


Projecting Future Compound Dry and Hot Extremes Events (CDHE) in Iran

Dadashi-Roudbari, A. A. 

Department of Geography, Faculty of Dr. Ali Shariati Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: a-dadashi@um.ac.ir

(Received: 5 Oct 2025, Revised: 26 Nov 2025, Accepted: 30 Dec 2026, Published online: 30 May 2026)

Summary

Climate change has amplified the frequency of weather and climate extreme events, such as heatwaves, heavy precipitation, and droughts. These extreme events are increasingly likely to co-occur, resulting in what are known as Compound Extreme Events. Given its geographical location within the global arid and semi-arid belt and the inherent vulnerability of its ecosystems, Iran is recognized as a critical hotspot for the impacts of climate change. A growing body of scientific evidence indicates that the nation is increasingly affected by such compound events. Compound extremes, particularly the concurrence of heatwaves and drought, pose a significant and escalating threat to societies and ecosystems in vulnerable regions. This study aims to assess and project changes in the frequency and duration of Compound Dry-Hot Extremes (CDHE) across Iran. The data utilized in this research are twofold: observational data from synoptic weather stations and outputs from CMIP6 models. The observational dataset comprises daily maximum temperature and precipitation time series from 98 synoptic stations across the country for the 1990–2014 period. For future projections, this study employed six models from the CMIP6 ensemble. To mitigate the uncertainties inherent in individual models and enhance predictive performance, a Weighted Multi-Model Ensemble (WMME) approach was adopted, based on the Inter-annual Variability Skill (IVS) score method. The analysis involves comparison of a historical period (1990–2014) with near-future (2026–2050), mid-future (2051–2075), and far-future (2076–2100) periods under two shared socio-economic pathways (SSP): SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The specific phenomenon investigated is the compound hot-dry event. A CDHE is identified by the simultaneous occurrence of two individual extremes, each defined by specific percentile thresholds. A hot event is defined as a day when the maximum temperature exceeds the 95th percentile of daily values for a given period. Concurrently, a dry event is characterized by daily precipitation falling below the 5th percentile for the same period. Analysis of the historical period reveals a statistically significant increasing trend in both the frequency (0.53 events/decade) and duration (0.86 days/decade) of CDHEs. Future projections indicate a positive anomaly, signifying an increase in CDHE occurrences. Under the SSP2-4.5 scenario, the annual frequency of these events is projected to rise from a historical average of 2.8 events to 8.2 events annually by the end of the century. The increase is substantially more severe under the SSP5-8.5 scenario, with the frequency escalating to 10.4 events per year. Similarly, the duration of these events is expected to lengthen considerably, increasing from a spatially averaged 4.4 days in the historical period to 20.6 days under SSP2-4.5 and a notable 36 days under SSP5-8.5. These results unequivocally highlight a significant intensification of risks associated with compound hot-dry extremes in Iran throughout the 21st century. These findings underscore the urgent necessity for implementing proactive adaptation strategies to address the escalating climate challenges.

Keywords: Compound Dry-Hot Extremes, Dry-Hot Extremes, climate change, CMIP6, Iran.

پیش‌نگری رخداد فرین‌های ترکیبی گرم-خشک (CDHE) در ایران

عباسعلی داداشی رودباری ✉

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: a-dadashi@um.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۳، بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۳/۹)

چکیده

رخدادهای فرین ترکیبی، به‌ویژه همزمانی گرما و خشکی، تهدیدی فزاینده برای جوامع و اکوسیستم‌های مناطق آسیب‌پذیر محسوب می‌شوند. این مطالعه با هدف ارزیابی و پیش‌نگری تغییرات فراوانی و طول دوره فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE) در ایران انجام شد. در این تحقیق، از شش مدل مشارکت‌یافته در CMIP6 استفاده شد. به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌های مدل‌های منفرد و افزایش کارایی پیش‌نگری‌ها، از رویکرد همادی چندمدلی وزنی (WMME) مبتنی بر روش نمره مهارت وردایی بین‌سالی (IVS) استفاده شد. تحلیل‌ها بر اساس مقایسه دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) با دوره‌های آینده نزدیک تا دور، تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انجام شد. یافته‌های دوره تاریخی نشان‌دهنده روند افزایشی و آماری معنادار در فراوانی (۰/۵۳ رخداد/دهه) و طول دوره (۰/۸۶ روز/دهه) رخدادهای CDHE است. پیش‌نگری‌ها نشان‌دهنده بی‌هنجاری افزایشی رخداد CDHE در سراسر کشور است. تحت سناریوی SSP2-4.5، فراوانی سالانه این رخدادها از متوسط ۲/۸ رخداد در دوره تاریخی به ۸/۲ رخداد تا پایان قرن افزایش می‌یابد. تحت سناریوی SSP5-8.5، این افزایش به مراتب شدیدتر بوده و فراوانی رخدادها تا ۱۰/۴ رخداد افزایش خواهد یافت. همچنین، طول دوره نیز افزایش قابل‌توجهی را تجربه خواهد کرد. به‌طوری‌که از متوسط پهنه‌ای ۴/۴ روز در دوره تاریخی به ۲۰/۶ روز تحت سناریو SSP2-4.5 و ۳۶ روز تحت سناریو SSP5-8.5 خواهد رسید. نتایج به‌روشنی بر تشدید قابل‌توجه ریسک مخاطرات مرتبط با رخداد فرین‌های ترکیبی گرم-خشک در ایران طی قرن بیست‌ویکم تأکید دارد. این یافته‌ها ضرورت اتخاذ فوری استراتژی‌های سازگاری در برابر چالش‌های اقلیمی فزاینده را برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: رخداد فرین‌های ترکیبی، رخداد گرم-خشک، تغییر اقلیم، CMIP6، ایران.

۱. مقدمه

(۲۰۲۲). رخدادهای فرین ترکیبی می‌توانند پیامدهای رخدادهای منفرد را تشدید کنند. این امر زمانی اهمیت دو چندان خواهد یافت که حتی اگر یک رخداد به‌تنهایی در دسته فرین‌ها قرار نگیرد اما ترکیب آن با یک رخداد دیگر می‌تواند یک رخداد فرین ترکیبی مخرب را ایجاد کند (فانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

در سال‌های اخیر، تمرکز جامعه علمی و به‌طور ویژه در علوم جوی از بررسی رخدادهای فرین منفرد به سمت پدیده‌های پیچیده‌تر، یعنی فرین‌های ترکیبی معطوف شده است. همان‌طور که گفته شد یک رخداد فرین ترکیبی زمانی رخ می‌دهد که دو یا چند متغیر یا فرین جوی (نه لزوماً همیشه رخداد فرین) به‌طور همزمان یا متوالی به‌وقوع بپیوندند و اثرات ترکیبی آنها بسیار شدیدتر از تأثیر هر یک

تغییر اقلیم فراوانی رخداد پدیده‌های فرین جوی و اقلیمی از جمله موج‌های گرما، بارش‌های سنگین و خشکسالی‌ها را افزایش داده است. رخدادهای فرین به‌شکل فزاینده‌ای محتمل هستند که با یکدیگر ترکیب شده و منجر به رخدادهای فرین ترکیبی (Compound Extreme Events) شوند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ فانگ و همکاران، ۲۰۲۵). برای یک منطقه مشخص جغرافیایی، رخداد فرین ترکیبی را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی کرد. (۱) رخدادهای فرین ترکیبی توالی‌دار (Sequential) که با توالی سریع مانند رخدادهای متوالی موج گرما و بارش (SHP) رخ می‌دهند و (۲) رخدادهای فرین ترکیبی هم‌زمان (Concurrent) که مانند رخدادهای هم‌زمان خشکسالی و موج گرما (CDH) به‌صورت هم‌زمان به وقوع می‌پیوندند (ریدر و همکاران،

تکرار شونده در کشور تبدیل شده‌اند. برای مثال، سیل‌های ویرانگر بهار ۱۳۹۸ در استان‌های شمالی (گلستان و مازندران) و غربی (لرستان) نمونه بارز این پدیده است. این سیل‌ها که پس از یک دوره کم‌بارش زمستانی رخ دادند، خسارات عظیمی به زیرساخت‌ها و کشاورزی وارد کردند و به‌همین ترتیب در شیراز، یک بارش ناگهانی و شدید در عرض چند دقیقه به یک فاجعه انسانی منجر شد. این الگو در مرداد ۱۴۰۱ با شدتی بیشتری در کشور تکرار شد. پس از یک موج گرما، بارش‌های موسمی ناگهانی باعث رخداد سیلاب‌های مرگبار در نقاط مختلف کشور، از جمله امام‌زاده داوود تهران و استان چهارمحال و بختیاری شد. این رخدادها نشان می‌دهند که چگونه گرمای پیشین، با خشک و نفوذناپذیر کردن خاک، پتانسیل تخریبی بارش‌های متعاقب آن را به شدت افزایش می‌دهد.

