مرکزی و جنوب شرقی کشور مشاهده می‌شود، و در ماه‌های نوامبر و دسامبر نیز افزایش بارش در جنوب شرقی کشور قابل توجه است.



شکل ۹- درصد ناهنجاری بارش ماه‌های ژانویه تا دسامبر دوره آینده نزدیک بر اساس سناریوی SSP5-8.5

Fig.9. Precipitation percentage Anomalies from January to December in the Near-Future Period Based on the SSP5 8.5 Scenario

شکل ۱۰ فراوانی رخداد هر یک از طبقات شاخص SPEI برای سناریوی SSP5-8.5 را نشان می‌دهد. در رطوبت بسیار شدید نواحی بیشینه همچنان در جنوب شرقی کشور واقع شده‌اند. البته محل قرارگیری بالاترین فراوانی به سمت عرض‌های پایین در ساحل دریای عمان جابه‌جا شده و سطح بسیار کوچکی دارد. در قسمت‌های شرقی و مرکزی کشور نیز فراوانی ۴ - ۲ و ۶ - ۴ ماه به چشم می‌خورد. سطح بزرگی از کشور فراوانی ۲ - ۰ ماه خواهد داشت. ناحیه بیشینه در بوشهر و فارس واقع شده است. ۲ هسته بیشینه کوچک نیز در مرکز و شمال غرب کشور به چشم می‌خورد. بالاترین سطح کشور نیز ۲۸ - ۲۲ ماه فراوانی خواهد داشت. بخش وسیعی از کشور در غرب و مرکز و بخش‌هایی از شرق فراوانی ۱۰ - ۵ ماه را تجربه خواهند کرد. نواحی بیشینه، اغلب در نیمه شمالی کشور واقع شده‌اند. نواحی کمینه، نیز در جنوب، جنوب شرق، شمال شرق و قسمتی از ناحیه خزری قرار دارند. در این سناریو در نواحی مرکزی، غربی و شرقی نیز فراوانی‌های کمینه به صورت لکه‌های پراکنده دیده می‌شود. فراوانی‌های بیشینه بیشتر در شرق کشور تمرکز دارند. بخش وسیعی از کشور فراوانی ۳۰ - ۲۰ ماه را تجربه خواهد کرد.



شکل ۱۰- فراوانی رخداد انواع وضعیت SPEI طی دوره ۲۰۲۱ – ۲۰۴۰ بر اساس سناریوی SSP5-8.5

Fig.10. Frequency of occurrence of different SPEI conditions during the period of 2021–2040 based on the SSP5-8.5 scenario

بحث

تحلیل خروجی‌های همادی‌شده مدل‌های CMIP6 نشان‌دهنده تغییرات چشمگیر در الگوهای خشکسالی ایران در دهه‌های آینده است. یافته‌های این پژوهش، که تصویری نگران‌کننده از تشدید فراوانی و گسترش مکانی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در ایران تحت سناریوی پرمخاطره SSP5-8.5 ارائه می‌دهد، در راستای اجماع علمی رو به رشد در خصوص آسیب‌پذیری شدید منطقه خاورمیانه در برابر تغییرات اقلیمی قرار دارد (Khosravi & Ouarda, 2025; Abd-Elhamid et al., 2025). با این حال، اهمیت این نتایج نه در تکرار این هشدار کلی، بلکه در تحلیل دقیق مکانیسم‌ها و الگوهای فضایی این پدیده نهفته است؛ به‌طوری‌که شناسایی مناطق جنوبی، شرقی و مرکزی کشور به عنوان کانون‌های اصلی بحران آبی خشکسالی، هم‌سویی قابل توجهی با مطالعاتی دارد که بر افزایش ریسک خشکسالی در این نواحی تأکید کرده‌اند (Shoja, Hamidianpour & Barahooie, 2025; Ghaemi, Hashemi). پژوهش حاضر نیز با استفاده از جدیدترین نسل مدل‌های CMIP6، این پیش‌نمایی‌ها را با دقت بیشتری تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که مناطق یاد شده نه تنها با خشکسالی‌های شدیدتر، بلکه با تکرار بیشتر آن‌ها مواجه خواهند شد که این امر تاب‌آوری اکوسیستم‌ها و جوامع محلی را به شدت به چالش می‌کشد.

