

Response of Drought Frequency and Intensity to Climate Change in Iran Under Future Projections

Abbasali Dadashi-Roudbari¹

1- Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Introduction

Drought stands as one of the most complex and devastating climate hazards, triggering far-reaching consequences for global economies, human societies, and natural ecosystems. Recent years have yielded compelling evidence pointing to a worldwide surge in drought occurrences. Driven by climate change, both the frequency and intensity of these events have escalated markedly a trend heavily documented across authoritative international reports and historical literature. Looking ahead, the trajectory remains deeply concerning. As temperatures continue their upward climb alongside unpredictable shifts in global precipitation regimes, droughts are projected to become even more frequent and intense. When paired with surging water demands fueled by rapid population growth, these climate anomalies forge a stark dichotomy between societal water needs and the actual limitations of accessible resources.

Within the specific context of Iran, shifting climate patterns and extreme weather events have pushed uncertainties in strategic planning and water resource management to unprecedented levels. Relying on a single climate model analyses falls critically short when attempting to evaluate genuine risk. Instead, regionally assessing a phenomenon with such intricate dynamics necessitates rigorous, multifaceted investigations utilizing state-of-the-art data and methodologies. To bridge this critical research gap, the present study tackles a foundational question: how exactly will the frequency and intensity of droughts across Iran evolve under future climate change scenarios? We address this by integrating ground-based observational data with bias-corrected, multi-model ensemble outputs from the CMIP6. Ultimately, the core objective is to map out a lucid, highly detailed projection of how these two defining drought characteristics will shift across the Iranian landscape. The insights generated here are intended to serve as a practical roadmap. By detailing these future scenarios, this work provides the foundational evidence required for policymakers to design robust adaptation and risk management strategies, thereby safeguarding regional water and food security against the devastating impacts of prolonged dry spells.

Materials and Methods

Robustly modeling drought dynamics and isolating its core characteristics necessitated a comprehensive analytical framework. This structure inherently relies on integrating empirical baseline observations with the predictive capabilities of General Circulation Models (GCMs). For the historical (1990 to 2014), we extracted critical meteorological variables specifically, precipitation and temperature from a targeted of synoptic stations. To generate robust future climate projections, the study employed a diverse ensemble of GCMs. Each model was utilized alongside specific execution variants to account for internal climate variability. The selected ensemble and their corresponding variant labels are as follows: CanESM5 (r1i1p1f1), CNRM-CM6-1 (r1i1p1f2), CNRM-ESM2-1 (r1i1p1f2), EC-Earth3 (r1i1p1f1), GFDL-ESM4 (r1i1p1f1), IPSL-CM6A-LR (r1i1p1f1), MIROC6 (r1i1p1f1), MPI-ESM1-2-HR (r1i1p1f1), MRI-ESM2-0 (r1i1p1f1), and UKESM1-0-LL (r1i1p1f2). Evaluating drought severity within the broader context of global warming demands a metric highly responsive to shifting thermal and atmospheric moisture conditions. For this purpose, we applied the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). Deriving this index begins with a foundational metric: the monthly climate water balance. By calculating the difference between incoming precipitation and potential evapotranspiration ($D_i = P_i - PET_i$), we establish the initial monthly moisture deficit or surplus (Vicente-Serrano et al., 2020). These raw calculated values, however, must be statistically normalized to allow for spatial and temporal comparability. Consequently, the resulting time series is fitted to a log-logistic probability distribution function. Because this specific statistical distribution effectively captures the heavy-tailed behavior typical of hydro climatological extremes, it provides a highly accurate representation of the data. Through this statistical fitting procedure, the cumulative probabilities are ultimately transformed into a standard normal distribution to yield the final standardized drought index.

Results and Discussion

To better comprehend the variability of drought events across Iran, the present study evaluated the performance of CMIP6 models and their capacity to project key drought characteristics. Assessing the multi-model ensemble (CMIP6-MME) in reproducing the 12-month Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI-12) over a historical (1990-2014) across nine synoptic stations reveals a systematic dry bias inherent to the ensemble output for the country's arid and semi-arid climates. This discrepancy is most acutely observed at the Mashhad station, where the bias value dropped to -0.47. Such evaluations expose a clear spatial heterogeneity in simulation accuracy. The CMIP6-MME adeptly modeled the multi-year cycles of the SPEI across higher latitudes and within mountainous, semi-arid terrains like Tabriz and Mashhad. Conversely, the ensemble struggled significantly in the Caspian climate zone (Gorgan station). This underperformance stems directly from the restricted horizontal resolution of General Circulation Models (GCMs), which fail to adequately capture intricate land-sea interactions alongside the topographic forcing exerted by the Alborz Mountains. Historical drought profiling across Iran demonstrated that higher latitudes and mountainous expanses have recently suffered severe drought episodes, recording SPEI values ranging from -1.5 to -1.73. Strikingly, these regions experienced such extremes despite historically maintaining more positive precipitation balances a shift driven largely by the pervasive influence of global warming signals and a cascading rise in potential evapotranspiration (PET). Echoing findings from broader global literature, this data points to a fundamental shift in climate dynamics. The escalating severity of droughts over recent decades is no longer dictated primarily by precipitation shortfalls; instead, it is intrinsically tied to a surging atmospheric evaporative demand (AED).

Conclusion

Drawing upon CMIP6 multi-model ensemble outputs, this research conclusively demonstrates that global warming and escalating atmospheric evaporative demand (AED) will fundamentally alter the structural dynamics of drought across Iran. The trajectory of future warming directly dictates the severity of these events. Specifically, as climate scenarios transition from the moderate SSP1-2.6 pathway to the high-emission SSP5-8.5, dry spells striking the mid-latitudes and southern territories will experience a profound amplification in intensity. This shifting climate reality necessitates a radical recalibration of national water resource management strategies. Adaptive frameworks in the northern strip must now be optimized to counteract frequent, albeit mild, water shortages. The southern expanse dictates an entirely different priority: building robust infrastructure and socio-ecological resilience against less frequent but acutely extreme and critical drought episodes. Ultimately, tracking these evolving spatial shifts relies on evaluating dry periods across standardized timescales, accompanied by a critical focus on the increasingly dominant role that potential evapotranspiration will play in shaping Iran's future climate.

Keywords: Drought, SPEI, CMIP6, SSP scenarios, Iran.

پاسخ فراوانی و شدت خشکسالی در ایران به تغییر اقلیم در افق‌های آینده

عباسعلی داداشی رودباری*

۱- استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*ایمیل نویسنده مسئول: a-dadashi@um.ac.ir

<https://orcid.org/0000-0002-9308-1019>

چکیده

درک دینامیک خشکسالی تحت تأثیر گرمایش جهانی و افزایش تقاضای تبخیری جو، برای مدیریت ریسک منابع آب امری حیاتی است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل و پیش‌نگری مشخصه‌های خشکسالی در ایران انجام شد. برای این منظور از خروجی‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) یک چند مدلی همادی (CMIP6-MME) تولید شد. در گام نخست روش‌شناسی، کارایی CMIP6-MME در بازتولید شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI-12) طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) در نه ایستگاه هم‌دید ارزیابی شد. بررسی سنجه‌های آماری نشان داد که علی‌رغم مقادیر $NSE < 0$ ناشی از عدم تطابق فازهای زمانی در مدل‌های گردش کلی، شاخص توافق ویلموت توانمندی CMIP6-MME را در شبیه‌سازی رفتار اقلیمی، به‌ویژه در عرض‌های بالاتر و

پهنه‌های کوهستانی تأیید می‌کند. در گام بعد، تغییرات زمانی-مکانی شدت و فراوانی خشکسالی برای سه افق آینده (تا سال ۲۱۰۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بررسی شد. خروجی‌ها حاکی از شکل‌گیری یک ساختار اقلیمی دوقطبی در آینده است. در عرض‌های پایین‌تر و نواحی جنوبی، تحت سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5)، شدت خشکسالی به آستانه‌های بسیار بحرانی ($SPEI \leq -2$) خواهد رسید؛ هرچند وقوع بارش‌های فرین موسمی، فراوانی این رخدادها را به‌طور مقطعی کاهش می‌دهد. در تقابل با این الگو، پهنه‌های شمالی کشور به تبعیت از رابطه ترمودینامیکی کلایوس-کلاپرون و افزایش آب قابل بارش، کاهش شدت خشکسالی را تجربه می‌کنند، اما فراوانی خشکسالی در این مناطق تا ۳۴ درصد افزایش می‌یابد. جابجایی مکانی هسته خشکسالی در کشور نشان می‌دهد که مناطق مختلف نیازمند اتخاذ راهبردهای انطباقی کاملاً متمایزی برای مقابله با اثرات تغییر اقلیم هستند.

واژگان کلیدی: خشکسالی، شاخص SPEI، CMIP6، سناریوهای SSP، ایران.

پایان

دانشگاه

مقدمه

خشکسالی، یکی از پیچیده‌ترین و ویرانگرترین مخاطرات اقلیمی است و پیامدهای همه‌جانبه‌ای بر اقتصاد، اجتماع و اکوسیستم‌های طبیعی در سراسر جهان تحمیل می‌کند (Ding et al., 2011; Ebi & Bowen, 2016). بررسی داده‌های تاریخی ثبت‌شده در پایگاه داده‌های بین‌المللی بلایا (EM-DAT) حاکی از آن است که در فاصله سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۹ میلادی، پدیده خشکسالی زندگی ۲ میلیارد و ۷۳۰ میلیون نفر را در سراسر جهان تحت‌الشعاع قرار داده و جان بیش از ۱۱ میلیون نفر را گرفته است. افزون بر این تلفات جانی، این مخاطره طبیعی خسارت اقتصادی هنگفتی معادل ۱ تریلیون و ۷۵۰ میلیارد دلار بر پیکره اقتصاد جهانی وارد کرده است (EM-DAT, 2026). خشکسالی هواشناسی، که با بی‌هنجاری منفی و فقدان بارش در یک بازه زمانی مشخص تعریف می‌شود (Potop et al., 2014)، به‌عنوان پیش‌نیاز و محرک اصلی سایر گونه‌های خشکسالی (کشاورزی و هیدرولوژیک) شناخته می‌شود و می‌تواند چرخه‌ای از بحران‌های درهم‌تنیده نظیر تهدید امنیت غذایی، افت کیفیت منابع آب و تشدید بیماری‌ها را به همراه داشته باشد (Rojas, 2020; Hu et al., 2021).

در سال‌های اخیر، شواهد متقنی از افزایش رخداد‌های خشکسالی در سراسر جهان گزارش شده است. گزارش‌های معتبر بین‌المللی و مطالعات پیشین تأکید می‌کنند که تحت تأثیر تغییر اقلیم، نه تنها فراوانی این پدیده، بلکه شدت آن نیز به شکلی قابل توجهی افزایش یافته است (Dai et al., 2004; IPCC, 2013). انتظار می‌رود در افق‌های پیش رو، با تداوم روند افزایشی دما و تغییرات در رژیم‌های بارش جهانی، خشکسالی‌ها تکرارپذیرتر و شدیدتر شوند. این بی‌هنجاری‌های اقلیمی در کنار رشد فزاینده تقاضا برای آب به دلیل افزایش جمعیت، تضاد نگران‌کننده‌ای را میان نیازهای آبی و محدودیت‌های منابع آب در دسترس ایجاد کرده است (Trenberth et al., 2014). بطوریکه کاهش بارش‌های سالانه و تشدید تبخیر-تعرق پتانسیل ناشی از گرمایش جهانی، پایداری منابع آب را تضعیف کرده و منجر به جابه‌جایی مراکز خشکسالی و گسترش پهنه‌های تحت تأثیر آن شده است (Huang et al., 2017).