از سوی دیگر، رخدادهای فرین ترکیبی هم‌زمان خشکسالی و موج گرما (CDH)، مدیریت منابع آب و انرژی کشور را با چالش‌های بی‌سابقه‌ای روبه‌رو ساخته‌اند. دوره‌های خشکسالی شدید و طولانی‌مدت، مانند آنچه در سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۷۷ و دهه اخیر تجربه شد، منابع آبی کشور را با مشکلات جدی همراه ساخت. این وضعیت در بهار و تابستان ۱۴۰۰ به اوج خود رسید. به‌طوری‌که یک خشکسالی گسترده هم‌زمان با امواج گرمایی شدید و پایدار رخ داد (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰). این تلاقی، از یک سو منجر به کاهش ذخایر آبی سدها و افت بی‌سابقه تولید برق آبی شد و از سوی دیگر، تقاضا برای برق را به دلیل نیاز به سیستم‌های سرمایشی به حداکثر رساند. نتیجه این رخداد ترکیبی، اعمال خاموشی‌های گسترده، توقف فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی بود. چنین رخدادهایی به روشنی نشان می‌دهند که چگونه هم‌افزایی مخاطرات اقلیمی می‌تواند سیستم‌های حیاتی یک کشور را مختل کرده و ظرفیت‌های تطابق ملی را به‌طور جدی به چالش بکشد. لذا بررسی فرین‌های ترکیبی و به‌طور مشخص فرین‌های ترکیبی گرم-خشک یک ضرورت جدی در سطح کشور است. این تحقیق فرین‌های ترکیبی گرم-خشک (Hot-Dry) را به‌عنوان یک مخاطره جدی که

به تنهایی باشد (کلیما و تی، ۲۰۲۳). برای مثال، رخداد هم‌زمان موج گرما و خشکسالی، یا بارش شدید به‌همراه بالا آمدن تراز آب دریا در مناطق ساحلی، نمونه‌هایی از این رخدادها هستند که می‌توانند منجر به بروز مخاطرات آبخاری (Cascading Hazards) با پیامدهای فاجعه‌بار شوند (کاتر، ۲۰۱۸). اهمیت این موضوع به حدی است که دفتر سازمان ملل متحد برای کاهش ریسک بلایا (UNDRR) و شورای بین‌المللی علوم (ISC) در گزارش‌های اخیر خود (دفتر کاهش خطر بلایای سازمان ملل متحد (UNDRR) / شورای بین‌المللی علوم (ISC)، 2020 و 2021) بر ماهیت به‌هم‌پیوسته و پیچیده مخاطرات طبیعی و انسان‌ساخت تأکید ویژه‌ای داشته است.

در همین راستا، سازمان جهانی هواشناسی (WMO) با ارائه دستورالعمل‌هایی برای تعاریف و روش‌های استاندارد جهت شناسایی رخدادهای فرین، به‌ویژه در زمینه دما و بارش، گام مهمی برداشته است. هدف از این دستورالعمل‌ها، نه تغییر رویکردهای ملی، بلکه ایجاد یک زبان مشترک برای تبادل اطلاعات در سطح بین‌المللی است که برای تهیه گزارش‌های وضعیت اقلیمی، دیده‌بانی‌های اقلیمی و به‌ویژه روش‌شناسی جدید WMO برای فهرست‌نگاری رخدادهای مخاطره‌آمیز (WMO-CHE) ضروری است. درک بهتر، شناسایی و پیش‌بینی/پیش‌نگری فرین‌های ترکیبی مستلزم بهره‌گیری از همین رویکردهای استاندارد است تا بتوان جوامعی تاب‌آور در برابر نوسانات اقلیمی و سازگار با تغییر اقلیم ایجاد کرد.

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان و آسیب‌پذیری ذاتی اکوسیستم‌های آن، یکی از کانون‌های بحرانی مواجهه با پیامدهای تغییر اقلیم محسوب می‌شود. شواهد و مستندات علمی نشان می‌دهد که کشور به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر رخدادهای فرین ترکیبی قرار گرفته است (زرین و همکاران، ۲۰۲۲؛ اسدی رحیمی‌بیگی و همکاران، ۲۰۲۴؛ صفایی و همکاران، ۲۰۲۵). رخدادهای فرین ترکیبی توالی‌دار (SHP)، که مشخصه آنها وقوع بارش‌های سیل‌آسای ناگهانی پس از دوره‌های گرم-خشک است، به یک الگوی مخرب

تغییرات جمعیت در افزایش مواجهه انسانی با رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک در حال افزایش است. گروه دیگری از این پژوهش‌ها همانند آدیری و همکاران (۲۰۲۴) به تحلیل برهم‌کنش پیچیده در اکوسیستم‌ها، مانند ارتباط زنجیره‌ای بین خشکسالی، تنش پوشش گیاهی، موج گرما و شدت آتش‌سوزی و نقش دورپیوندها پرداختند. در مقیاس منطقه‌ای، به‌ویژه در مناطق آسیب‌پذیر آسیا، تحقیقات متعددی اثرات این فرین‌های ترکیبی را بر بخش‌های حیاتی مانند کشاورزی و امنیت غذایی بررسی کرده‌اند (یو و همکاران، ۲۰۲۴؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۵). این مطالعات نشان می‌دهند که ویژگی‌های منطقه‌ای مانند سامانه‌های مونسونی و توپوگرافی پیچیده نقشی تعیین‌کننده در الگوهای رخداد و شدت فرین‌های ترکیبی دارند (کریشان و همکاران، ۲۰۲۵). علاوه بر این، پیش‌نگری‌ها نشان می‌دهد که ریسک ناشی از این پدیده‌ها، به‌ویژه در شهرهای بزرگ به‌طور چشمگیری افزایش خواهد یافت (فانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

به‌رغم مطالعات بسیاری که در سطح جهانی فرین‌های ترکیبی را بررسی کردند اما در ایران طی سال‌های اخیر تمرکز پژوهشگران بر فرین‌های اقلیمی بارش و دما به‌شکل منفرد بوده است. این مطالعات را عمدتاً می‌توان بر حسب نوع فرین بارشی یا دمایی مورد بررسی قرار داد. عزیزاده‌چوبری و نجفی (۲۰۱۸) با تحلیل داده‌های ایستگاهی، گرمایش سریع ایران را نشان دادند. در تحقیق دیگر جنگی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از روش EHF نشان دادند که تمامی ویژگی‌های امواج گرمایی در دهه اخیر در سراسر کشور شدت یافته است. در همین راستا پژوهش‌هایی به پیش‌نگری فرین‌ها پرداختند، همانند واقفی و همکاران (۲۰۱۹) که نشان دادند دوره‌های خشک طولانی منقطع با بارش‌های سیل‌آسا در ایران افزایش خواهد یافت. این پیش‌نگری توسط جهان‌شاهی و همکاران (۲۰۲۴) نیز اثبات شد. به‌طوری‌که آنها نشان دادند با وجود کاهش کلی بارش، افزایش شدت آن منجر به بالا رفتن پیک رواناب و ریسک سیل در بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور خواهد شد. در ادامه این پژوهش‌ها زرین و داداشی

شواهد آن را می‌توان در سال‌های در کشور به کرات مشاهده کرد به‌عنوان مسئله اصلی مورد توجه قرار داده است.