یکی از کلیدی‌ترین یافته‌های مطالعه، تبیین نقش مسلط افزایش دما در شکل‌دهی به بیان آبی آینده ایران است؛ مطابق نتایج به‌دست آمده حتی در صورت وقوع افزایش جزئی بارش در برخی فصول و مناطق، افزایش شدید دما و به تبع آن تبخیر و تعرق پتانسیل، اثرات مثبت این پارامتر را کاملاً خنثی کرده و منجر به تشدید کمبود رطوبت مؤثر می‌شود. این پدیده، که گاه از آن به عنوان «خشکسالی گرم» (Hot Drought) یاد می‌شود، یک تهدید جدی برای امنیت آبی و غذایی کشور است.

نتیجه مورد بحث، توسط یافته‌های بیات افشاری و همکاران (Bayat-Afshary, Danesh-Yazdi & Shakeri, 2025) پشتیبانی می‌شود که پیش‌بینی کرده‌اند تبخیر و تعرق در بخش کشاورزی ایران می‌تواند تا ۲۳/۸٪ افزایش یابد و حتی راهکارهای مدیریتی مانند کاهش سطح زیر کشت نیز قادر به جبران کامل آن نخواهد بود. این موضوع همچنین اعتبار روش‌شناختی پژوهش حاضر در انتخاب شاخص SPEI را برجسته می‌سازد. همان‌طور که خزائی (Khazaei, 2025) در مطالعه موردی تهران نشان می‌دهد، شاخص‌های مبتنی بر بارش تنها (مانند SPI) در عصر گرمایش جهانی، تصویر گمراه‌کننده‌ای از واقعیت خشکسالی ارائه می‌دهند، زیرا عامل حیاتی تقاضای اتمسفری برای آب را نادیده می‌گیرند.

در مقایسه الگوهای مکانی، نتایج مطالعه حاضر مبنی بر تمرکز خشکسالی در مناطق مرکزی، هم‌خوانی کاملی با پژوهش قائمی و همکاران (Ghaemi et al., 2024) دارد که افزایش هم‌زمان شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی را برای حوضه مرکزی ایران پیش‌نگری کرده بودند. با این حال، تحلیل دقیق‌تر تفاوت‌هایی را نیز آشکار می‌سازد؛ برای مثال، مطالعه‌ایشان که مبتنی بر مدل‌های CMIP5-CORDEX است، الگوهای متفاوتی را برای جنوب غرب کشور (افزایش شدت اما کاهش تداوم) گزارش می‌دهد. تفاوت‌های ذکر شده می‌تواند ناشی از بهبود فرآیندهای فیزیکی در مدل‌های CMIP6، تفاوت در روش‌های ریزگردانی و یا شاخص خشکسالی مورد استفاده باشد و بر این نکته تأکید دارد که مشخصه‌های مختلف خشکسالی (شدت، تداوم، فراوانی) ممکن است پاسخ‌های غیرخطی و متفاوتی به گرمایش جهانی در مناطق گوناگون بدهند. به طور مشابه، در حالی که پژوهش پیش‌رو یک روند کلی تشدید خشکسالی را نشان می‌دهد، یوسفی و همکاران (Yousefi, Ahani, Moridi & Razavi, 2024) با استفاده از مدل‌های CMIP6، احتمال کاهش شدت خشکسالی در نوار ساحلی خلیج فارس را مطرح می‌کنند که این امر لزوم تحلیل‌های دقیق‌تر در مقیاس‌های محلی و در نظر گرفتن اثرات تعدیل‌کننده پهنه‌های آبی بزرگ را برجسته می‌سازد.