گرمایش جهانی، همانطور که بالاتر گفته شد ساختار و ویژگی‌های خشکسالی را برهم زده است (IPCC, 2013). با شدت یافتن افزایش دما و در پی آن تشدید نیاز تبخیری جو (AED)، رخداد‌های خشکسالی در دهه‌های آینده با تغییرات زیادی همراه خواهند بود (Dai et al., 2018; Cook et al., 2020). این تغییرات برای کشورهای در حال توسعه و واقع در کمربند‌های خشک و نیمه‌خشک همانند ایران به‌شدت نگران‌کننده است (IPCC, 2007). ایران، با میانگین بارش کمتر از متوسط جهانی، تغییرات گسترده کاربری اراضی و برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیر زمینی در کانون این بحران قرار دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که قریب به ۹۶/۹ درصد پهنه سرزمینی ایران با پدیده خشکسالی درگیر است (Khalili et al., 2020). ابعاد این مخاطره به‌گونه‌ای است که تنها در یک بازه سه‌ساله (۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸)، خسارتی بالغ بر ۱۹ میلیارد دلار به بخش کشاورزی کشور تحمیل گردید (Modarres et al., 2016). تداوم مقادیر منفی در شاخص‌های پایش خشکسالی نظیر $SPEI$ طی دهه‌های اخیر، در کنار مداخلات مخرب انسانی چون سدسازی‌های بی‌رویه و استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، تاب‌آوری هیدرولوژیک کشور را به‌شدت تقلیل داده است.

تغییر اقلیم به‌واسطه تشدید چرخه هیدرولوژیک، ماهیت، فراوانی و شدت رخداد‌های فرین از جمله خشکسالی را تغییر داده است. با این حال، درک پدیده خشکسالی خطی و ساده نیست. بررسی ادبیات علمی در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام شده حول پیچیدگی‌های روش‌شناختی در تعریف خشکسالی، عدم قطعیت در مدل‌سازی‌ها و در نهایت ارزیابی ریسک‌های درهم‌تنیده اجتماعی و اقتصادی است. ویسنته سرانو و همکاران (Vicente-Serrano et al., 2020) نشان دادند که تفاوت در روش‌های آماری می‌تواند به هشدارهای کاذب درباره پیامدهای تغییر اقلیم منجر شود. یافته‌های آن‌ها نشان داد اگر مقیاس‌های زمانی و توابع توزیع به درستی در نظر گرفته شوند، روندهای خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک در قرن بیست و یکم همگرایی بیشتری نشان می‌دهند و نزدیک به ۳۰ درصد از خشکی‌های زمین با کمبود آب مواجه خواهند شد. ویسنته سرانو و همکاران (Vicente-Serrano et al., 2022) در تحقیقی دیگر بر نقش حیاتی افزایش نیاز تبخیری جو (AED^1) در چهار دهه گذشته تأکید کردند. آن‌ها نشان دادند در

¹ Atmospheric Evaporative Demand

حالی که روند خشکسالی‌های هواشناسی پیچیده است، افزایش شدت خشکسالی‌های کشاورزی و اکولوژیک مستقیماً از تشدید نیاز تبخیری جو نشأت می‌گیرد. در راستای پاسخ به چالش‌های محاسباتی مطرح شده برای محاسبه خشکسالی توسط ویسنته سرانو و همکاران (Vicente-Serrano et al., 2020)، سونگ و همکاران (Song et al., 2022) با ارزیابی عدم قطعیت‌های خروجی مدل‌های فاز ششم (CMIP6) در کره جنوبی، نشان دادند که در برآورد PET برای آینده، روش پنمن-مانتیت (Penman-Monteith) بالاترین قابلیت اطمینان و روش هارگریوز-سامانی (Hargreaves-Samani) بیشترین عدم قطعیت را به همراه دارد.

گروه دوم مطالعاتی که در پیشینه این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند، نقش گرمایش جهانی بر مشخصه‌های خشکسالی است. در همین راستا ناومان و همکاران (Naumann et al., 2018) با بررسی سطوح گرمایش ۱/۵، ۲ و ۳ درجه سلسیوسی دریافتند که تداوم گرمایش جهانی، طول دوره خشکسالی را با نرخ شتابانی افزایش می‌دهد؛ به طوری که از افزایش میانگین جهانی ۲ ماه به ازای هر درجه سلسیوس (زیر ۱/۵ درجه سلسیوس گرمایش) به ۴/۲ ماه به ازای هر درجه سلسیوس (در آستانه ۳ درجه سلسیوس گرمایش) می‌رسد. در همین راستا بالتینگ و همکاران (Balting et al., 2021) با تمرکز بر نیمکره شمالی نشان دادند که تحت بدبینانه‌ترین سناریوهای انتشار، نرخ رخداد خشکسالی تا ۱۰۰ درصد نسبت به سناریوهای کم‌انتشار افزایش خواهد یافت.

در سطح منطقه‌ای نیز خشکسالی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است در جنوب آسیا، ژای و همکاران (Zhai et al., 2020) با بهره‌گیری از سناریوهای ترکیبی SSP-RCP نشان دادند که شمال غرب این منطقه به شدت در برابر افزایش همزمان طول دوره، فراوانی و شدت خشکسالی آسیب‌پذیر است. همچنین آن‌ها نشان دادند که مدل‌های CMIP6 نسبت به نسل پیشین خود در شبیه‌سازی مشخصه‌های خشکسالی منطقه بهبود چشمگیری یافته‌اند. در حوضه آبریز سند، موندال و همکاران (Mondal et al., 2021) دریافتند که با افزایش میانگین دمای جهانی، نوسانات متغیرهای اقلیمی به شدت بالا می‌رود؛ به گونه‌ای که حوضه بالادست با رخدادهای ترسالی شدید (سیلاب) و حوضه پایین‌دست با رخدادهای خشکسالی مواجه خواهد شد. سونگ و همکاران (Song et al., 2021) با بررسی خشکالی در چین نشان دادند که رخدادهای خشکسالی در آینده از نظر زمانی کوتاه‌تر و از نظر گستره مکانی کوچک‌تر خواهند بود، اما شدت آن‌ها به مراتب بیشتر خواهد شد.

مطالعات زیادی به بررسی و پیش‌نگری خشکسالی در مناطق مختلف ایران پرداختند (Fakhar and Nazari, 2024; Bazrafshan et al., 2025). تمرکز عمده مطالعات انجام شده بر کاربرد مدل‌های گردش کلی و روش‌های مقیاس‌کاهی آماری استوار است. بطوریکه روح‌الله نژاد و همکاران (Roohollah Nejad et al., 2022) نشان دادند که افزایش دما موتور محرک تغییر اقلیم در مناطق ساحلی و جنوبی همچون هرمزگان است و طی دوره‌های آتی بر اساس شاخص SPI خشکسالی در طبقه نرمال تا ترسالی بسیار شدید خواهد بود. در پژوهشی دیگر کوهی و پاکدامن (Koochi & Pakdaman, 2022) رفتار احتمالاتی توأم شدت و مدت خشکسالی هواشناسی (SPEI) را در حوضه کارون مدل‌سازی کردند و نشان دادند تشدید بی‌سابقه‌ی خشکسالی‌های شدید در آینده نزدیک زنگ خطری جدی برای این مناطق به شمار می‌رود. افزایش خشکسالی‌ها در سایر مناطق کشور همچون حوضه دریاچه ارومیه نیز گزارش شده است بطوریکه زرین و همکاران (Zarrin et al., 2022) تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSPs) افزایش چشمگیر رخدادهای خشکسالی را در حوضه دریاچه ارومیه، به‌ویژه در آینده‌ی میانی (۲۰۵۱ تا ۲۰۷۵) و تحت سناریوی SSP5-8.5 گزارش کردند. پژوهش رضانی اعتدالی و کوهی (Ramezani Etedali & Koochi, 2024) نشان می‌دهد که بر اساس سناریوی SSP2-4.5، وضعیت اقلیمی استان‌های شمال‌غرب، غرب و جنوب‌غرب طی دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۶ به سمت خشکی بیشتر متمایل خواهد شد. افزون بر این، بررسی‌ها بیانگر آن است که در مقایسه با دوره تاریخی، جمعیت بیشتری در مناطق جنوبی، شرقی، غربی و مرکزی کشور درگیر پیامدهای ناشی از شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک خواهند شد.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که پژوهش‌های حوزه پیش‌نگری خشکسالی از فاز شناسایی مخاطره عبور کرده و وارد مرحله مدیریت ریسک و رفع عدم قطعیت‌های مدل‌سازی شده‌اند. با این حال تحقیقی که در کشور به پیش‌نگری دقیق ویژگی‌های خشکسالی تحت سناریوهای SSP پرداخته باشد، انجام نشده است و کماکان چشم انداز درستی از کشور در این زمینه وجود ندارد. همانطور که بررسی شد تغییر اقلیم و رخدادهای فرین، عدم قطعیت در برنامه‌ریزی‌های استراتژیک و مدیریت منابع آب ایران را به بالاترین سطح

ممکن رسانده است. از آنجا که برون داد یک مدل یا مدل کارآمد و تحلیل‌های صرفاً میانگین‌محور نمی‌تواند برای تحلیل ریسک مورد بررسی قرار گیرند، ارزیابی منطقه‌ای رخدادهایی با دینامیک بسیار پیچیده همانند خشکسالی نیازمند واکاوی‌های دقیق مبتنی بر روش‌ها و داده‌های روزآمد است. پژوهش حاضر با هدف پوشش دادن این شکاف تحقیقاتی، به دنبال پاسخگویی به این سؤال کلیدی است که تحت شرایط تغییر اقلیم، فراوانی و شدت خشکسالی در ایران چه تغییراتی را تجربه خواهد کرد؟. برای پاسخ به این پرسش، از ترکیب داده‌های مشاهداتی و خروجی‌های چندمدلی همادی تصحیح‌اریبی شده CMIP6 استفاده شد. هدف اصلی این مطالعه ارائه تصویری روشن، از تغییرات دو مشخصه کلیدی خشکسالی یعنی فراوانی و شدت آن در پهنه جغرافیایی ایران است. نتایج این مطالعه نقشه راهی برای سیاست‌گذاران جهت تدوین استراتژی‌های سازگاری، مدیریت ریسک و حفظ امنیت آبی و غذایی در برابر اثرات ویرانگر این پدیده فراهم می‌آورد.

داده و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش کشور ایران است که به دلیل استقرار در محدوده عرض‌های جنب‌حاره‌ای و همچنین تأثیرپذیری از گردان‌های شدید توپوگرافیک، از پیچیدگی و تنوع زمانی-مکانی بسیار بالایی برخوردار است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر (Köppen-Geiger)، بخش وسیعی از ایران دارای اقلیم گرم و خشک است. ماهیت نوسانی و ضریب تغییرات بالای بارش که از مشخصه‌های ذاتی اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود، ایران را در برابر دوره‌های طولانی و مخرب خشکسالی به شدت آسیب‌پذیر ساخته است. به منظور بازتاب دقیق این تنوع اقلیمی در ارزیابی خشکسالی، شبکه‌ای منتخب از ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی شامل ایستگاه‌های اهواز، اردبیل، گرگان، ایرانشهر، کرمانشاه، مشهد، رشت، تبریز و یزد شامل اقلیم‌های مختلف کشور از سواحل مرطوب دریای خزر گرفته تا مناطق کوهستانی، مناطق نیمه‌خشک و بیابان‌های مرکزی به عنوان نماینده‌های اقلیمی مشاهداتی در این پژوهش انتخاب شدند.

داده‌ها

به منظور مدل‌سازی دقیق و استخراج مشخصه‌های خشکسالی، از داده‌های مشاهداتی برای درستی سنجی دوره تاریخی استفاده شد. در بخش داده‌های مشاهداتی، از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید منتخب در دوره زمانی تاریخی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ استفاده شد. این داده‌ها شامل متغیرهای کلیدی از جمله بارش، دما است.