حوزه مطالعاتی رخدادهای فرین‌های ترکیبی که به بررسی اثرات تشدیدشونده‌ی هم‌رویدادی یا توالی پدیده‌های اقلیمی می‌پردازد، در سال‌های اخیر به سرعت افزایش یافته است. این تحقیقات را عمدتاً می‌توان در سه دسته ۱- چهارچوب مفهومی و روش‌شناسی فرین‌های ترکیبی، ۲- روندها و پیش‌نگری فرین‌های اقلیمی و ۳- ارزیابی اثر بخشی و ریسک‌های منطقه‌ای تقسیم کرد. پژوهش‌های اولیه در این زمینه چارچوب‌های مفهومی و روش‌شناختی رخدادهای فرین‌های ترکیبی را بررسی کردند. این مطالعات ضمن دسته‌بندی انواع اصلی فرین‌های ترکیبی (مانند گرم-خشک، گرم-مرطوب و سیلاب‌های ترکیبی) به شناسایی محرک‌های فیزیکی و دینامیکی آنها، از جمله نقش پدیده‌های مقیاس سینوپتیک و بازخوردهای زمین-جو پرداختند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ مسوری و همکاران، ۲۰۲۱).

دسته دوم پژوهش‌های انجام شده به ارزیابی روندهای جهانی و پیش‌نگری‌های آینده با استفاده از خروجی مدل‌های گردش کلی، به‌ویژه مجموعه مدل‌های CMIP6 پرداختند. تحلیل‌های جهانی نشان دادند که فراوانی فرین‌های ترکیبی گرم (گرم-خشک و گرم-مرطوب) در دهه‌های اخیر به‌طور معناداری افزایش یافته در حالی که فرین‌های سرد روندی کاهشی داشته‌اند (وو و همکاران، ۲۰۲۱). پیش‌نگری‌ها حاکی از آن است که تحت سناریوهای مختلف، دوره‌های بازگشت رخدادهای مانند موج گرما و خشکسالی در اکثر نقاط جهان به شدت کاهش خواهد یافت و در مقابل فراوانی و طول دوره آنها افزایش خواهد یافت. در این میان، برخی از مطالعات همانند ریدر و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که کارایی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی این پدیده‌های پیچیده نقشی حیاتی دارد.

دسته سوم مطالعات انجام شده، بر ارزیابی اثر بخشی و ریسک‌های منطقه‌ای متمرکز شده‌اند. برای نمونه یانگ و ژائو (۲۰۲۴) نشان دادند که سهم غالب تغییر اقلیم در مقابل

است. موقعیت جغرافیایی ایران، کشور را درون کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان قرار داده و تحت سیطره الگوهای گردشی جوی حاکم بر عرض‌های میانی و جنب‌حاره‌ای، به‌ویژه پرفشار جنب‌حاره قرار می‌دهد. این شرایط به‌طور ذاتی پتانسیل بالایی برای رخداد فرین‌های اقلیمی، از جمله امواج گرما و دوره‌های خشک فراهم می‌آورد. ساختار توپوگرافیک پیچیده ایران، که توسط دو رشته‌کوه عظیم البرز در شمال و زاگرس در امتداد غرب و جنوب غرب محصور شده است، نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع فضایی متغیرهای اقلیمی و تشدید شرایط خشکی در نواحی داخلی ایفا می‌کند. در نتیجه، بخش‌های بزرگی از ایران با رطوبت نسبی بسیار پایین و دامنه تغییرات شبانه‌روزی و سالانه بالا مشخص می‌شوند.

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به دو دسته داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید و داده‌های مدل‌های CMIP6 تقسیم می‌شوند. داده‌های مشاهداتی شامل سری‌های زمانی دمای بیشینه و بارش روزانه از ۹۸ ایستگاه هواشناسی همدید در کشور برای دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ میلادی است (شکل ۱-الف و جدول ۱).

۲-۲-۱. داده‌های مشاهداتی

به‌منظور ارزیابی مدل‌های CMIP6، از داده‌های مشاهداتی روزانه دمای بیشینه و بارش مربوط به ۹۸ ایستگاه هواشناسی همدید در ایران استفاده شد. این داده‌ها، از سازمان هواشناسی کشور برای دوره آماری ۲۵ ساله از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ اخذ شدند (شکل ۱-الف). پیش از استفاده، داده‌های هواشناسی تحت فرایند کنترل کیفی قرار گرفتند. کنترل کیفی شامل شناسایی داده‌های گمشده، حذف مقادیر پرت و ارزیابی همگنی سری‌های زمانی بود. از داده مشاهداتی به‌عنوان مرجع برای ارزیابی درستی مدل‌های CMIP6 و وزن‌دهی استفاده شد.

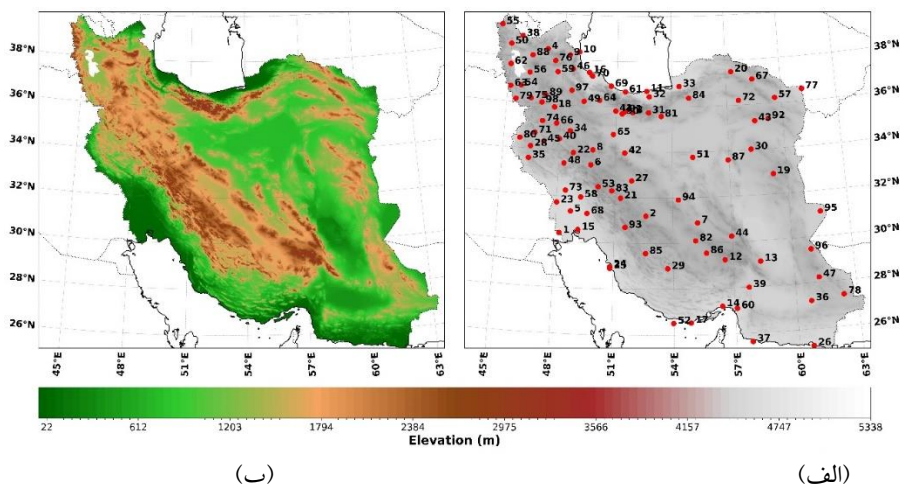
رودباری (۱۴۰۰الف) افزایش شدید روزهای خشک متوالی (CDD) را به‌ویژه در شمال و شمال‌غرب کشور پیش‌نگری کردند. زرین و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی دیگر نشان داد که آستانه بارش‌های سنگین در سواحل خزر افزایش می‌یابد. این یافته‌ها، الگوی پیچیده آینده اقلیم ایران را تأیید می‌کند. خان سالاری و محمدی (۱۴۰۲) نیز دریافتند که بارش‌های فرین آینده در تعداد روزهای کمتری متمرکز خواهند شد که خطر سیلاب‌های ناگهانی را تشدید می‌کند. در نهایت، اسدی رحیمی‌بیگی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از پیش‌نگری‌های دهه‌ای (DCPP)، روند افزایشی فرین‌های بارشی را برای آینده بسیار نزدیک (تا ۲۰۲۸) به‌ویژه در جنوب‌غرب و شمال‌شرق کشور تأیید کردند.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که دانش جهانی در حوزه فرین‌های ترکیبی از تعریف مفاهیم به سمت پیش‌نگری‌های کاربردی و ارزیابی ریسک حرکت کرده است. با این حال، یک شکاف پژوهشی عمیق در خصوص مناطق آسیب‌پذیری که کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، وجود دارد. کشور ایران، با قرارگیری در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک و مواجهه با چالش‌های جدی تغییر اقلیم، یکی از این مناطق است. فقدان یک تحقیق جامع از فرین‌های ترکیبی، نبود تحلیل‌های روند و پیش‌نگری‌های منطقه‌ای و عدم ارزیابی کمی اثرات این پدیده‌ها بر بخش‌های حیاتی کشور مانند منابع آب و کشاورزی یک شکاف علمی بزرگ محسوب می‌شود. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و پیش‌نگری فرین‌های ترکیبی گرم-خشک (Hot-Dry) و ارزیابی اثرات آنها در ایران، نه تنها به پر کردن این شکاف علمی کمک می‌کند، بلکه برای تدوین راهبردهای ملی سازگاری و مدیریت بحران ضرورتی انکارناپذیر است.