انتخاب سناریوی SSP5-8.5 در این پژوهش، یک تصمیم راهبردی با هدف ارائه یک «آزمون تنش» برای سیستم مدیریت منابع آب کشور بود. نتایج حاصل از این سناریوی بدبینانه، با یافته‌های بیات‌اورکشی و همکاران (Bayatavrkeshi et al., 2023) تحت سناریوی پرناتشار قدیمی A2 هم‌خوانی دارد. هر دو مطالعه نشان می‌دهند که در دهه‌های پایانی قرن، فراوانی و شدت خشکسالی به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد. یافته موردنظر، اهمیت راهبردی تحلیل سناریوهای پرمخاطره را برای سیاست‌گذاری که مسئول طراحی زیرساخت‌های حیاتی و برنامه‌های بلندمدت امنیت ملی هستند، روشن می‌سازد. در حالی که مطالعاتی مانند احدی و همکاران (Ahadi et al., 2025) نشان می‌دهند که پاسخ سیستم اقلیمی ممکن است در کوتاه‌مدت متفاوت از بلندمدت باشد (برای مثال، کاهش موقت شدت خشکسالی)، نتایج این پژوهش بر این دلالت راهبردی تأکید دارد که سیاست‌گذاری‌های انطباقی باید فراتر از نوسانات کوتاه‌مدت نگرین و بر مبنای آمادگی برای مواجهه با روندهای حدی پایدار در افق‌های زمانی بلندمدت تدوین شوند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارائه یک تحلیل جامع و پیش‌نمایی از خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در گستره ایران، انجام پذیرفت. نتایج حاصل، چشم‌انداز چالش‌برانگیزی را برای آینده منابع آب کشور ترسیم می‌کند و پاسخ‌های روشنی به سؤالات محوری این تحقیق ارائه می‌دهد. تحلیل‌ها نشان داد که علی‌رغم تغییرات پیچیده در الگوهای بارش، روند غالب در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) به سمت افزایش فراوانی و گسترش دامنه مکانی خشکسالی‌های هواشناسی خواهد بود. این پدیده، عمدتاً ناشی از افزایش شدید دمای هوا و به تبع آن، افزایش تقاضای تبخیری اتمسفر است که هرگونه افزایش احتمالی بارش را بی‌اثر کرده و منجر به بیلان آبی منفی در بخش‌های وسیعی از کشور، به‌ویژه در فصول گرم سال می‌شود. این یافته، بر تحول ماهیت خشکسالی در عصر تغییر اقلیم از یک پدیده، صرفاً ناشی از کمبود بارش به یک بحران ناشی از خشکسالی گرم صحنه می‌گذارد.

بر اساس پیش‌نمایی‌های انجام‌شده، توزیع فضایی ریسک خشکسالی در ایران یکنواخت نخواهد بود. مناطق جنوبی، شرقی و مرکزی کشور به‌وضوح به عنوان «کانون‌های داغ» (Hotspots) آسیب‌پذیری شناسایی شدند که در آینده با بیشترین فراوانی رخداد خشکسالی مواجه خواهند شد. این پهنه‌بندی ریسک، یک ابزار راهبردی حیاتی برای سیاست‌گذاران فراهم می‌آورد تا بتوانند منابع محدود مالی و فنی را به صورت هدفمند به مناطقی تخصیص دهند که در خط مقدم مواجهه با بحران آب قرار دارند. یافته‌های این پژوهش، دلالت‌های عمیقی برای مدیریت منابع آب کشور دارد و بر ضرورت یک گذار پارادایمی فوری از رویکردهای سنتی «مدیریت بحران» واکنشی به یک چارچوب جامع «مدیریت ریسک» پیشگیرانه تأکید می‌کند. این چارچوب باید بر سه ستون اصلی استوار باشد: بازنگری اساسی در الگوهای تخصیص و مصرف آب با اولویت‌بخشی به مدیریت تقاضا، تقویت و هوشمندسازی سامانه‌های پایش و هشدار سریع خشکسالی، و سرمایه‌گذاری در راهکارهای افزایش تاب‌آوری اکولوژیکی و اجتماعی. این اقدامات بیانگر گذار ضروری از یک رویکرد واکنشی به یک استراتژی پیشگیرانه و مبتنی بر علم است که یافته‌های این تحقیق، ضرورت انکارناپذیر آن را برای تضمین امنیت آبی پایدار ایران به اثبات می‌رساند.

محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادها برای آینده

با وجود ارائه تصویری روشن از آینده محتمل، لازم است محدودیت‌های این پژوهش نیز مورد توجه قرار گیرد. نخست، تمرکز انحصاری بر سناریوی SSP5-8.5 یک محدودیت کلیدی است. اگرچه این انتخاب برای هدف راهبردی آزمون تنش آگاهانه بود، اما این سناریو تنها یکی از آینده‌های محتمل را به تصویر می‌کشد و از ارائه طیف کاملی از ریسک‌ها باز می‌ماند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تحلیل مقایسه‌ای با سناریوهای خوش‌بینانه‌تر و بینابین (مانند SSP1-2.6 و SSP2-4.5) انجام شود تا چشم‌انداز جامع‌تری برای برنامه‌ریزی تطبیقی فراهم گردد.

دوم، ایران کشوری با تنوع اقلیمی بسیار بالا است. اعمال یک مجموعه مدل در مقیاس ملی، هر چند برای دستیابی به یک تصویر کلان ضروری است، اما ممکن است پیچیدگی اقلیم‌های محلی را به طور کامل پوشش ندهد. برخی نواحی به دلیل ساختارهای اجتماعی - اقتصادی و اکولوژیکی، حساسیت بیشتری به پیامدهای خشکسالی دارند. لذا، انجام مطالعات ریزمقیاس با استفاده از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCMs) و واسنجی مدل‌ها بر اساس شرایط هر حوضه آبریز، گام بعدی ضروری در این راستاست.

در نهایت، تحقیق حاضر بر خشکسالی هواشناسی متمرکز بود. درک کامل بحران آب نیازمند تحلیل یکپارچه خشکسالی‌های هیدرولوژیک (جریان رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی) و کشاورزی (رطوبت خاک) و پیوند دادن آن‌ها با شاخص‌های آسیب‌پذیری اجتماعی - اقتصادی است.

راهکارهای مدیریتی

بر اساس یافته‌های پژوهش و با الهام از تجارب جهانی (Kahil, Dinar & Albiac, 2015; Rahman, Jung, Kim & Kwon, 2025)، راهکارهای عملیاتی زیر برای مدیریت ریسک خشکسالی در ایران پیشنهاد می‌شود:

- ۱- پهنه‌بندی ریسک و تخصیص آب مبتنی بر آن: با استفاده از نقشه‌های کانون‌های بحران تولیدشده در این پژوهش، لازم است یک سیستم تخصیص آب انعطاف‌پذیر و مبتنی بر ریسک طراحی شود. در مناطق پرخطر (جنوب و شرق)، لازم است سیاست‌های سخت‌گیرانه‌تری برای محدودیت کشت محصولات آب‌بر و ترویج الگوهای کشت مقاوم به خشکی اعمال گردد.
- ۲- گذار از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضای آب: یافته‌ها نشان داد که افزایش تبخیر و تعرق، اثر هرگونه افزایش بارش را از بین می‌برد. این بدان معناست که راه‌حل بحران آب در ساخت سازه‌های جدید تأمین آب نیست، بلکه در مدیریت قاطعانه تقاضا، به‌ویژه در بخش کشاورزی است. ارتقای بهره‌وری آبیاری، اجرای برنامه‌های بازچرخانی آب و اصلاح ساختار تعرفه‌های آب از اقدامات کلیدی در این زمینه می‌باشد.

۳- تقویت سامانه‌های هشدار سریع فصلی: با توجه به تشدید خشکسالی در بهار و تابستان، سامانه‌های هشدار سریع باید از پیش‌بینی‌های اقلیمی فصلی برای ارائه هشدارهای به‌موقع به کشاورزان و مدیران سدها استفاده کنند تا امکان اتخاذ تصمیمات پیشگیرانه مانند تغییر تاریخ کشت یا تنظیم خروجی سدها فراهم شود.