در بخش پیش‌نگری اقلیمی و با هدف پوشش حداکثری عدم قطعیت‌های موجود در شبیه‌سازی مدل‌های منفرد، از رویکرد چند مدلی همادی (Multi-model Ensemble) با استفاده از روش میانگین حسابی استفاده شد. در این راستا، خروجی‌های ده مدل از فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6) استخراج گردید. مدل‌های مورد استفاده و گونه‌های اجرایی آن‌ها شامل CanESM5 با گونه اجرای r1ilp1f1، مدل CNRM-CM6-1 با گونه r1ilp1f2، مدل CNRM-ESM2-1 با گونه r1ilp1f2، مدل EC-Earth3 با گونه r1ilp1f1، مدل GFDL-ESM4 با گونه r1ilp1f1، مدل IPSL-CM6A-LR با گونه r1ilp1f1، مدل MIROC6 با گونه r1ilp1f1، مدل MRI-ESM2-0 با گونه r1ilp1f1 و در نهایت مدل UKESM1-0-LL با گونه r1ilp1f2 می‌باشد. به منظور فراهم‌سازی امکان تولید چند مدلی همادی، خروجی تمامی مدل‌های یادشده پیش از ترکیب، به یک شبکه پایه با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی شبکه‌بندی مجدد (Regrid) شدند و سپس مدل همادی نهایی بر مبنای روش میانگین‌گیری حسابی تولید شد. شایان ذکر است که تمامی تحلیل‌های آتی پژوهش، اعم از محاسبه شاخص‌های خشکسالی و استخراج مشخصه‌های آن، بر روی نقاط همین شبکه ۰/۵ درجه قوسی (۶۲۱ نقطه شبکه در کشور) و در مقیاس پهنه کشور به انجام رسیده است.

پیش‌نگری‌های آینده برای سه افق زمانی شامل آینده نزدیک (۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱ تا ۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶ تا ۲۱۰۰) تحت سه سناریوی کلیدی از مسیرهای مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSPs) با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی انجام شد.

انتخاب این سناریوها بر مبنای منطق حاکم بر پروتکل‌های استاندارد ارزیابی اثرات اقلیمی صورت گرفته است. سناریوی SSP1-2.6 به عنوان یک سناریو خوش‌بینانه و منطبق بر سیاست‌های کنترل انتشار در نظر گرفته شد. سناریوی SSP3-7.0 (بدبینانه) نمایانگر شرایط فقدان سیاست‌های حمایتی اقلیمی است؛ این سناریو بر پایه مفروضات مفرط در خصوص تغییرات کاربری اراضی و انتشار ذرات معلق بنا شده که منجر به تغییر در مقیاس‌پذیری بارش نسبت به دمای میانگین جهانی می‌گردد (Shiogama et al., 2023). در نهایت، سناریوی SSP5-8.5 (خیلی بدبینانه) انتخاب شد. اگرچه انتقاداتی مبنی بر عدم تطابق این سناریو با شرایط توسعه معمول (Business as usual) به دلیل پیشرفت‌های اخیر در انرژی‌های تجدیدپذیر مطرح است، اما این سناریو به عنوان یک سناریوی بدترین حالت (Worst-case scenario) اهمیتی حیاتی دارد. سیگنال گرمایشی قدرتمند در SSP5-8.5 امکان آزمون مقیاس‌پذیری اثرات اقلیمی با دمای میانگین جهانی را فراهم می‌آورد و شرایطی را شبیه‌سازی می‌کند که حتی در سناریوهای با انتشار کمتر، دیر یا زود در صورت عدم توقف کامل انتشار کربن، به وقوع خواهد پیوست (Hausfather & Peters, 2020).

مواد و روش‌ها

تصحیح اریبی و مقیاس‌گامی آماری

با توجه به ماهیت ذاتی خروجی مدل‌های گردش کلی (GCMs) که نسبت به مشاهدات دارای اریبی (خطا) هستند، اعمال روش‌های تصحیح اریبی امری اجتناب‌ناپذیر است. در این تحقیق برای تصحیح اریبی مدل‌ها از الگوریتم مبتنی بر روش نگاشت چندک (Quantile Mapping) استفاده شد. بدین منظور، جهت ساخت و نگاشت توابع توزیع تجمعی (CDF)، برای متغیر بارش به دلیل ماهیت چوله بودن داده‌ها از تابع توزیع مرجع گاما (Gamma) و برای متغیر دما از تابع توزیع مرجع نرمال (Normal) استفاده شد. این روش روند را در تمام چندک‌های توزیع داده‌های روزانه حفظ می‌کند. جهت حفظ روند در دوره پیش‌نگری، ابتدا سناریوهای آینده از طریق اعمال سیگنال تغییر اقلیم (تفاوت یا نسبت بین توابع توزیع تجمعی دوره‌های تاریخی و آینده) بر داده‌های تاریخی تولید می‌شوند. برای متغیرهایی نظیر دما، روند به صورت افزایشی (Additive) و برای متغیرهایی نظیر بارش، روند به صورت ضربی (Multiplicative) حفظ می‌گردد (Thrasher et al., 2012).

محاسبه شاخص خشکسالی SPEI

جهت محاسبه خشکسالی در بستر گرمایش جهانی، از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) استفاده شد. محاسبه این شاخص با تعیین بیلان آبی ماهانه، یعنی تفاضل بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل ($D_i = P_i - PET_i$)، آغاز می‌شود (Vicente-Serrano et al., 2020). مقادیر محاسبه‌شده سپس با استفاده از توابع توزیع احتمالاتی متناسب با مقادیر فرین هیدروکلیماتولوژی (توزیع لاگ-لوجستیک) برآزش داده شده و در نهایت به یک توزیع نرمال استاندارد منتقل می‌گردند (Vicente-Serrano et al., 2022). شایان ذکر است که برآورد مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) به‌عنوان واداشت اصلی در برآورد نیاز آبی، بر مبنای الگوریتم جامع و فیزیکی فائو-پنمن-مونتیث (FAO Penman-Monteith) صورت پذیرفت. با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های ثبت‌شده برای ساعات آفتابی در مدل‌های CMIP6، این متغیر با استفاده از رویه‌های استاندارد ارائه‌شده در نشریه شماره ۵۶ فائو (Allen et al., 1998) برآورد شد. داده‌های تندی باد و رطوبت نسبی برای مدل‌های CMIP6 در دسترس است و از این داده‌ها برای محاسبه PET استفاده شد. متعاقباً، کلیه مراحل پردازش و استخراج شاخص در مقیاس زمانی مدنظر، از طریق فراخوانی توابع موجود در بسته نرم‌افزاری SPEI در محیط برنامه‌نویسی R پیاده‌سازی شد. از این‌رو، با توجه به استانداردهای تثبیت‌شده و شناخت جهانی از ساختار محاسباتی این بسته، از بسط مجدد روابط ریاضی و تشریح جزئیات پایه صرف‌نظر شده است.

در این پژوهش، اگرچه امکان بررسی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت و میان‌مدت (نظیر ۳ و ۶ ماهه) وجود داشت، اما تمرکز اصلی بر محاسبه و تحلیل شاخص SPEI در مقیاس زمانی ۱۲-ماهه (SPEI-12) قرار گرفت. دلیل این انتخاب به ماهیت متفاوت اثرگذاری کمبود بارش و تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) در مقیاس‌های مختلف برمی‌گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که

مقیاس‌های میان‌مدت مانند ۶ ماهه (SPEI-6)، بیشترین همبستگی را با تغییرات رطوبت خاک داشته و اساساً برای پیش‌خشکسالی کشاورزی و نوسانات فصلی مناسب‌اند (Su et al., 2021). در مقابل، مقیاس ۱۲ ماهه قادر است تأثیرات تجمعی کمبود بارش و تشدید تقاضای تبخیری جو را به طور یکپارچه در سیستم‌های هیدرولوژیک نمایان سازد. از آنجا که هدف اصلی این پژوهش کشف خشکسالی‌های هیدرولوژیک است که مستقیماً بر جریان‌های رودخانه‌ها، افت تراز آب‌های زیرزمینی و حجم ذخایر سدها اثر می‌گذارد، استفاده از مقیاس SPEI-12 امری حیاتی است. با توجه به شرایط اقلیمی نیمه‌خشک ایران و وابستگی شدید زیرساخت‌های تأمین آب (شرب و کشاورزی) به منابع ذخیره‌شده سالانه، SPEI-12 انطباق کاملی با چرخه‌های واقعی مدیریت منابع آب داشته و در مقایسه با مقیاس‌های کوتاه‌تر همانند ۶ ماهه، ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از تنش‌های اقلیمی و منابع آب بلندمدت ارائه می‌دهد (Vicente-Serrano et al., 2020).

کارایی آماری خروجی‌های چند مدلی همادی (CMIP6-MME) در باز تولید شاخص خشکسالی SPEI در پهنه‌های اقلیمی نماینده ایران

به منظور ارزیابی کارایی خروجی‌های چند مدلی همادی (CMIP6-MME) در باز تولید شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده دوازده‌ماهه (SPEI-12)، داده‌های شبیه‌سازی‌شده در برابر مقادیر مشاهداتی نه ایستگاه همدید با تنوع اقلیمی متمایز در پهنه ایران طی دوره پایه ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفت. درستی سنجی با تکیه بر یک رویکرد چندگانه آماری متشکل از سنجه اریبی، شاخص توافق ویلموت (d)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب همبستگی اسپیرمن انجام پذیرفت. اریبی ($Bias$) که مقدار انحراف داده‌های شبیه‌سازی‌شده (S_i) از مقادیر مشاهداتی (O_i) را می‌سنجد، بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Hill et al., 2006).

$$me = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad (1)$$

شاخص توافق (d) به عنوان یک سنجه استاندارد بدون بُعد برای تعیین درجه خطای پیش‌بینی مدل توسعه یافت که دامنه نوسان آن از صفر (فقدان تطابق کامل) تا یک (تطابق بی‌نقص) متغیر است (Willmott, 1981). این شاخص از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (2)$$

سنجه d با وجود توانمندی بالا در تشخیص تفاوت‌های افزایشی و نسبی در میانگین‌ها و واریانس‌ها، به دلیل بهره‌گیری از توان دوم تفاضل‌ها، حساسیت قابل توجهی نسبت به مقادیر فرین نشان می‌دهد (Legates & McCabe, 1999). در نهایت، ضریب NSE به عنوان یک آماره نرمال شده که بزرگی نسبی واریانس باقیمانده‌ها (نویز) را در قیاس با واریانس داده‌های اندازه‌گیری‌شده (اطلاعات) تعیین می‌کند (Nash & Sutcliffe, 1970)، جهت بررسی مقدار انطباق داده‌ها محاسبه شد. این ضریب از طریق رابطه (۳) محاسبه شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

که در آن، مقادیر یک نشان‌دهنده بالاترین دقت مدل بوده و مقادیر کمتر از صفر گویای آن است که میانگین داده‌های مشاهداتی، پیش‌بینی‌کننده به مراتب بهتری نسبت به خروجی‌های مدل است. علاوه بر سه سنجه بالا، به منظور ارزیابی توانایی مدل در بازتولید توزیع آماری و همبستگی رتبه‌ای چرخه‌های اقلیمی مستقل از خطای عدم تطابق فازی (Phase mismatch) در زمان‌بندی رخدادها، از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (r_s) استفاده شد.

تحلیل مشخصه‌های فراوانی و شدت خشکسالی

پس از تولید سری‌های زمانی شاخص SPEI-12، به منظور تفکیک، شناسایی و ارزیابی کمی مشخصه‌های خشکسالی، تئوری ران (Run Theory) (Yevjevich, 1967) بر روی تمامی نقاط شبکه ۰/۵ درجه قوسی مدل همادی تولیدشده محاسبه شد. در این تئوری، هرگاه مقدار شاخص در یک مقطع زمانی از یک خط آستانه بحرانی تعریفی (K) افت نماید، فاز آغازین یک خشکسالی ثبت می‌شود.