۲. روش پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، کشور ایران در غرب آسیا



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ الف) ایستگاه‌های هواشناسی همدید و ب) مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با تفکیک افقی ۳۰ متر بر اساس داده‌های ALOS PALSAR (واحد: متر).

جدول ۱. لیست شماره ایستگاه‌های مورد استفاده.

ID	نام ایستگاه	ID	نام ایستگاه	ID	نام ایستگاه
1	آبادان	34	همدان (فرودگاه)	67	قوچان
2	آباده	35	ایلام	68	رامهرمز
3	آبعلی	36	ایرانشهر	69	رامسر
4	اهر	37	جاسک	70	رشت
5	اهواز	38	جلفا	71	روانسر
6	الیگودرز	39	کهنوج	72	سبزوار
7	انار	40	کنگاور	73	صفی آباد (درفول)
8	اراک	41	کرج	74	سندج
9	اردبیل	42	کاشان	75	سفر
10	آستارا	43	کاشمر	76	سراب
11	بابلسر	44	کرمان	77	سرخس
12	بافت	45	کرمانشاه	78	سراوان
13	بم	46	خلخال	79	سردشت
14	بندرعباس	47	خاش	80	سرپل ذهاب
15	بندر ماهشهر	48	خرم آباد	81	سمنان
16	بندر انزلی	49	خرمدره	82	شهر بابک
17	بندر لنگه	50	خوی	83	شهرکرد
18	بیجار	51	خور و بیابانک	84	شاهرود
19	بیرجند	52	جزیره کیش	85	شیراز
20	بجنورد	53	کوهرنگ	86	سیرجان
21	بروجن	54	مهاباد	87	طبس
22	بروجرد	55	ماکو	88	تبریز
23	بستان	56	مراغه	89	تکاب
24	بوشهر (فرودگاه)	57	مشهد	90	تهران (فرودگاه مهرآباد)
25	بوشهر (ساحلی)	58	مسجد سلیمان	91	تهران (شمیران)
26	چابهار	59	میانه	92	تربت حیدریه
27	اصفهان (فرودگاه)	60	میناب	93	یاسوج
28	اسلام آباد غرب	61	نوشهر	94	یزد
29	فسا	62	ارومیه	95	زابل
30	فردوس	63	پیرانشهر	96	زاهدان
31	فیروزکوه	64	قزوین	97	زنجان
32	قراخیل	65	قم	98	زرنه
33	گرگان	66	فروه		

۲-۲-۲. مدل‌های CMIP6 مورد بررسی و دلیل گزینش

آنها

در این تحقیق از خروجی شش مدل گردش کلی (GCMs) از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) برای پیش‌نگری فرین‌های ترکیبی گرم-خشک استفاده شد (جدول ۲). فرایند انتخاب این مدل‌ها بر اساس یک رویکرد حساسیت اقلیمی مدل‌ها صورت گرفت تا نماینده‌ای مناسب از طیف وسیع عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های CMIP6 باشند. به‌طور مشخص، این مدل‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که مدل‌هایی با حساسیت اقلیمی ترازمند ECS (Equilibrium Climate Sensitivity) و پاسخ اقلیمی گذرا TCR (Transient Climate Response) متفاوت را در بر گیرد. مقادیر ECS در مدل‌های منتخب از ۲/۶ کلوین (مدل GFDL-ESM4) تا ۵/۳ کلوین (مدل UKESM1-0-LL) متغیر است که بازه‌ای از حساسیت کم تا بسیار بالا را پوشش می‌دهد. این استراتژی، تضمین می‌کند که نتایج پژوهش به یک خانواده خاص از مدل‌ها محدود نشده و طیف گسترده‌ای از پاسخ‌های اقلیمی محتمل به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای را در نظر می‌گیرد (ناتتی و

همکاران، ۲۰۱۷) این امر برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، به‌ویژه بر پدیده‌های فرین، امری ضروری است. برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، دو سناریو حد واسط (-SSP2 و 4.5) و سناریوی بسیار بدبینانه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی (SSP5-8.5) از سناریوها اجتماعی-اقتصادی (SSPs) استفاده شد. تحلیل‌ها برای دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و سه دوره آینده شامل آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) انجام شد.

۲-۳. پیش‌پردازش مدل‌های CMIP6 مورد بررسی

با توجه به این که GCMها دارای تفکیک افقی متفاوتی هستند (از ۱۰۰ کیلومتر تا ۲۵۰ کیلومتر)، به‌منظور یکسان‌سازی شبکه‌های محاسباتی و تولید چند مدلی همادی، تمام خروجی‌های مدل‌ها بر روی یک شبکه مشترک با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر، باز شبکه‌بندی (regridded) شدند. برای این منظور از روش درون‌یابی دوخطی (Bilinear Interpolation) استفاده شد که یک روش استاندارد برای حفظ ساختار فضایی متغیرهای پیوسته‌ای مانند دما و بارش است (IPCC, ۲۰۲۱).

جدول ۲. مشخصات GCMهای منتخب از پروژه CMIP6 مورد استفاده در این پژوهش.

اسم مدل	گونه اجرا	تفکیک افقی (کیلومتر)	ECS	TCR	شناسه موسسه
GFDL-ESM4	rli1plf1	۱۰۰	۲/۶	۱/۶	NOAA-GFDL
EC-Earth3-CC		۱۰۰	۴/۳	۲/۶	EC-Earth-Consortium
ACCESS-CM2		۲۵۰	۴/۷	۲/۱	CSIRO-ARCCSS
MPI-ESM1-2-HR		۱۰۰	۳/۰	۱/۷	MPI-M DWD DKRZ
MRI-ESM2-0		۱۰۰	۳/۲	۱/۶	MRI
UKESM1-0-LL		۲۵۰	۵/۳	۲/۸	MOHC NERC NIMS-KMA NIWA

نزدیک به صفر، نشان‌دهنده شباهت بالای وردایی بین سالی مدل با مشاهدات و در نتیجه کارایی بهتر مدل در این زمینه است. این شاخص به‌عنوان یکی از سنج‌های اصلی در فرایند وزن‌دهی مدل‌ها به کار گرفته شد.