۴- سرمایه‌گذاری در منابع آب نامتعارف و حفاظت از آبخوان‌ها: در مناطق خشک و نیمه‌خشکی که آینده‌ای خشک‌تر برای آن‌ها پیش‌بینی می‌شود، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های آب شیرین‌کن (در نوار ساحلی)، تصفیه فاضلاب برای مصارف کشاورزی و صنعتی و طرح‌های تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها برای ذخیره سیلاب‌های زمستانی، یک ضرورت راهبردی برای افزایش تاب‌آوری است (Razavi-Termeh et al., 2024).

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی و سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۳۷۴۱۸ انجام شده است.

References

- Abd-Elhamid, H. F., El-Dakak, A. M., Saleh, O. K., Zelenáková, M., Junakova, N., Alkhalaf, I., ... & Fathy, I. (2025). Assessment of drought risks in arid regions utilizing remote sensing data and the standardized precipitation index in the context of climate change. *Earth Systems and Environment*, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00678-z>
- Ahadi, M., Zeynali, B., Salahi, B., Shoja, F., Fazl Kazemi, A., Babaeian, I., & Kohi, M. (2025). Projection of future drought trends in Iran using the CMIP6 multi-model ensemble. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 1-1. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.50138.2075>
- Akinsanola, A. A., Kooperman, G. J., Pendergrass, A. G., Hannah, W. M., & Reed, K. A. (2020). Seasonal representation of extreme precipitation indices over the United States in CMIP6 present-day simulations. *Environmental Research Letters*, 15(9), 1–12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb397>
- Alemu, M. G., Wubneh, M. A., Worku, T. A., Womber, Z. R., & Chanie, K. M. (2023). Comparison of CMIP5 models for drought predictions and trend analysis over Mojo catchment, Awash Basin, Ethiopia. *Scientific African*, 22, e01891. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01891>
- Alijani, B. (2011). Spatial analysis of critical daily temperature and precipitation in Iran. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 11(20), 1–29. [In Persian] <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-593-fa.html>
- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Kamil, S., Abid, M. A., ... & Sylla, M. B. (2021). Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 155–181. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>
- Ayugi, B., Dike, V., Ngoma, H., Babaousmail, H., Mumo, R., & Ongoma, V. (2021). Future changes in precipitation extremes over East Africa based on CMIP6 models. *Water*, 13(17), 2358. <https://doi.org/10.3390/w13172358>
- Azizi, Q., Safarrad, T., Mohammadi, H., & Faraji Sabokbar, H. A. (2016). Evaluation and comparison of precipitation reanalysis data for use in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 48(1), 33–49. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.57026>
- Babaeian, I., Rahmatinia, A. E., Entezari, A., Baaghdeh, M., Aval, M. B., & Habibi, M. (2021). Future projection of drought vulnerability over northeast provinces of Iran during 2021–2100. *Atmosphere*, 12(12), 1704. <https://doi.org/10.3390/atmos12121704>

- Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D. L., Feng, P., & Tang, J. (2020). Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China Plain. *International Journal of Climatology*, 40, 21–39. <https://doi.org/10.1002/joc.6674>
- Bayat-Afshary, N., Danesh-Yazdi, M., & Shakeri, F. (2025). Machine learning projections of Iran's water scarcity response to climate-land use synergies. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 61, 102638. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102638>
- Bayatavrkeshi, M., Imteaz, M. A., Kisi, O., Farahani, M., Ghabaei, M., Al-Janabi, A. M. S., ... & Yaseen, Z. M. (2023). Drought trends projection under future climate change scenarios for Iran region. *PLoS ONE*, 18(11), e0290698. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290698>
- Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Hashemy Shahdany, S. M., Moridi, A., Neshat, A., ... & Maghsoudi, R. (2024). Projections of meteorological drought severity-duration variations based on CMIP6. *Scientific Reports*, 14(1), 5027. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55340-x>
- Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., ... & Vuichard, N. (2020). Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7), e2019MS002010. <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>
- Carrao, H., Barbosa, P., & Dos Santos, J. R. (2018). Drought assessment: A global overview. *Global and Planetary Change*, 164, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.03.012>
- Chen, Q., Zhao, T., Hua, L., Yu, J., Wang, Y., & Xu, C. (2023). Future drought changes in China projected by the CMIP6 models: Contributions from key factors. *Journal of Meteorological Research*, 37(4), 454–468. <https://doi.org/10.1007/s13351-023-2169-8>
- Chen, Z., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., & Jiang, J. (2020). Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 projections. *Geophysical Research Letters*, 47(14), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2019GL086902>
- Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001461. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- Elkouk, A., Amiraslani, F., & Ashraf, M. (2022). Drought risk assessment in Sub-Saharan Africa and South Asia: A comparative analysis. *Environmental Science & Policy*, 123, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.09.003>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Farahmand, A., & Agha Kouchak, A. (2015). A standardized approach for drought monitoring. *Earth System Science Data*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.5194/essd-7-1-2015>
- Ghaemi, A., Hashemi Monfared, S. A., Bahrpeyma, A., Mahmoudi, P., & Zounemat-Kermani, M. (2024). Spatiotemporal variation of projected drought characteristics in Iran under climate change scenarios using CMIP5-CORDEX product. *Journal of Water and Climate Change*, 15(3), 1054–1075. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.468>
- Hamidianpour, M., & Shoja, F. (2022). *An introduction to methods and techniques of climate and climate change modeling*. Zahedan Press. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jtd.2023.380876.2725>
- Kahil, M. T., Dinar, A., & Albiac, J. (2015). Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions. *Journal of Hydrology*, 522, 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.042>
- Kamangar, M., Ahmadi, M., Rabiei-Dastjerdi, H., & Hazbavi, Z. (2025). Ensemble modeling of extreme seasonal temperature trends in Iran under socio-economic scenarios. *Natural Hazards*, 121(2), 1265–1288. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06830-8>

- Kawai, H., Yukimoto, S., Koshiro, T., Oshima, N., Tanaka, T., Yoshimura, H., & Nagasawa, R. (2019). Significant improvement of cloud representation in the global climate model MRI-ESM2. *Geoscientific Model Development*, 12(7), 2875–2897. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2875-2019>
- Khan, A. J., Koch, M., & Tahir, A. A. (2020). Impacts of climate change on the water availability, seasonality and extremes in the Upper Indus Basin (UIB). *Sustainability*, 12(4), 1283. <https://doi.org/10.3390/su12041283>
- Khazaei, M. R. (2025). Projected changes to drought characteristics in Tehran under CMIP6 SSP-RCP climate change scenarios. *Heliyon*, 11(2), e41811. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41811>
- Khoorani, A., Balaghi, S., & Mohammadi, F. (2024). Projecting drought trends and hot spots across Iran. *Natural Hazards*, 120(11), 9489–9502. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06574-5>
- 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(1), 384. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02359-1>
- Lanen, H. A. J., Van Lanen, H. A. J., & Heggen, B. J. (2007). Drought and its relationship to climate change. *Global and Planetary Change*, 59(3–4), 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.04.003>
- Li, S. Y., Miao, L. J., Jiang, Z. H., Wang, G. J., Gnyawali, K. R., Zhang, J., ... & Li, C. (2020). Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015–2099. *Advances in Climate Change Research*, 11(3), 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2020.09.003>
- 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>
- Lu, J., Carbone, G. J., & Grego, J. M. (2019). Uncertainty and hotspots in 21st century projections of agricultural drought from CMIP5 models. *Scientific Reports*, 9(1), 4922. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41196-z>
- Masoudian, A., & Kaviani, M. (2008). *Climatology of Iran*. University of Isfahan Press. [In Persian]
- Müller, W. A., Jungclaus, J. H., Mauritsen, T., Baehr, J., Bittner, M., Budich, R., ... & Marotzke, J. (2018). A higher-resolution version of the max planck institute earth system model (MPI-ESM1. 2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(7), 1383–1413. <https://doi.org/10.1029/2017MS001217>
- Nasrollahi, N., AghaKouchak, A., Cheng, L., Damberg, L., Phillips, T. J., Miao, C., ... & Sorooshian, S. (2015). How well do CMIP5 climate simulations replicate historical trends and patterns of meteorological droughts? *Water Resources Research*, 51(4), 2847–2864. <https://doi.org/10.1002/2014WR016318>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Oshima, N., Yukimoto, S., Deushi, M., Koshiro, T., Kawai, H., Tanaka, T. Y., & Yoshida, K. (2020). Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00348-w>
- Rahman, G., Jung, M. K., Kim, T. W., & Kwon, H. H. (2025). Drought impact, vulnerability, risk assessment, management and mitigation under climate change: A comprehensive review. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 29(1), 100120. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100120>
- Razavi-Termeh, S. V., Sadeghi-Niaraki, A., Farhangi, F., Khiadani, M., Pirasteh, S., & Choi, S. M. (2024). Solving water scarcity challenges in arid regions: a novel approach employing human-based meta-heuristics and machine learning algorithm for groundwater potential mapping. *Chemosphere*, 363, 142859. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142859>
- Sellar, A. A., Walton, J., Jones, C. G., Wood, R., Abraham, N. L., Andrejczuk, M., ... & Griffiths, P. T. (2020). Implementation of UK Earth system models for CMIP6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(4), e2019MS001946. <https://doi.org/10.1029/2019MS001946>