در این تحقیق آستانه آغاز خشکسالی ۱- در نظر گرفته شده است که دو ماه متوالی ادامه داشته باشد (Vicente-Serrano et al., 2020). بر این اساس، دو مشخصه اصلی به شرح زیر استخراج و ارزیابی شدند.

فراوانی خشکسالی (Drought Frequency)

فراوانی به عنوان شاخصی کلیدی جهت ارزیابی تواتر زمانی تنش‌های اقلیمی تعریف می‌شود. این مؤلفه، نسبت ماه‌های درگیر با پدیده خشکسالی (مقادیر SPEI کوچکتر از خط آستانه) به طول کل دوره مورد ارزیابی در هر افق زمانی را نشان می‌دهد.

$$F = \frac{m}{N} \quad (4)$$

که در این رابطه، m نشان‌دهنده تعداد ماه‌های رخداد خشکسالی و N نمایانگر کل ماه‌های موجود در دوره شبیه‌سازی شده (یا مشاهداتی) است.

شدت خشکسالی (Drought Intensity)

شدت خشکسالی بیانگر مجموع انحرافات مقادیر شاخص از سطح نرمال در طول دوره تداوم یک رخداد خشکسالی است. این کمیت از طریق جمع کسری‌های آبی در طول رخداد خشکسالی به دست می‌آید.

$$I = \frac{\sum_{n=1}^T |SPEI_n - K|}{T} \quad (5)$$

در این رابطه، I نمایانگر بزرگی و شدت رخداد خشکسالی، K خط آستانه تعریفی (در این تحقیق -۱)، $SPEI_n$ مقدار شاخص در ماه n ، و T تداوم زمانی رخداد خشکسالی است. در نهایت، با تلفیق این شاخص‌ها برای تمامی نقطه شبکه‌ها، رفتار خشکسالی‌ها تحت سناریوهای مختلف تا پایان قرن بیست و یکم پیش‌نگری و تحلیل شد.

نتایج و بحث

کارایی CMIP6-MME در شبیه‌سازی شاخص SPEI-12

کارایی CMIP6-MME در بازتولید شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI-12) از CMIP6-MME، در برابر نه ایستگاه همدید در ایران طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱). کارایی CMIP6-MME با تکیه بر سنج‌های آماری شامل ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، اریبی ($Bias$)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب همبستگی اسپیرمن انجام شد. بررسی مقادیر ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) حاکی از ثبت مقادیر منفی در ایستگاه‌های نماینده است. با توجه به اینکه شاخص SPEI-12 به طور ذاتی دارای میانگین صفر و واریانس یک در دوره مشاهداتی است، عدم تطابق فاز زمانی (Phase mismatch) در شبیه‌سازی مدل‌های گردش کلی (GCMs) منجر به افزایش چشمگیر مجموع مربعات خطا (صورت کسر در رابطه NSE) می‌شود. در چنین شرایطی، مقادیر منفی NSE لزوماً به معنای ضعف مدل در بازتولید واریانس یا دامنه نوسانات نیست، بلکه عمدتاً ناشی از ناتوانی ذاتی GCMها در همگام‌سازی دقیق فاز زمانی تغییرپذیری‌های داخلی اقلیم در مقیاس‌های ماهانه و بین‌سالانه با مشاهدات واقعی است.

به منظور تفکیک خطای فازی از ضعف در شبیه‌سازی توزیع آماری و ارزیابی دقیق‌تر کارایی مدل مستقل از زمان‌بندی دقیق رخدادها، از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (r_s) استفاده شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که علی‌رغم مقادیر منفی NSE ، ضریب اسپیرمن در تمامی ایستگاه‌ها مثبت بوده و نشان‌دهنده توانایی مدل در حفظ توزیع آماری و همبستگی رتبه‌ای داده‌ها است. بررسی این سنج نشان می‌دهد که CMIP6-MME در بازتولید رفتار آماری مناطق واقع در عرض‌های بالاتر و اقلیم‌های نیمه‌خشک و کوهستانی نظیر مشهد ($r_s = 0.59$)، تبریز ($r_s = 0.57$) و اردبیل ($r_s = 0.56$) کارایی به مراتب بهتری نسبت به مناطق خشک و بیابانی مرکزی و جنوبی مانند اهواز ($r_s = 0.44$) و یزد ($r_s = 0.48$) داشته است. این یافته‌ها به صورت کمی تایید می‌کنند که با وجود خطای فازی اجتناب‌ناپذیر در خروجی GCMها، مدل همادی توانسته است واریانس و رفتار توزیعی چرخه‌های خشک و مرطوب را با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی نماید.

تحلیل اریبی سیستماتیک مدل‌ها، نمایانگر ناهمگنی مکانی در برآورد شدت خشکسالی است. بررسی نشان داد در ایستگاه‌های یزد، مشهد، اردبیل، تبریز، رشت و اهواز اریبی به‌ترتیب از ۰/۶۲- تا ۰/۱۰- در تغییر است که نشان دهنده اریبی سیستماتیک برون‌داد همدادی به کم‌برآوردی مقادیر 12 - SPEI و در نتیجه، تشدید شرایط خشکسالی دلالت دارد (جدول ۱). در نقطه مقابل، اریبی مثبت در ایستگاه‌های ایرانشهر، کرمانشاه و گرگان حاکی از بیش‌برآورد شاخص و گرایش به شرایط مرطوب‌تر در شبیه‌سازی‌ها است. عدم تقارن در اریبی، ریشه در عدم قطعیت‌های فیزیکی GCMها در پارامترسازی بارش و بازتولید دماهای بیشینه و کمینه سطحی در مناطق دارای توپوگرافی پیچیده دارد که به‌طور ساختاری بر محاسبات تبخیر-تعرق پتانسیل و در نهایت بر شاخص SPEI اثرگذار است. شاخص توافق ویلموت حساسیت کمتری به نوسانات فرین دارد و توزیع کلی داده‌ها را می‌سنجد، مقادیر در بازه ۰/۵۱ تا ۰/۶۶ محاسبه شده است. بیشترین مقدار توافق در ایستگاه‌های تبریز، اردبیل و مشهد دیده شده است که هم‌گرایی علمی و منطقی با نتایج ضریب نش-ساتکلیف در این مناطق دارد. در مقابل، کمترین مقدار تطابق در اقلیم کویری یزد و مقادیر متوسط در ایستگاه‌های ایرانشهر، اهواز، گرگان، رشت و کرمانشاه مشاهده شد. بطور کلی مقادیر ضریب توافق در ایستگاه‌های نماینده منتخب نشان می‌دهد که برون‌داد CMIP6-MME، به‌رغم اریبی مقطعی فازهای خشکسالی و ترسالی، توانایی قابل‌توجهی در بازتولید توزیع آماری، دامنه نوسانات و رفتار اقلیم‌شناسی شاخص 12 - SPEI در ایران دارد (جدول ۱).

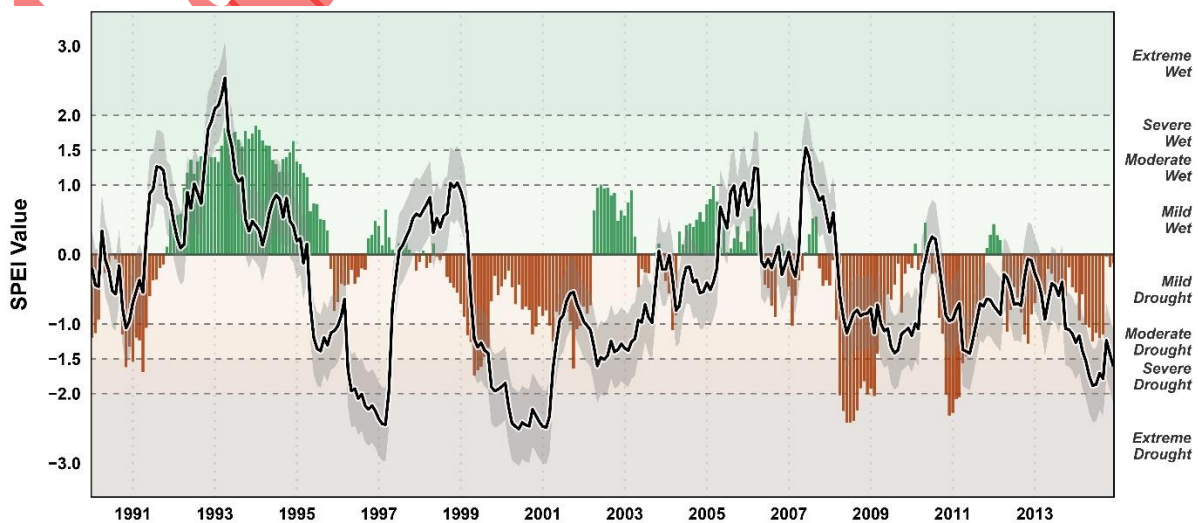
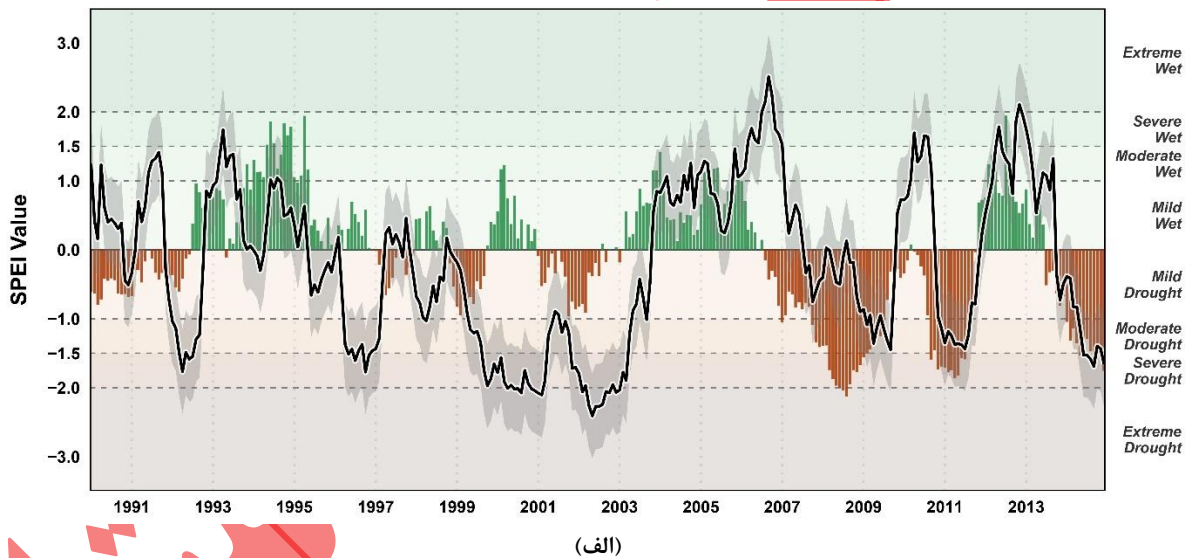
جدول ۱. ارزیابی کارایی CMIP6-MME در بازتولید شاخص خشکسالی SPEI-12 طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴)