فرایند تخصیص وزن در سه مرحله انجام شد. در گام نخست، تمامی شش مدل مورد بررسی در جدول ۲ بر اساس مقادیر IVS محاسبه‌شده برای هر یک، به‌صورت نزولی رتبه‌بندی شدند. در این رتبه‌بندی، رتبه S_i به مدل i تخصیص داده شد، به‌طوری که مدل با بالاترین نمره IVS، رتبه اول ($S=1$) را کسب می‌کند. در گام دوم، با اقتباس از روش ارائه‌شده توسط چن و همکاران (۲۰۱۱)، شاخص کارایی (R_i) برای هر مدل با رابطه (۲) محاسبه شد.

$$R_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{S_i} \quad (2)$$

در این رابطه، N تعداد کل مدل‌ها و S_i رتبه مدل i است. بر اساس این رابطه، شاخص R_i به‌صورت خطی با بهبود رتبه مدل افزایش می‌یابد و به مدل‌های با کارایی برتر (رتبه پایین‌تر)، مقادیر بالاتری اختصاص می‌دهد. در مرحله آخر و سوم، وزن هر مدل (W_i) از طریق نرمال‌سازی شاخص کارایی آن به دست آمد (رابطه ۳) تا اطمینان حاصل شود که مجموع کل وزن‌ها برابر با یک است.

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (3)$$

۲-۵. ارزیابی کارایی مدل‌های منفرد و چند مدلی

همادی وزنی دمای بیشینه و بارش

در این پژوهش، برای ارزیابی کارایی مدل‌ها در شبیه‌سازی متغیرهای دمای بیشینه و بارش، از نمودار تیلور (تیلور، ۲۰۰۱) استفاده شد. این نمودار امکان مقایسه همزمان سه سنج آماری کلیدی ضریب همبستگی، انحراف معیار نرمال‌شده و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) را فراهم می‌کند. موقعیت هر نقطه در این نمودار، که معرف یک مدل خاص است، به‌صورت بصری و کمی، تطابق مقدار شبیه‌سازی‌شده با مقدار مرجع یا مشاهداتی را نشان می‌دهد. نقطه‌ای که به نقطه مرجع (REF) روی محور افقی نزدیک‌تر باشد، بیانگر کارایی بهتر مدل است. از طریق این

در این مطالعه، از خروجی مستقیم مدل‌ها (Direct Model Output) بدون اعمال روش‌های تصحیح اریبی (Bias Correction) به دو دلیل استفاده شده است. یکی از اهداف اصلی این پژوهش، ارزیابی کارایی مدل‌ها در شبیه‌سازی وردایی بین‌سالی (Inter-annual Variability) فرین‌های ترکیبی است. روش‌های تصحیح اریبی، اگرچه میانگین آماری را به داده‌های مشاهداتی نزدیک می‌کنند، اما اغلب وردایی ذاتی مدل را از بین می‌برند (ابهرت و همکاران، ۲۰۱۲). از آنجایی که روش وزن‌دهی مدل‌ها در این تحقیق بر اساس شاخص مهارت وردایی بین‌سالی IVS (Interannual Variability Skill) استوار است، حفظ این وردایی در برونداد مستقیم مدل امری ضروری است. استفاده از DMO این امکان را می‌دهد که کارایی ذاتی و ساختاری GCM‌ها را در شبیه‌سازی فرایندهای اقلیمی و پدیده‌های فرین، بدون تأثیرپذیری از الگوریتم‌های تصحیح اریبی، ارزیابی کرد. این رویکرد به درک عمیق‌تری از نقاط قوت و ضعف مدل‌ها در بازنمایی دینامیک اقلیم منطقه مورد مطالعه منجر می‌شود (مارون و همکاران، ۲۰۱۷).

۲-۴. تولید چند مدلی همادی وزنی مبتنی بر شاخص وردایی بین‌سالی (IVS)

به‌منظور تولید چند مدلی همادی از خروجی مدل‌های منفرد از رویکرد چند مدلی همادی وزنی (Weighted Multi-Model Ensemble) استفاده شد. فرایند وزن‌دهی به هر یک از مدل‌ها، مبتنی بر الگوریتم رتبه‌بندی است که بر اساس کارایی هر مدل در بازتولید وردایی بین‌سالی استوار است. برای این منظور، نمره مهارت وردایی بین‌سالی (IVS) (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۵) به‌عنوان سنج ارزیابی مهارت مدل‌ها انتخاب شد. این شاخص به شکل رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$IVS(m, o) = \left(\frac{STD_m}{STD_o} - \frac{STD_o}{STD_m} \right)^2 \quad (1)$$

در این رابطه، STD_m و STD_o به ترتیب انحراف معیار سری‌های زمانی مدل و مشاهدات هستند. مقدار IVS

اکوسیستم‌ها به‌طور گسترده مورد تأیید قرار گرفته است (لیو و همکاران، ۲۰۲۱).

۳. نتایج و بحث

۳-۱. کارایی مدل‌های CMIP6 منفرد و همادی وزنی

(WMME) برای دمای بیشینه و بارش

کارایی مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی وزنی (WMME) در شبیه‌سازی متغیرهای دمای بیشینه و بارش در برابر داده‌های مشاهداتی با استفاده از نمودار تیلور مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۲). تحلیل نمودار تیلور برای متغیر دمای بیشینه نشان داد مدل‌های CMIP6 مورد بررسی، همبستگی فضایی در بازه ۰/۲۲ تا ۰/۶۸ را با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهند (شکل ۲-الف). در میان مدل‌های منفرد، مدل MRI-ESM2-0 با ضریب همبستگی ۰/۲۲، پایین‌ترین کارایی را در بازسازی الگوی فضایی دمای بیشینه نشان داد. در مقابل، مدل UKESM1-0-LL با بالاترین ضریب همبستگی در میان مدل‌های منفرد، بهترین کارایی را نشان داده است. نکته قابل توجه، کارایی برتر مدل همادی وزنی (WMME) است که با ضریب همبستگی ۰/۷۲، بالاتر از تمامی مدل‌های منفرد قرار گرفت. این نتیجه نشان می‌دهد که به کارگیری رویکرد همادی چندمدلی وزنی مبتنی بر روش IVS، قادر است کارایی شبیه‌سازی دمای بیشینه را به شکل قابل توجهی بهبود بخشد و به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر سازد. متغیر بارش، به دلیل ماهیت ذاتاً متغیر و ناهمگون خود در مقیاس‌های مکانی و زمانی، معمولاً همبستگی پایین‌تری نسبت به متغیرهای دمایی در مدل‌سازی‌های اقلیمی نشان می‌دهد. این موضوع در نتایج ارائه شده در شکل (۲-ب) نیز مشهود است، به‌طوری‌که ضریب همبستگی فضایی برای مدل‌های منفرد در بازه ۰/۲ تا ۰/۶ متغیر است. همانند دمای بیشینه، مدل MRI-ESM2-0 ضعیف‌ترین کارایی را در شبیه‌سازی بارش نشان داد. از سوی دیگر، مدل MPI-ESM1-2-HR بهترین کارایی را در میان مدل‌های منفرد به خود اختصاص داد. برای متغیر بارش نیز همانند دمای بیشینه، مدل همادی وزنی WMME با ضریب همبستگی