- Sentman, L. T., Dunne, J. P., Stouffer, R. J., Krasting, J. P., Toggweiler, J. R., & Broccoli, A. J. (2018). The mechanistic role of the Central American Seaway in a GFDL Earth System Model. Part 1: Impacts on global ocean mean state and circulation. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 33(7), 840–859. <https://doi.org/10.1029/2018PA003364>
- Shoja, F., Hamidianpour, M., & Barahooie, D. (2025). Forecasting climate change effects on drought using the decadal climate prediction project in arid and semi-arid regions of southeastern Iran. *Natural Hazards*, 1–28. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07405-x>
- Silva, L. F. (2003). Drought monitoring using remote sensing and GIS: A case study of Brazil. *Journal of Environmental Management*, 68(1), 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)00080-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00080-4)
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wang, B., Jin, C., & Liu, J. (2020). Understanding future change of global monsoons projected by CMIP6 models. *Journal of Climate*, 33(15), 6471–6489. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0993.1>
- Wehner, M. (2013). Very extreme seasonal precipitation in the NARCCAP ensemble: Model performance and projections. *Climate Dynamics*, 40(1), 59–80. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1393-1>
- Whipple, W. (1966). Droughts: Their occurrence and effects. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 92(3), 25–38. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001450>
- World Bank Group. (2016). *Climate change and water resources in Iran*. <https://www.worldbank.org/en/country/iran/publication/climate-change-water-resources-iran>
- You, Q., Cai, Z., Wu, F., Jiang, Z., Pepin, N., & Shen, S. S. (2021). Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty. *Climate Dynamics*, 57(1), 17–35. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05691-2>
- 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>
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Drought risk management in a changing climate: The role of national policies and the Drought Management Plan (DMP). *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(1), 107–112. [In Persian] https://jwsd.um.ac.ir/article_40281.html
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Kadkhoda, E. (2022). Drought projection in the Urmia Lake basin under SSP Scenarios until the end of the 21st Century. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(7), 1499–1516. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343700.669278>
- Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *Atmospheric Research*, 246, 105111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105111>
- Zhang, Y., & Yao, S. (2012). Drought risk assessment: A new methodology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 2803–2811. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2803-2012>
- Zhao, T., & Dai, A. (2022). CMIP6 model-projected hydroclimatic and drought changes and their causes in the twenty-first century. *Journal of Climate*, 35(3), 897–921. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0442.1>
- Zhou, H., Zheng, Y., & Guo, Z. (2021). Extreme weather events and their impact on water resources: A review. *Water*, 13(4), 521. <https://doi.org/10.3390/w13040521>
- Zhu, S., Ge, F., Fan, Y., Zhang, L., Sielmann, F., Fraedrich, K., & Zhi, X. (2020). Conspicuous temperature extremes over Southeast Asia: seasonal variations under 1.5 C and 2 C global warming. *Climatic Change*, 160(3), 343–360. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02640-1>