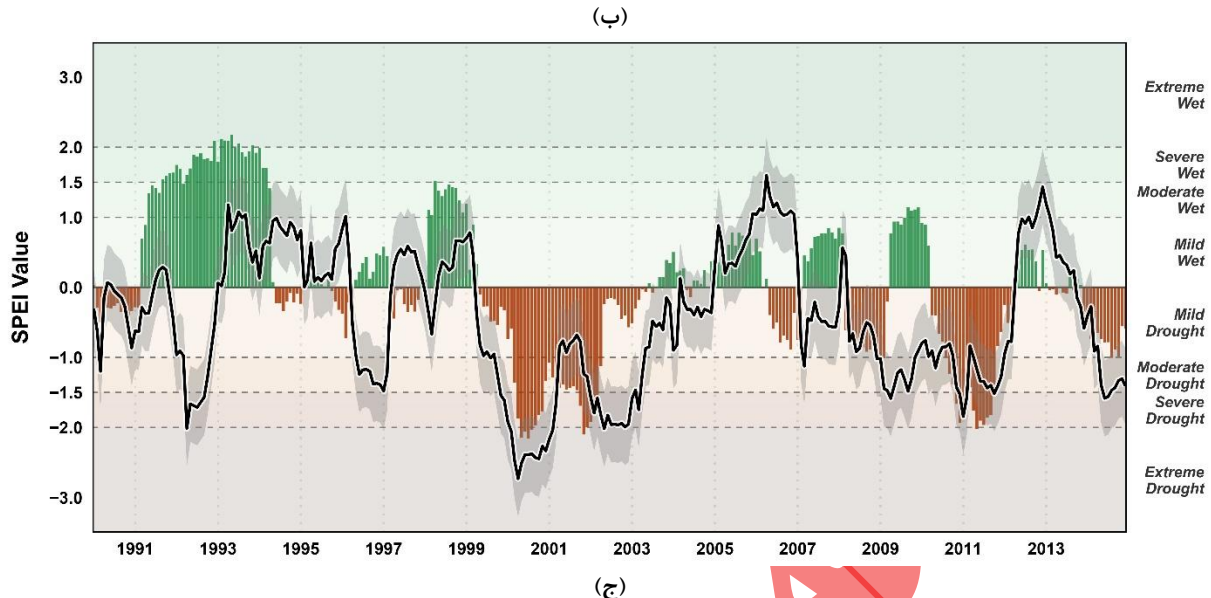
Table 1. Evaluating the Performance of the CMIP6-MME in Reproducing the SPEI-12 Drought Index Over the Historical Period (1990–2014)

Station ایستگاه	NSE ضریب کارایی نش- ساتکلیف	Bias اریبی	r_s ضریب همبستگی اسپیرمن	d شاخص توافق ویلموت
اهواز Ahvaz	-0.84	-0.1	0.44	0.56
اردبیل Ardabil	-0.34	-0.32	0.56	0.64
گرگان Gorgan	-0.91	0.11	0.43	0.56
ایرانشهر Iranshahr	-0.75	0.39	0.45	0.54
کرمانشاه Kermanshah	-0.67	0.29	0.54	0.6
مشهد Mashhad	-0.33	-0.47	0.59	0.64
رشت Rasht	-0.51	-0.16	0.52	0.56
تبریز Tabriz	-0.30	-0.26	0.57	0.66
یزد Yazd	-0.97	-0.62	0.48	0.51

به منظور ارزیابی کیفی کارایی CMIP6-MME در شبیه‌سازی تغییرپذیری زمانی خشکسالی، سری زمانی شاخص SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه برای دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) در سه منطقه اقلیمی نماینده ایران مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱). با توجه به ماهیت ذاتی عدم قطعیت در برون‌داد مدل‌های اقلیمی، نتایج شبیه‌سازی همدادی به همراه باند عدم قطعیت آن (نوار سایه‌دار در شکل ۱) ارائه شده است تا دامنه خطای شبیه‌سازی مدل به شکلی جامع‌تر بررسی شود. نتایج نشان می‌دهد که در اقلیم‌های نیمه‌خشک (مشهد،

شکل ۱-ج) و سرد کوهستانی (تبریز، شکل ۱-ب)، مدل CMIP6-MME با در نظر گرفتن کران‌های عدم قطعیت خود، توانایی خوبی در بازتولید نوسانات چندساله و رخداد‌های خشکسالی/ترسالی از خود نشان داده است. به طور مشخص، مدل همادی موفق به شبیه‌سازی الگوی کلی دوره ترسالی پایدار اوایل دهه ۱۹۹۰ و به دنبال آن، رخداد خشکسالی شدید و گسترده در بازه زمانی تقریبی ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ شد. این هم‌راستایی در ثبت نوسانات با فراوانی پایین، توجیه‌کننده مقادیر نسبتاً مناسب شاخص توافق ویلموت (d) برای ایستگاه‌های مشهد و تبریز است. در مقابل، ارزیابی‌ها نشان‌دهنده یک ناهمگنی مکانی در کارایی CMIP6-MME در سطح مناطق مختلف است؛ به گونه‌ای که توانمندی مدل در بازتولید دوره‌های خشکسالی/ترسالی در منطقه خزری به نمایندگی از ایستگاه گرگان (شکل ۱-الف)، برخلاف مناطقی با اقلیم متفاوت نظیر تبریز، با چالش‌هایی مواجه است. در ایستگاه گرگان، برونداد مدل نوساناتی با دامنه بسیار بزرگتر و فراوانی بالاتر از داده‌های مشاهداتی تولید می‌کند (به عنوان مثال، شبیه‌سازی دوره‌های بسیار شدید ترسالی و خشکسالی در میانه دهه ۲۰۰۰). دلیل اصلی این تفاوت آشکار در دقت مدل بین مناطق مختلف، ریشه در تفاوت‌های رژیم‌های اقلیمی و پیچیدگی‌های فیزیوگرافیک و توپوگرافیک آن‌ها دارد. دلیل اصلی افت کارایی مدل و کاهش مقدار ضریب NSE در ایستگاه گرگان، تفکیک افقی GCMهاست. این تفکیک پایین سبب می‌شود تا مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای فیزیکی خردمقیاس و پیچیده‌ای نظیر برهمکنش‌های دریا-خشکی (دریای خزر) و اثرات کوهساری شدید ناشی از رشته‌کوه البرز نباشند؛ عواملی که کنترل‌کننده‌های اصلی و محلی اقلیم در منطقه خزری محسوب می‌شوند.





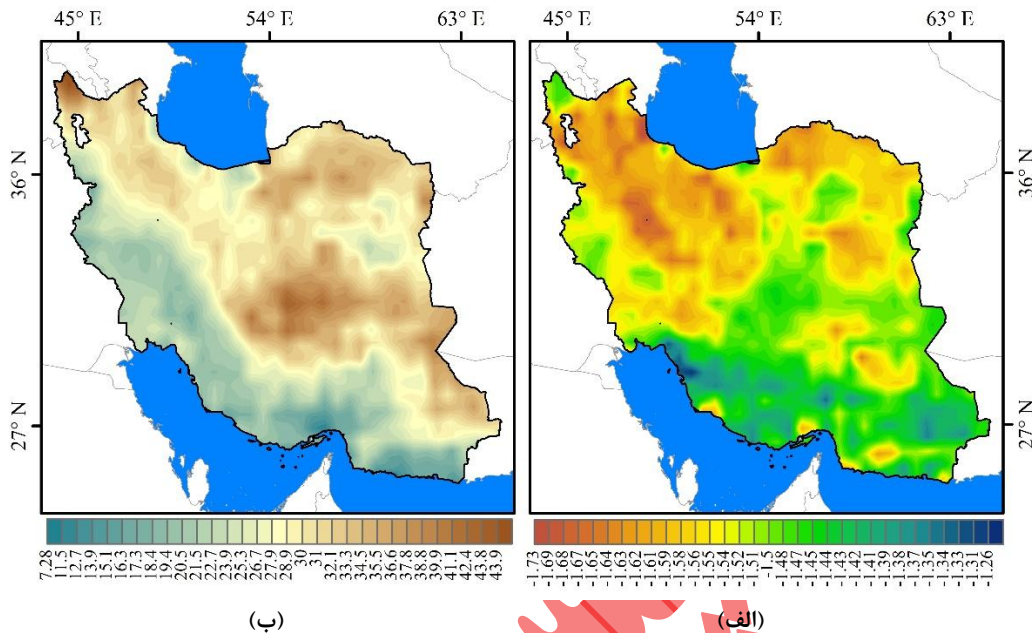
شکل ۱. ارزیابی چندمدلی همادی CMIP6 در بازتولید تغییرپذیری زمانی خشکسالی طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴). سری زمانی شاخص SPEI-12 مشاهداتی (نمودار میله‌ای) و برون‌داد شبیه‌سازی شده همادی مدل‌ها (خط ممتد) همراه با باند عدم قطعیت آن (نوار سایه‌دار) نشان داده شده است. الف) گرگان (خزری)، ب) تبریز (سرد کوهستانی) و ج) مشهد (نیمه‌خشک)

Fig 1. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble (MME) in replicating temporal drought variability over the historical (1990–2014). The time series of the observational SPEI-12 index (bar chart) and the simulated multi-model ensemble output (solid line), along with its uncertainty band (shaded area), are presented. The panels capture three distinct climate regions: a) Gorgan (Caspian), b) Tabriz (cold mountainous), and c) Mashhad (semi-arid).

تحلیل فراوانی و شدت خشکسالی در پهنه ایران بر مبنای برون‌داد همادی CMIP6

تحلیل برون‌داد CMIP6-MME برای دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) ناهمگنی مکانی مشخصی را در دینامیک رخداد‌های خشکسالی ایران آشکار می‌سازد. بررسی فراوانی خشکسالی، بیانگر یک گرادیان عرضی و توپوگرافیک مشخص است؛ به طوری که هسته‌های بیشینه فراوانی، با مقادیر بین ۳۰ تا ۴۳/۹ درصد، به طور عمده بر فلات مرکزی (شامل دشت کویر و بیابان لوت)، نوار شرقی و بخش‌هایی از حوضه دریاچه ارومیه در شمال غرب کشور متمرکز شده‌اند (شکل ۲-ب). در تقابل با الگوی حاکم بر نواحی مرکزی، کمینه فراوانی رخداد خشکسالی با مقادیر بین ۷/۲ تا ۱۸ درصد در امتداد مناطق شمال غربی-جنوب شرقی رشته‌کوه زاگرس و نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان متمرکز شده است. واکاوی شدت خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI-12 ابعاد پیچیده‌تری از پاسخ هیدرواقليمی ایران را نشان می‌دهد. تحلیل‌ها حاکی از آن است که پهنه‌های کوهستانی عرض‌های بالاتر، شامل شمال غرب کشور، امتداد رشته‌کوه البرز، دامنه‌های شمالی زاگرس و بخش‌هایی از شمال شرق، مقادیر شاخص SPEI بین ۱/۵ تا ۱/۷۳- را تجربه می‌کنند که به طور مطلق در طبقه خشکسالی شدید قرار می‌گیرند (شکل ۲-الف). محرک اصلی این شدت، نقش فزاینده تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) به عنوان تابعی از بی‌هنجاری‌های گرمایی است. این مناطق که دارای رژیم‌های دمایی خنک‌تر و بیلان بارش مثبت‌تری بوده‌اند، در دهه‌های اخیر تحت تاثیر سیگنال‌های گرمایش جهانی، با افزایش بی‌سابقه دما مواجه شده‌اند. این تقاضای تبخیری مضاعف جوی، منجر به افت شدید بیلان آب شده و شدت خشکسالی را به آستانه‌های بحرانی سوق داده است. در مقابل، در نیمه جنوبی، سواحل خلیج فارس، مکران و پهنه‌های وسیعی از مرکز و شرق کشور، مقادیر شاخص SPEI نوساناتی بین ۱/۲۶- تا ۱/۴۸- را نشان می‌دهند که معادل طبقه خشکسالی متوسط ارزیابی می‌شود (شکل ۲-الف). این رفتار آماری ریشه در ذات اقلیم خشک و نیمه‌خشک این نواحی دارد؛ بطوریکه که واریانس و میانگین تاریخی بارش به طور طبیعی در پایین‌ترین سطح قرار دارد و در نتیجه، شاخص SPEI

افت بارش را به عنوان بی‌هنجاری‌های فرین محاسبه نمی‌کند. افزون بر این، در نوار ساحلی جنوب، تزریق رطوبت از پهنه‌های آبی و حفظ نسبی فشار بخار آب جوی، به عنوان یک عامل تعدیل‌کننده ترمودینامیکی عمل کرده و از افزایش تصاعدی تبخیر-تعرق پتانسیل و متعاقباً تشدید خشکسالی‌ها جلوگیری می‌نماید.