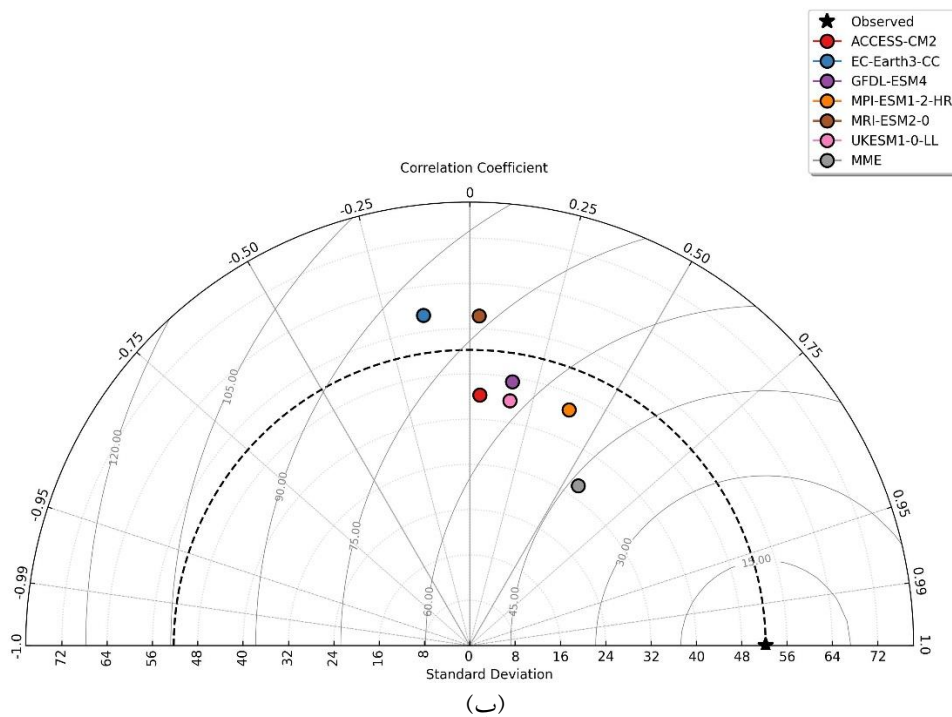
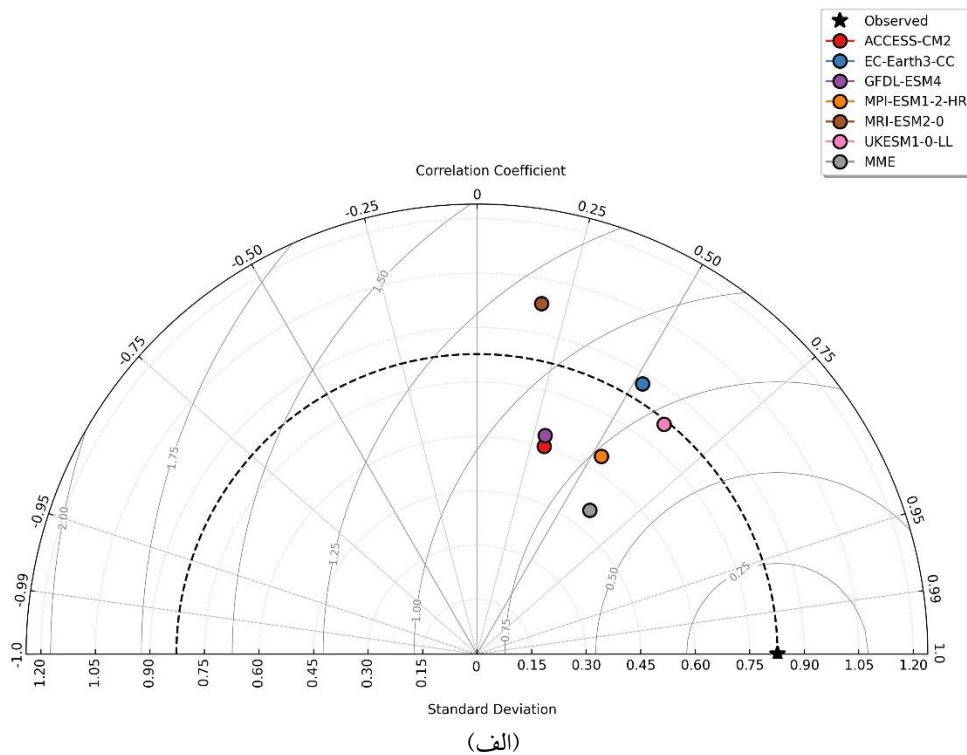
نمودار می‌توان به‌طور همزمان دقت مدل در بازتولید دامنه نوسانات (انحراف معیار) الگوی فضایی-زمانی (همبستگی) و خطای کلی را ارزیابی کرد.

۲-۶. رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک (Hot-Dry) (Dry)

رخدادهای فرین ترکیبی CEs (Compound Events)، نظیر هم‌زمانی موج گرما و خشکسالی، به دلیل پتانسیل ایجاد اثرات مخرب اجتماعی و اکولوژیکی، از اهمیت بالایی برخوردارند. در این تحقیق رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک (Hot-Dry) مورد بررسی قرار گرفته است. شناسایی یک رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک (Hot-Dry) مستلزم وقوع همزمان دو رخداد منفرد است که هر یک با آستانه‌های درصدی مشخصی تعریف می‌شوند (یو و همکاران، ۲۰۲۲). یک رخداد منفرد گرم (Hot) زمانی شناسایی می‌شود که دمای بیشینه روزانه از صدک ۹۵ مقادیر روزانه در دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) یا آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) فراتر رود. به‌طور همزمان، یک رخداد خشک (Dry) با بارش روزانه کمتر از صدک ۵ مقادیر روزانه در همان دوره تعریف می‌شود. شایان ذکر است که برای محاسبه آستانه بارش، تنها روزهایی که مقدار بارش در آنها بزرگ‌تر از صفر میلی‌متر است، لحاظ می‌شود (یانگ و تانگ، ۲۰۲۳). پس از شناسایی روزهایی که هر دو شرط مذکور را برآورده می‌کنند، دو مشخصه کلیدی تعداد و طول دوره رخدادها مورد ارزیابی قرار گرفتند. تعداد رخدادها به شمار تعداد کل رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک در هر نقطه شبکه می‌پردازد، با این شرط که وقوع رخداد در روزهای متوالی به‌عنوان یک رخداد واحد در نظر گرفته می‌شود. سپس تعداد روزهایی که در طی آنها آستانه‌های رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک در هر نقطه شبکه برآورده شده‌اند به‌عنوان طول دوره محاسبه می‌شود. این رویکرد تحلیلی امکان ارزیابی دقیق فراوانی و تداوم رخدادهای فرین ترکیبی را فراهم می‌آورد که اثرات نامطلوب آنها بر سلامت انسان، امنیت غذایی و بهره‌وری

تولید چند مدلی همادی در کاهش عدم قطعیت‌های ذاتی مدل‌های منفرد و افزایش کارایی پیش‌نگری‌های اقلیمی است.

۰/۷، کارایی بالاتری نسبت به مدل‌های منفرد ارائه داده است. به‌طور کلی، کارایی بالاتر WMME در شبیه‌سازی هر دو متغیر دمای بیشینه و بارش، نشان‌دهنده نقش کلیدی



شکل ۲. نمودار تیلور برای میانگین دمای بیشینه سالانه (الف) و مجموع بارش سالانه (ب) بین مدل‌های منفرد CMIP6. چند مدلی همادی وزنی (WMME) و داده‌های مشاهداتی در ایران برای دوره زمانی ۲۰۱۴-۱۹۹۰.

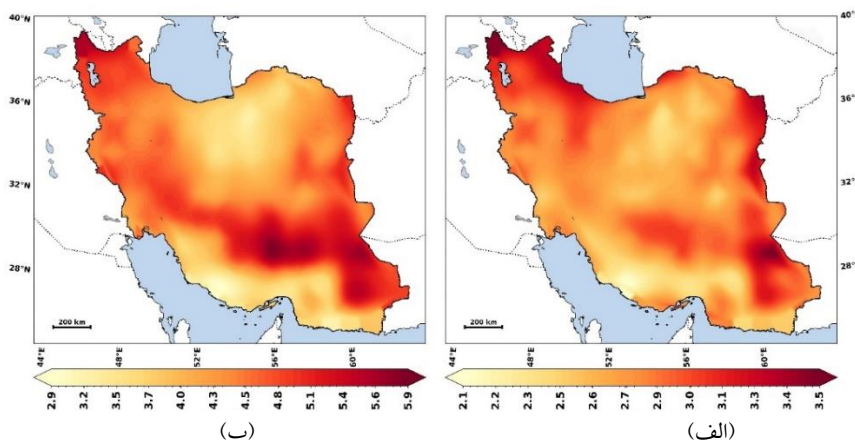
رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک رخ می‌دهد، برای مدت طولانی‌تری پایدار می‌ماند و پتانسیل ایجاد تنش‌های شدیدتر آبی و گرمایی را دارند. پس از این منطقه، نوار غربی و شمال‌غربی کشور بالاترین طول دوره فرین‌های گرم خشک را نشان دادند.