شکل ۲. توزیع مکانی مشخصه‌های خشکسالی شدت (الف) و فراوانی (ب) بر مبنای شاخص SPEI-12 در پهنه ایران با استفاده از برون داد چندمدلی همادی CMIP6 طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴)

Fig 2. Spatial distribution of drought characteristics (frequency (a) and intensity (b) based on the SPEI-12 across Iran, derived from CMIP6 multi-model ensemble outputs for the historical period (1990–2014).

پیش‌نگری شدت و فراوانی خشکسالی‌های ایران مبتنی بر شاخص SPEI

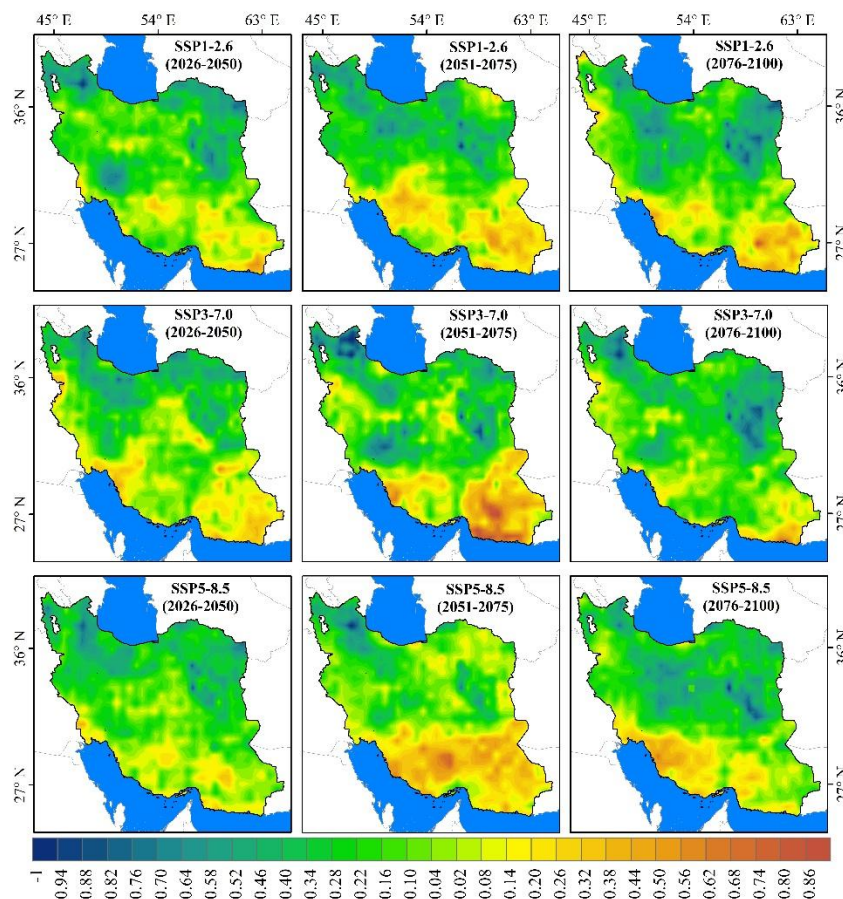
تحلیل خروجی‌های چندمدلی همادی (CMIP6-MME) در سه افق زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۸۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶). تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5، نشان‌دهنده تغییرات اساسی در توزیع مکانی شدت خشکسالی در پهنه ایران است. در عرض‌های جغرافیایی بالاتر، شامل پهنه شمال غرب (حوضه ارومیه)، امتداد رشته‌کوه‌های البرز و دامنه‌های زاگرس، نتایج حاکی از کاهش معنادار شدت خشکسالی است (شکل ۳). در دوره تاریخی، این مناطق با شدت خشکسالی در دامنه ۱/۵۱- تا ۱/۷۳- در طبقه خشکسالی شدید قرار داشتند (شکل ۲-الف). با این وجود، پیش‌نگری‌ها، به‌ویژه تحت سناریوهای بدبینانه (SSP3-7.0 و SSP5-8.5) و در افق‌های آینده میانی و دور، بی‌هنجاری‌های منفی را در این پهنه‌ها نشان می‌دهند. این تغییر فاز، نمایانگر گذار این مناطق از شرایط بحرانی و قرارگیری در طبقه خشکسالی خفیف است. از منظر فیزیکی، این بهبود رطوبتی ریشه در پاسخ ترمودینامیکی جو دارد؛ بر اساس رابطه کلایوس-کلاپیرون، به ازای هر یک درجه سلسیوس افزایش دما، ظرفیت نگهداری رطوبت جو حدود ۷ درصد افزایش می‌یابد. بر این اساس در این عرض‌ها، محتوای آب قابل بارش افزایش یافته و تسریع چرخه هیدرولوژیک موجب می‌شود تا بارش‌های فرین بر اثرات فزاینده تبخیر-تعرق پتانسیل غلبه نمایند. در تقابل آشکار با شرایط حاکم بر عرض‌های شمالی، عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر کشور با تشدید فزاینده و بحرانی خشکسالی مواجه خواهند شد. مدل در این پهنه‌ها، به‌ویژه در سناریوی SSP5-8.5 برای اواخر قرن بیست و یکم، بی‌هنجاری‌های مثبت شدیدی را تا ۰/۸۶ شبیه سازی کرده است که منجر به استقرار و تداوم شرایط خشکسالی بسیار شدید (SPEI ≤ -2) می‌شود. بررسی مناطق گذار و دشت‌های مرکزی ایران، از جمله دشت کویر و بخش‌هایی از بیابان لوت، حاکی از نوسانات بسیار محدود با بی‌هنجاری‌هایی در دامنه ۰/۲- تا ۰/۲+ است (شکل ۳). به دلیل ماهیت فوق‌خشک و بیابانی این پهنه‌ها، تغییرات مطلق بارش و تبخیر در مقایسه با میانگین‌های تاریخی،

قادر به ایجاد انحراف معیارهای بزرگ در فرمول استانداردسازی شده شاخص SPEI نیستند. در نتیجه، این مناطق که در گذشته اقلیمی خود در طبقه خشکسالی متوسط قرار داشتند، در تمامی سناریوهای انتشار و در هر سه افق زمانی پیش‌رو، بدون تغییر طبقه، با نوساناتی ناچیز در همان دامنه خشکسالی متوسط (بازه ۱- تا ۱/۴۹-) باقی خواهند ماند.

خروجی‌های CMIP6-MME، ناهمگنی زیادی از تغییرات مشخصه فراوانی خشکسالی را در پهنه اقلیمی ایران نسبت به دوره تاریخی را نشان می‌دهد. تحلیل تطبیقی این بی‌هنجاری و تطبیق آن با مشخصه شدت خشکسالی، نشان‌دهنده پاسخ‌های غیرخطی سامانه اقلیمی به سطوح مختلف واداشت تابشی در سه افق زمانی آینده است. تحت سناریوی توسعه پایدار (SSP1-2.6)، فراوانی خشکسالی در آینده نزدیک و آینده میانی بالاترین سطح پایداری و کمترین بی‌هنجاری از شرایط تاریخی را نشان می‌دهد. در این دو بازه زمانی، بخش اعظم فلات مرکزی، نوار ساحلی جنوب و مناطق شرقی کشور نوسانات محدودی در بازه صفر تا ۵ درصد را تجربه می‌کنند. با در نظر گرفتن میانگین تاریخی فراوانی رخداد‌های خشکسالی در این پهنه‌ها که در محدوده ۲۵ تا ۳۰ درصد بوده است، این افزایش، پیکربندی اقلیمی منطقه را در همان طبقه فراوانی متوسط رو به بالا تثبیت می‌نماید. با این وجود، در آینده دور تحت همین سناریو، یک سیگنال معنادار از جابجایی اقلیمی را نشان می‌دهد. در اواخر قرن، گستره‌ای از شمال غرب کشور و حوضه دریاچه ارومیه تا امتداد رشته‌کوه زاگرس و جنوب غرب، بی‌هنجاری مثبتی بین ۱۰ تا ۱۷/۵ درصدی را نشان می‌دهد. با احتساب فراوانی خشکسالی ۲۰ درصدی در دوره تاریخی در این اکوسیستم‌های کوهستانی، رخداد خشکسالی در اواخر قرن به حدود ۳۰ تا ۳۷ درصد می‌رسد (شکل ۴).

سناریوهای انتشار با واداشت تابشی بالاتر (SSP3-7.0 و SSP5-8.5)، مقادیر زیادی از بی‌هنجاری‌های مثبت را در افق زمانی آینده میانی نمایان می‌سازد که به عنوان یک نقطه بحرانی در بیلان هیدرولوژیک کشور قابل تفسیر است. در این دوره زمانی، بخش‌های وسیعی از زاگرس مرکزی و جنوبی شامل استان‌های فارس، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و اصفهان با بی‌هنجاری‌های شدیدی در دامنه ۱۷ تا ۲۳/۵ درصدی مواجه می‌شوند. بررسی تطبیقی حاکی از آن است که مناطق مذکور طی دوره تاریخی فراوانی خشکسالی ۱۸ تا ۲۲ درصدی را تجربه می‌کردند که در اواسط قرن بیست و یکم به فراوانی ۴۰ تا ۴۴ درصدی خواهند رسید (شکل ۴).

در چشم‌انداز اقلیمی پیش‌رو، رژیم خشکسالی در پهنه ایران تحت واداشت‌های فزاینده گرمایی و تسلط اجتناب‌ناپذیر تقاضای تبخیری جو (AED)، دستخوش یک تغییر ساختاری و عدم تقارن مکانی خواهد شد. بروندادهای این پژوهش، شکل‌گیری یک ساختار دوقطبی متمایز را در آینده اقلیمی کشور اثبات می‌نماید؛ به نحوی که عرض‌های بالاتر (شمال غرب و نوار کوهستانی) به سمت فراوانی خشکسالی‌های خفیف میل خواهند کرد (شکل ۳)، در حالی که نیمه جنوبی و عرض‌های پایین‌تر، کانون تمرکز و تشدید فزاینده خشکسالی‌های فرین و بحرانی به‌ویژه تحت سناریوهای بدبینانه خواهند بود (شکل ۴). درک این جابه‌جایی مکانی هسته خشکسالی و پاسخ‌های غیرخطی سامانه اقلیمی، لزوم یک تغییر بنیادین در سیاست‌گذاری‌های کلان منابع آب را ایجاب می‌کند. در واقع، این یافته‌ها به مدیران و برنامه‌ریزان اثبات می‌کند که استمرار رویکردهای یکپارچه و همگن در مدیریت منابع آب فاقد کارایی است و گذار به سمت سامانه‌های مدیریت ریسک مکان‌محور یک ضرورت قطعی است. بر مبنای این نقشه راه علمی، متولیان امر مستلزم اتخاذ استراتژی‌های دوگانه هستند. در نوار شمالی، برنامه‌ریزی‌ها باید بر سازگاری با تنش‌های آبی پیوسته اما با شدت تقلیل‌یافته متمرکز گردد؛ متقابلاً در پهنه‌های جنوبی، اولویت قطعی سرمایه‌گذاری‌ها باید بر ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌ها در برابر رخداد‌های فرین و خشکسالی‌های ویرانگر استوار باشد. در نهایت، کاربست عملیاتی این نتایج، بازطراحی الگوی تخصیص آب و توسعه سامانه‌های هشدار زودهنگام را با محوریت پیش پیوسته تبخیر-تعرق پتانسیل به عنوان پیش‌ران اصلی خشکسالی‌های آینده ایران، به ابزاری الزامی برای تاب‌آوری ملی تبدیل می‌سازد.