۳-۳. پیش‌نگری رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE) تحت سناریوهای SSP

نتایج حاصل از پیش‌نگری برونداد همادی وزنی چندمدلی (CMIP6-WMME)، افزایش قابل توجه رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE) در ایران را نشان می‌دهد. بررسی بی‌هنجاری برای دو مشخصه کلیدی فراوانی (تعداد رخداد سالانه) و طول دوره (مدت زمان ماندگاری بر حسب روز) نشان‌دهنده یک روند افزایشی معنادار در دوره‌های آینده (آینده نزدیک: ۲۰۵۰-۲۰۲۶، آینده میانی: ۲۰۷۵-۲۰۵۱، و آینده دور: ۲۱۰۰-۲۰۷۶) در مقایسه با دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) است. در دوره تاریخی، در متوسط پهنه‌ای کشور به‌طور میانگین شاهد ۲/۷۸ رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک در سال بوده که هر کدام به‌طور متوسط ۴/۴۰ روز به طول می‌انجامیده است. شایان ذکر است شدت این تغییرات به‌طور مستقیم به سناریو مربوطه بستگی دارد، به‌طوری که سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) پیامدهایی به مراتب شدیدتر از سناریوی حد واسط (SSP2-4.5) را پیش‌نگری کرده است.

۲-۳. پراکنش مکانی رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک طی دوره تاریخی

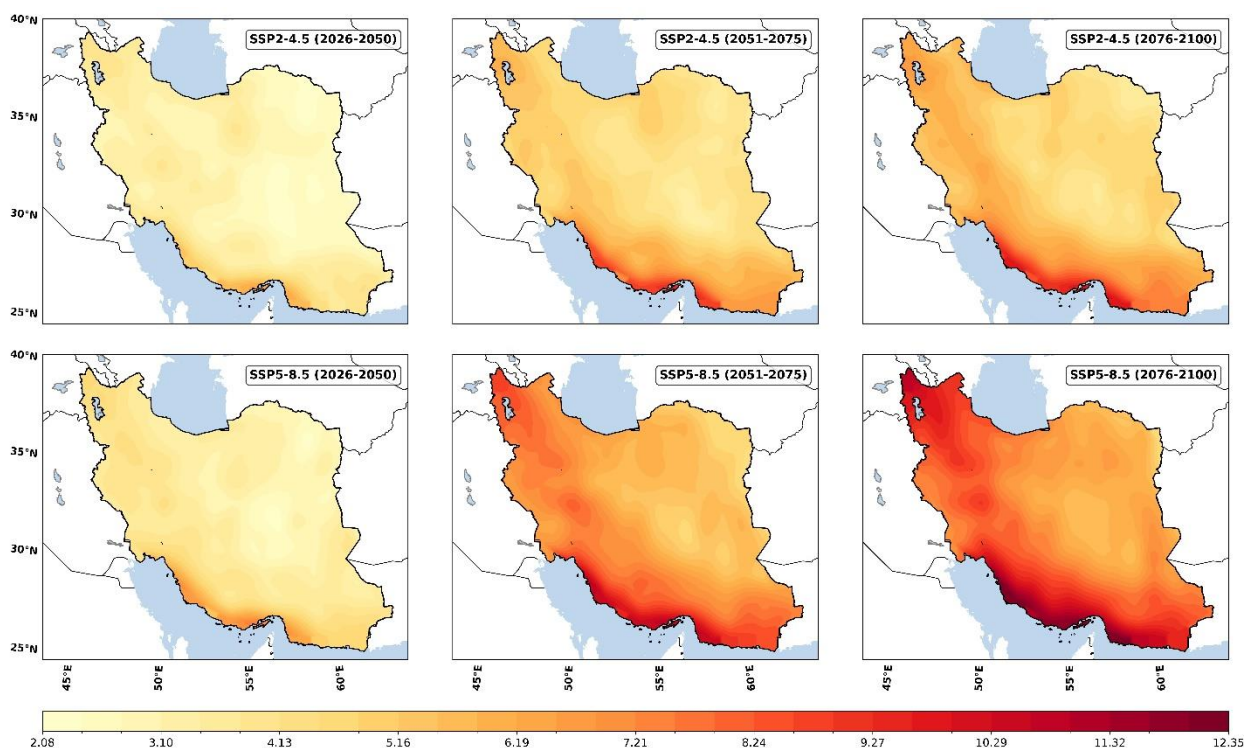
فراوانی رخداد فرین گرم-خشک در ایران از حداقل ۲/۱ روز تا حداکثر ۳/۵ روز در سال در تغییر است. پراکنش مکانی این شاخص، ناهمگنی زیادی را در کشور آشکار می‌سازد. بیشینه فرین‌های ترکیبی گرم-خشک در نوار شرقی ایران از خراسان رضوی تا سیستان و بلوچستان کشیده شده است. این منطقه به‌عنوان کانون اصلی رخداد این پدیده‌ها شناسایی شده است. کانون دوم در مناطق غربی ایران دیده می‌شود که شدت آن نسبت به نوار شرقی کمتر اما همچنان قابل توجه است. پس از این دو منطقه جغرافیایی، مناطق مرکزی و دامنه‌های جنوبی البرز بالاترین رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک را دارند. این الگو نشان می‌دهد که مناطق شرقی و غربی کشور بیشتر در مواجهه با تکرار این شرایط فرین قرار دارند. طول دوره، که اغلب به‌عنوان یک شاخص کلیدی در تعیین ماندگاری اثرات یک رخداد فرین عمل می‌کند، در شکل (۳-ب) نمایش داده شد. تحلیل این مشخصه نشان داد طول دوره فرین‌های ترکیبی گرم-خشک در ایران از حداقل ۲/۹ روز تا ۵/۹ روز در سال متغیر است. الگوی مکانی این شاخص نیز تفاوت‌های منطقه‌ای بارزی را نشان می‌دهد. بیشینه طول دوره فرین گرم-خشک در ایران مرکزی و جنوب‌شرقی کشور دیده می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد اگرچه فراوانی رخدادها در ایران مرکزی به اندازه شرق کشور نیست، اما زمانی که



شکل ۳. پراکنش مکانی رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک طی دوره تاریخی بر اساس برونداد CMIP6-WMME. الف) فراوانی (Frequency) و ب) طول دوره (Duration) طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰). (واحد: الف: رخداد و ب: روز)

برابر با حداکثر طول دوره مشاهده شده در کل دوره تاریخی است. این هم پوشانی نشان می دهد که شدیدترین شرایط گذشته، به یک رخداد عادی در آینده نزدیک تبدیل خواهد شد. طی دوره آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)، این روند تشدید می شود. میانگین فراوانی با افزایشی قابل توجهی نسبت به دوره تاریخی به $7/64$ رخداد در سال می رسد (شکل ۴) و طول دوره متوسط نیز به $17/11$ روز در سال می رسد که تقریباً چهار برابر میانگین تاریخی است (شکل ۵). در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰)، حتی با فرض نسبت انتشار گازهای گلخانه ای در این سناریو، اثرات تجمعی گرمایش جهانی نمایان می شود. میانگین فراوانی رخداد فرین گرم-خشک در متوسط پهنه ای کشور به $8/16$ رخداد در سال (شکل ۴) و میانگین طول دوره به $20/61$ روز می رسد (شکل ۵). این بدان معناست که رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک که در گذشته کمتر از یک هفته طول می کشیدند، در پایان قرن به طور متوسط برای سه هفته متوالی ادامه خواهند یافت.