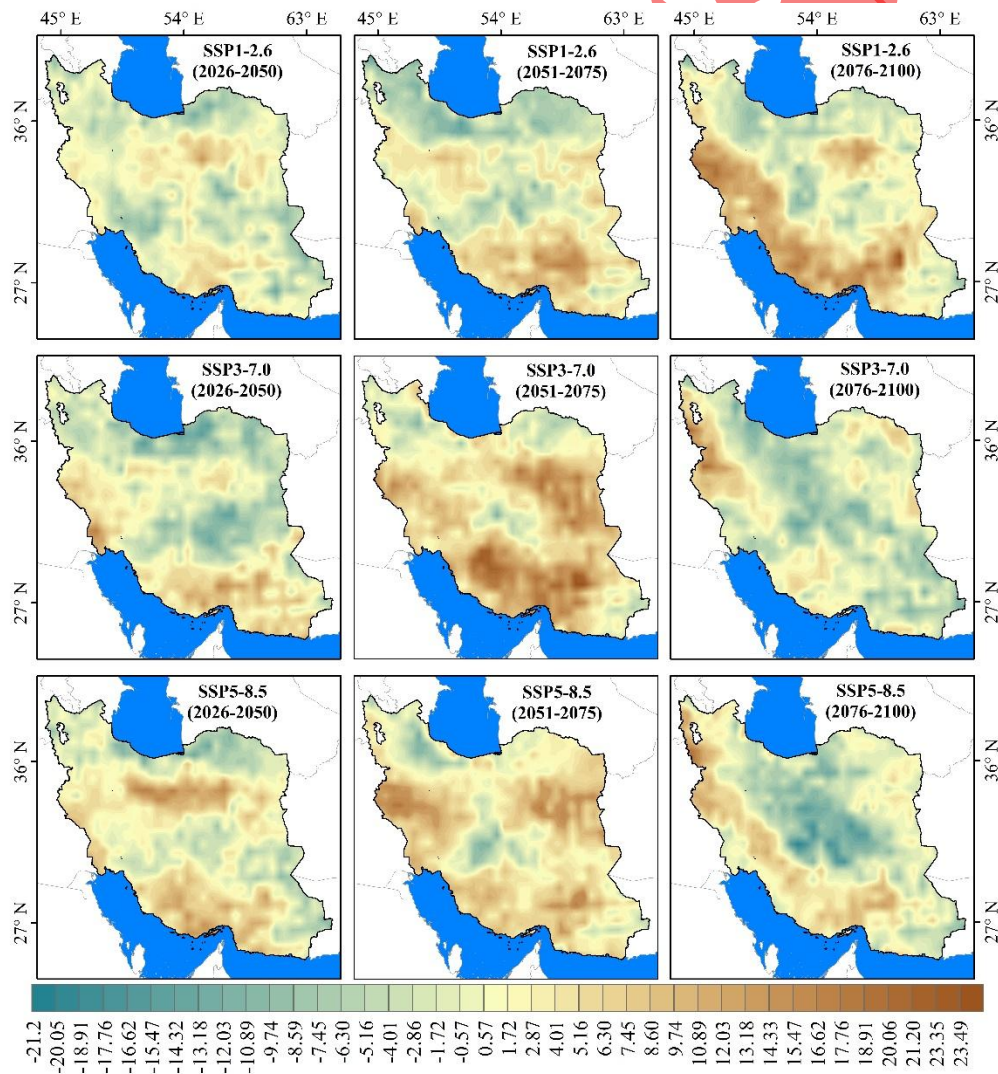
شکل ۳. پراکنش مکانی بی‌هنجاری‌های شدت خشکسالی در ایران برای افق‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰). نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴). مبتنی بر برونداد CMIP6-MME تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی SSP1-2.6 (خوش بینانه)، SSP3-7.0 (بدبینانه) و SSP5-8.5 (خیلی بدبینانه).

Fig 3. Spatiotemporal distribution of anomalies in drought intensity across Iran for the near-future (2026–2050), mid-future (2051–2075), and far-future (2076–2100) periods relative to the historical (1990–2014). The analysis is derived from the CMIP6 multi-model ensemble (CMIP6-MME) under the shared socioeconomic pathways SSP1-2.6, SSP3-7.0, and SSP5-8.5.

پیچیده‌ترین الگوی اقلیمی در دوره آینده دور و تحت سناریوی بسیار بدبینانه (SSP5-8.5) دیده می‌شود. توزیع مکانی فراوانی خشکسالی در پهنه ایران به یک ساختار کاملاً دوقطبی با پارادوکس‌های ترمودینامیکی تبدیل می‌شود. در نیمه جنوبی، شرقی و فلات مرکزی، شامل گستره‌ای از سواحل مکران تا دشت لوت، بی‌هنجاری‌های منفی شدیدی بین ۱۳ تا ۲۱ درصد حاکم می‌شود (شکل ۴). این پارادوکس در منطقه مذکور تنها یک دلیل قوی می‌تواند داشته باشد و آن هم ریشه در تغییر رژیم بارشی دارد. تشدید رطوبتی سامانه‌های موسمی و وقوع همرفت‌های عمیق، منجر به بارش‌های سیل‌آسای مقطعی می‌شود که شاخص‌های خشکسالی همانند SPEI را به طور موقت از فاز خشکسالی خارج می‌کند. اما در فواصل طولانی مدت بین این رخدادهای فرین، نرخ تبخیر-تعرق پتانسیل ناشی از گرمایش شدید، که در این شرایط کسری رطوبتی قابل توجهی را ایجاد می‌کند که تعداد اندک خشکسالی‌های رخ داده را به رخدادهایی با شدت‌های قابل توجه و فرین تبدیل می‌سازد. این نتیجه را به روشنی می‌توان از افزایش شدت خشکسالی در شکل (۳) دید. همانطور که در شکل (۳) مشخص است جنوب شرقی کشور بیشینه افزایش شدت خشکسالی را تجربه می‌کند.

در نقطه مقابل، عرض‌های بالاتر کشور همانند مناطق شمال غربی و نوار شمالی تحت سناریوی SSP5-8.5 در اواخر قرن، شاهد یک تغییر ماهیت در رژیم خشکسالی خواهند بود. تحلیل‌ها نشان می‌دهد در حالی که نرخ رخداد خشکسالی از میانگین تاریخی ۲۰ درصد

به ۳۰ تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۴)، شدت این پدیده‌ها به طور همزمان کاهش خواهد یافت. این یافته دلالت بر یک گذار از خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت به سمت دوره‌های خشک کوتاه‌مدت‌تر اما پرشمارتر دارد. چنین تغییری در الگوی خشکسالی، پیامدهای راهبردی مهمی برای مدیریت منابع آب به همراه دارد. به طور مشخص، این روند می‌تواند از ضرورت راهبردی برای ایجاد زیرساخت‌های عظیم و سرمایه‌بر مانند سدهای بزرگ که عمدتاً برای مقابله با خشکسالی‌های شدید و بلندمدت طراحی می‌شوند بکاهد. در مقابل، اهمیت به‌کارگیری استراتژی‌های مدیریتی منعطف، کوتاه‌مدت و غیرسازه‌ای را برجسته‌تر می‌سازد. راهکارهایی نظیر توسعه سامانه‌های هشدار سریع، مدیریت پویای تقاضا، و تدوین سیاست‌های تخصیص آب متناسب با شرایط جدید، در این مناطق از اولویت بالاتری برخوردار خواهند شد. بر اساس معادله کلایوس-کلاپیرون، افزایش ظرفیت رطوبتی جو گرم‌تر منجر به افزایش آب قابل بارش در سامانه‌های بارش‌زا می‌شود که شدت کمبود رطوبت را در زمان رخداد بارش تعدیل می‌کند. با این حال، بی‌هنجاری در توزیع زمانی بارش‌ها و تبخیر محلی بالا، باعث افزایش فراوانی دوره‌های خشک کوتاه‌مدت می‌شود. نتیجه این سازوکار، استقرار یک رژیم اقلیمی مبتنی بر رخداد خشکسالی‌های مکرر اما با شدت‌های تقلیل‌یافته و خفیف در عرض‌های شمالی است که استراتژی‌های متفاوتی از مدیریت منابع آب را نسبت به مناطق جنوبی کشور می‌طلبد.



شکل ۴. پراکنش مکانی بی‌هنجاری‌های فراوانی خشکسالی در ایران برای افق‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰). نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰). مبتنی بر برونداد CMIP6-MME تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی SSP1-2.6 (خوش بینانه)، SSP3-7.0 (بدبینانه) و SSP5-8.5 (خیلی بدبینانه).

Fig 4. Spatiotemporal distribution of anomalies in drought frequency across Iran for the near-future (2026–2050), mid-future (2051–2075), and far-future (2076–2100) periods relative to the historical (1990–2014). The analysis is derived from the CMIP6 multi-model ensemble (CMIP6-MME) under the shared socioeconomic pathways SSP1-2.6, SSP3-7.0, and SSP5-8.5.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف درک تغییرپذیری رخداد‌های خشکسالی در پهنه ایران، به ارزیابی کارایی مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری مشخصه‌های خشکسالی پرداخته است. کارایی چندمدلی همادی (CMIP6-MME) در بازتولید شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده در مقیاس ۱۲ ماهه (SPEI-12) برای دوره تاریخی (۲۰۱۴–۱۹۹۰) در نه ایستگاه همدید ایران نشان دهنده ارزیابی خشک سیستماتیک در برونداد همادی CMIP6-MME برای اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران است. این پدیده در ایستگاه مشهد با شدت بیشتری قابل بررسی است، بطوریکه مقدار ارزیابی به ۰/۴۷- رسیده است. این ارزیابی نشان‌دهنده یک ناهمگنی مکانی در درستی شبیه‌سازی‌ها است؛ به‌گونه‌ای که CMIP6-MME در عرض‌های بالاتر و اقلیم‌های نیمه‌خشک و کوهستانی (مانند تبریز و مشهد) کارایی خوبی در شبیه‌سازی چرخه‌های چندساله شاخص SPEI داشت، اما در اقلیم خزری (ایستگاه گرگان) به دلیل محدودیت تفکیک افقی GCM ها در شبیه‌سازی برهمکنش‌های پیچیده دریا-خشکی و اثرات توپوگرافیک رشته کوه البرز، با چالش مواجه شد. در همین راستا، مطالعات پیشین نیز بر محدودیت‌های فیزیکی و عدم قطعیت GCM ها در پارامترسازی و شبیه‌سازی بارش تاکید کرده‌اند (Balting et al., 2021).

تحلیل خشکسالی طی دوره تاریخی در ایران نشان داد که پهنه‌های کوهستانی و عرض‌های بالاتر، به‌رغم داشتن بیلان بارشی مثبت‌تر در گذشته، تحت تاثیر سیگنال‌های گرمایش جهانی و افزایش فزاینده تبخیر-تعرق پتانسیل (PET)، خشکسالی‌های شدیدی (مقادیر SPEI بین ۱/۵- تا ۱/۷۳-) را تجربه کرده‌اند. این یافته، در تطابق با مطالعات جهانی است. افزایش شدت خشکسالی‌ها در دهه‌های اخیر، بیش از آنکه ناشی از کمبود بارش باشد، مستقیماً با افزایش شدید تقاضای تبخیری جو (AED) مرتبط است (Vicente-Serrano et al., 2022). در واقع، حتی در مناطقی که مدل‌ها افزایش بارش را پیش‌نگری می‌کنند، افزایش AED ناشی از واداشت تابشی و فرآیندهای ترمودینامیکی باعث تشدید شدت خشکسالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیک می‌شود (Vicente-Serrano et al., 2020). مطالعات روی نیمکره شمالی نیز تایید می‌کنند که افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل، که خود پیامد مستقیم افزایش گازهای گلخانه‌ای و دمای تابستان است، عامل اصلی تشدید خشکسالی‌ها در مناطق جنوب‌حاره‌ای و عرض‌های میانی به شمار می‌رود (Balting et al., 2021).

بررسی چشم‌انداز خشکسالی ایران در افق‌های آینده (تا سال ۲۱۰۰) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 نشان‌دهنده جابجایی‌های مکانی و پاسخ‌های غیرخطی سامانه اقلیمی است. نتایج این مطالعه نشان داد که در آینده، یک ساختار دوقطبی در پهنه ایران شکل می‌گیرد. در حالی که عرض‌های بالاتر (شمال غرب و دامنه‌های زاگرس و البرز) با کاهش معنادار شدت خشکسالی و گذار به طبقه خشکسالی خفیف روبرو می‌شوند، عرض‌های پایین‌تر و نیمه جنوبی کشور تشدید فزاینده و بحرانی خشکسالی‌ها را به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5 تجربه خواهند کرد. این پدیده جابجایی مکانی هسته خشکسالی در سایر نقاط آسیا نیز گزارش شده است. به طوری که بروندادهای CMIP6 در چین، تغییر جهت مرکز خشکسالی به سمت جنوب را در قرن بیست و یکم پیش‌نگری کرده‌اند (Song et al., 2022) و در جنوب آسیا نیز تغییر کانون‌های خشکسالی از جنوب غرب به سمت شمال غرب گزارش شده است (Zhai et al., 2020).

به طور کلی نتایج این تحقیق بر اساس بروندادهای چندمدلی همادی CMIP6 تایید می‌کند که تحت تاثیر گرمایش جهانی و افزایش تقاضای تبخیری جو (AED)، ایران شاهد تغییرات ساختاری در رفتار خشکسالی خواهد بود. هرچه اقلیم آینده گرم‌تر باشد یعنی گذار از SSP1-2.6 به SSP5-8.5، خشکسالی‌های مناطق جنوبی و عرض‌های میانی شدت بیشتری خواهند یافت. این امر لزوم بازنگری اساسی در استراتژی‌های مدیریت منابع آب را برجسته می‌سازد. چرا که رویکردهای مدیریتی در نوار شمالی کشور باید بر مبنای

مقابله با خشکسالی‌های مکرر اما خفیف استوار گردد، در حالی که در پهنه جنوبی، تاب‌آوری در برابر خشکسالی‌های کمتر اما با شدت‌های فرین و بحرانی باید در دستور کار قرار گیرد. پایش این تغییرات، مستلزم ارزیابی خشکسالی‌ها در مقیاس‌های زمانی همسان و تمرکز بر نقش غالب تبخیر-تعرق پتانسیل در آینده اقلیمی ایران است.

در بررسی چشم‌انداز آینده منابع آب ایران، سناریوی SSP1-2.6 به دلیل فرض کاهش سریع انتشار گازهای گلخانه‌ای و توسعه پایدار به‌عنوان سناریوی خوش‌بینانه در نظر گرفته می‌شود که کمترین مقدار گرمایش و در نتیجه نوسانات ملایم‌تری را در شدت و فراوانی خشکسالی‌ها نشان می‌دهد. در مقابل، سناریوی SSP5-8.5 به دلیل تداوم اتکا به سوخت‌های فسیلی و بیشترین واداشت تابشی سناریوی بدبینانه محسوب شده و عامل محرک شدیدترین و طولانی‌ترین دوره‌های خشکسالی در کشور است. با این وجود، اگرچه ارزیابی‌های مبتنی بر داده‌های مشاهداتی تاریخی نشانگر بهبود کارایی مدل‌های CMIP6 نسبت به نسل‌های پیشین است، اما شبیه‌سازی رخداد‌های فرین مانند خشکسالی‌های فوق‌العاده شدید یا ترسالی‌های ناگهانی، به‌ویژه تحت سناریوی بدبینانه، ذاتاً با عدم قطعیت‌های بالایی همراه است. به دلیل محدودیت‌های ذاتی مدل‌های گردش کلی در بازتولید دقیق این نوسانات بی‌سابقه، خروجی‌های پیش‌نگری نباید به‌عنوان مقادیر مطلق و قطعی تفسیر شوند، بلکه باید به‌عنوان مرزهای هشدار برای ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم در نظر گرفته شوند. به همین دلیل، در برنامه‌ریزی بلندمدت منابع آب باید رویکردهای قطعی‌نگر را کنار گذاشت و به سمت تصمیم‌گیری استوار (RDM) و مدیریت سازگار حرکت کرد. این تغییر رویه کمک می‌کند تا از طریق پایش مستمر، رویکردهای جامع و توسعه زیرساخت‌های انعطاف‌پذیر، مقاومت و تاب‌آوری سیستم را در برابر شوک‌های غیرمنتظره اقلیمی و خطای مدل‌های پیش‌نگری تضمین نماییم.

منابع

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: food and agriculture organization of the United Nations, 56(97), e156. <http://www.climasouth.eu/sites/default/files/FAO%2056.pdf>
- Balting, D. F., AghaKouchak, A., Lohmann, G., & Ionita, M. (2021). Northern Hemisphere drought risk in a warming climate. *npj Climate and Atmospheric Science*, 4(1), 61. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00218-2>
- Bazrafshan, O., Teimouri, F., Golami, H., Shekari Chahestani, M. and Zamani, H. (2025). Application Of Integrated Drought Index in Multivariate Analysis Based on Vine-Copula. *Journal of Drought and Climate change Research*, 3(Special Issue), 95-118. <https://doi:10.22077/jdcr.2025.9917.1161> [In Persian]
- EM-DAT (2026). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (n.d.). EM-DAT: The international disaster database. Université catholique de Louvain. <https://www.emdat.be/>
- 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). <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- Dai, A., Trenberth, K. E., & Qian, T. (2004). A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6), 1117-1130. <https://doi.org/10.1175/JHM-386.1>
- Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: A precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 4(3), 301–312. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0101-6>
- Ding, Y., Hayes, M. J., & Widhalm, M. (2011). Measuring economic impacts of drought: a review and discussion. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 20(4), 434–446. <https://doi.org/10.1108/09653561111161752>
- Ebi, K. L., & Bowen, K. (2016). Extreme events as sources of health vulnerability: Drought as an example. *Weather and Climate Extremes*, 11, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.001>
- Fakhar, M. S. and Nazari, B. (2024). Monitoring and Assessing Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Iran Using Remote Sensing. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 39-58. <https://doi:10.22077/jdcr.2024.7011.1050> [In Persian]
- Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020, January 29). Emissions – the “business as usual” story is misleading. *Nature Publishing Group UK*. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Hill, T., Lewicki, P., & Lewicki, P. (2006). Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining. *StatSoft, Inc*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-03707-5.50024-3>

- Hu, W., She, D., Xia, J., He, B., & Hu, C. (2021). Dominant patterns of dryness/wetness variability in the Huang-Huai-Hai River Basin and its relationship with multiscale climate oscillations. *Atmospheric Research*, 247, 105148. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105148>
- Huang, J., Wang, Y., Fischer, T., Su, B., Li, X., & Jiang, T. (2017). Simulation and projection of climatic changes in the Indus River Basin, using the regional climate model COSMO-CLM. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2545-2562. <https://doi.org/10.1002/joc.4864>
- IPCC. (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg2/>
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Khalili, N., Arshad, M., Farajzadeh, Z., Kächele, H., & Müller, K. (2020). Does drought affect smallholder health expenditures? Evidence from Fars Province, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 765–788. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00608-1>
- Koohi, S. and Azizian, A. (2026). Analyzing the Impacts of Climate Change on Vegetation Dynamics and Agricultural Drought Intensity in the Karun River Basin Using Remote Sensing-Based Vegetation Indices. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(12), 3415-3434. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404497.670030> [In Persian]
- Kouhi, M. and Pakdaman, M. (2022). Assessing the Performance of CMIP5 GCMs in Copula-Based Bivariate Frequency Analysis of Drought Characteristics in the Southern Part of Karun Catchment. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(1), 153-172. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2022.326320.1007333> [In Persian]
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. Jr. (1999). Evaluating the Use of “Goodness-of-Fit” Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Modarres, R., Sarhadi, A., & Burn, D. H. (2016). Changes of extreme drought and food events in Iran. *Global and Planetary Change*, 144, 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.008>
- Mondal, S. K., Tao, H., Huang, J., Wang, Y., Su, B., Zhai, J., ... & Jiang, T. (2021). Projected changes in temperature, precipitation and potential evapotranspiration across Indus River Basin at 1.5–3.0 °C warming levels using CMIP6-GCMs. *Science of the Total Environment*, 789, 147867. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147867>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models’ part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., ... & Feyen, L. (2018). Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters*, 45(7), 3285-3296. <https://doi.org/10.1002/2017GL076521>
- Potop, V., Boroneant, C., Možný, M., Štěpánek, P., & Skalák, P. (2014). Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic. *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, 115(3–4), 563–581. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0908-y>
- Ramezani Etedali, H. and Koohi, S. (2025). Investigating the Impact of Climate Change on the Aridity in Iran with Population Exposure Approach. *Journal of Drought and Climate change Research*, 3(1), 17-38. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079> [In Persian]
- Rojas, O. (2020). Agricultural extreme drought assessment at global level using the FAO Agricultural Stress Index System (ASIS). *Weather and Climate Extremes*, 27, 100184. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.09.001>
- Roohollah Nejad, M., Salamati Hormozi, V., Ramezani, R. and Khansalari, S. (2022). Prediction of temperature and precipitation in the statistical period 2021-2080 in Hormozgan province for drought extraction and its downscaling by LARS-WG software. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(3), 693-712. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2022.334358.1007383> [In Persian]
- Shiogama, H., Fujimori, S., Hasegawa, T., Hayashi, M., Hirabayashi, Y., Ogura, T., Iizumi, T., Takahashi, K., & Takemura, T. (2023). Important distinctiveness of SSP3–7.0 for use in impact assessments. *Nature Climate Change*, 13(12), 1276–1278. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01883-2>
- Song, Y. H., Chung, E. S., & Shahid, S. (2022). Uncertainties in evapotranspiration projections associated with estimation methods and CMIP6 GCMs for South Korea. *Science of the Total Environment*, 825, 153953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153953>

- Song, Z., Xia, J., She, D., Li, L., Hu, C., & Hong, S. (2021). Assessment of meteorological drought change in the 21st century based on CMIP6 multi-model ensemble projections over mainland China. *Journal of Hydrology*, 601, 126643. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126643>
- Su, B., Huang, J., Mondal, S. K., Zhai, J., Wang, Y., Wen, S., Gao, M., Lv, Y., Jiang, S., Jiang, T., & Li, A. (2021). Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. *Atmospheric Research*, 250, 105375. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105375>
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., & Duffy, P. B. (2012). Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309–3314. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3309-2012>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17-22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F., McVicar, T. R., Tomas-Burguera, M., Miralles, D. G., Peña-Gallardo, M., ... & El Kenawy, A. (2020). Global characterization of hydrological and meteorological droughts under future climate change: The importance of timescales, vegetation-CO2 feedbacks and changes to distribution functions. *International Journal of Climatology*, 40(5), 2557-2567. <https://doi.org/10.1002/joc.6350>
- Vicente-Serrano, S. M., Peña-Angulo, D., Beguería, S., Domínguez-Castro, F., Tomás-Burguera, M., Noguera, I., ... & El Kenawy, A. (2022). Global drought trends and future projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 380(2238), 20210285. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0285>
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts (Hydrology Paper No. 23). Fort Collins, CO: Colorado State University. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90110-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90110-3)
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A. and 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. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343700.669278> [In Persian]
- 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>