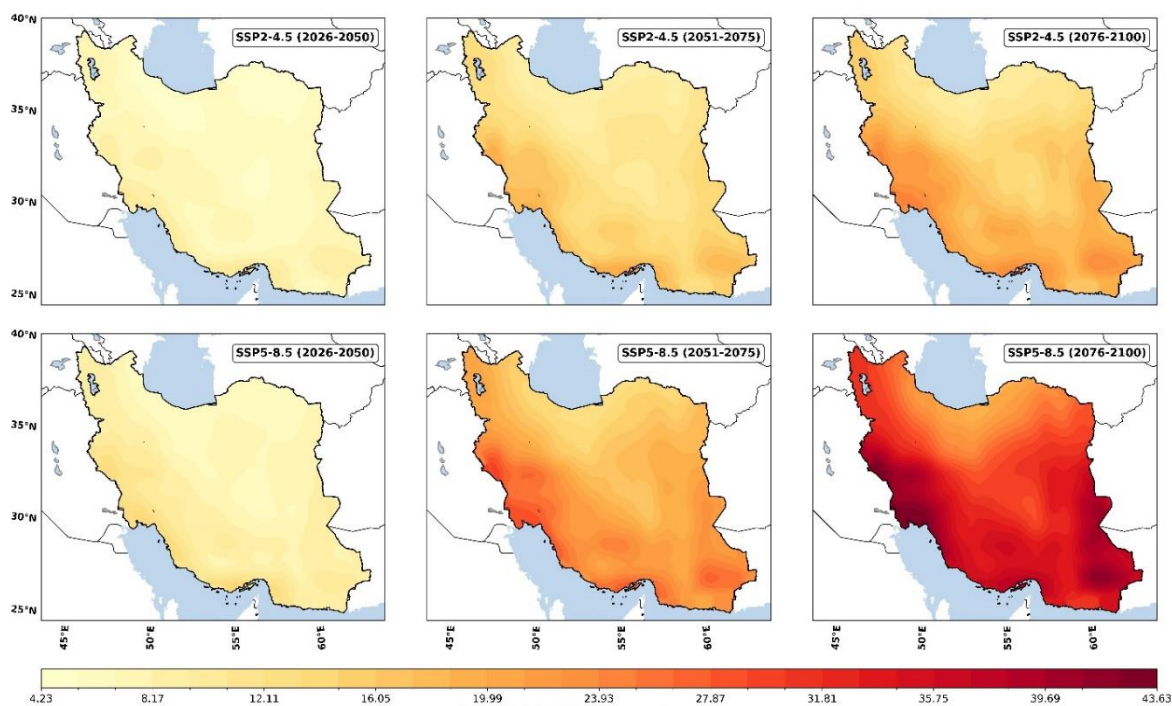
تحت سناریوی SSP2-4.5، که آینده ای با اقدامات کاهش نسبی را شبیه سازی می کند، کشور با روند افزایشی رخدادهای فرین گرم-خشک مواجه است که به طور پیوسته در طول قرن بیست و یکم افزایش خواهد یافت. بررسی ها نشان داد فراوانی رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک در ایران در آینده نزدیک حداقل $2/08$ روز و در آینده دور تحت سناریو SSP5-8.5 افزایش $12/35$ رخدادی را تجربه خواهد کرد (شکل ۴). از نظر منطقه ای سواحل جنوبی ایران، جنوب شرق و شمال غربی کشور بیشترین افزایشی بی هنجاری فراوانی CDHE را در کشور تجربه می کنند. در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، متوسط پهنه ای فراوانی این رخدادهای نسبت به دوره تاریخی، به $5/95$ رخداد در سال می رسد که نشان دهنده دو برابر شدن تعداد رخداد سالانه است (شکل ۴). در همین بازه زمانی، طول متوسط هر رخداد نیز با جهشی قابل توجه به $11/09$ روز می رسد (شکل ۵). نکته حائز اهمیت این است که حداقل طول دوره پیش نگری شده در این دوره، دقیقاً



شکل ۴. پراکنش مکانی فراوانی رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک طی دوره های آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور بر اساس برون داد CMIP6-SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تحت سناریوهای WMME (واحد: رخداد).

فراوانی در متوسط پهنه‌ای کشور به ۹/۴۲ رخداد در سال افزایش می‌یابد (شکل ۴) و میانگین طول دوره با افزایش قابل توجه به ۲۴/۴۲ روز می‌رسد که بیش از ۵/۵ برابر میانگین دوره تاریخی است (شکل ۵). در این دوره، میانه طول دوره (۲۵/۲۱ روز) حتی از میانگین نیز فراتر می‌رود که نشان می‌دهد نیمی از رخدادها بیش از ۲۵ روز به طول خواهند انجامید و حداکثر طول دوره در متوسط پهنه‌ای کشور می‌تواند به ۳۳ روز برسد (شکل ۵). این نتایج بیانگر این واقعیت اقلیمی در ایران است که رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک به یک ویژگی تقریباً دائمی در فصول گرم تبدیل خواهند شد. شاخص CDHE در دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) به اوج خود می‌رسد، به طوری که میانگین فراوانی سالانه به ۱۰/۲۷ رخداد (شکل ۴) و میانگین طول دوره به عدد قابل توجه ۳۶ روز یا بیش از هشت برابر می‌رسد (شکل ۵). این نتایج نشانگر یک تغییر فاز کامل در رژیم اقلیمی کشور و حرکت به سوی شرایط گرم-خشک قابل توجه است.

سناریوی SSP5-8.5، که توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و عدم وجود سیاست‌های اقلیمی را شبیه‌سازی می‌کند، آینده‌ای با تحولات اقلیمی بسیار شدید و شتابان را پیش‌نگری می‌کند. در این سناریو، افزایش فراوانی و طول دوره CDHE نه تنها بیشتر از سناریوی حد واسط است، بلکه با گذشت زمان، شکاف بین این دو سناریو به شکل تصاعدی بیشتر می‌شود. طول دوره CDHE در آینده نزدیک تحت سناریو SSP2-4.5 افزایش ۴/۲۳ روزی را نسبت به دوره تاریخی نشان داده است. این مقدار بی‌هنجاری برای آینده دور تحت سناریو SSP5-8.5 به ۴۳/۶۳ روز می‌رسد. افزایش قابل توجه طول دوره CDHE همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود در مناطق جنوب‌غربی، غربی، جنوب‌شرق و بخش‌های داخلی ایران دیده می‌شود. در دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، میانگین متوسط پهنه‌ای فراوانی به ۶/۴۰ رخداد (شکل ۴) و میانگین طول دوره به ۱۲/۷۰ روز می‌رسد (شکل ۵). افزایش قابل توجه CDHE در دوره آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) رخ می‌دهد. میانگین



شکل ۵. پراکنش مکانی طول دوره رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک طی دوره‌های آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور بر اساس برون‌داد CMIP6- WMME تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5. (واحد: روز)

۳-۴. تغییرات دهه‌ای رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE)

تغییرات دهه‌ای در فراوانی (شکل ۶-الف) و طول دوره (شکل ۶-ب) رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE) تحت سناریوهای مختلف SSP یک روند تشدید شونده را در طول قرن بیست‌ویکم برای کشور نشان می‌دهد. در دوره تاریخی، یک وضعیت نسبتاً پایدار با افزایش نسبی CDHE مشاهده می‌شود. به طوری که میانگین فراوانی سالانه از ۲/۴ رخداد در دهه ۱۹۹۰ به ۳/۶ رخداد در دهه ۲۰۱۰ و میانگین طول دوره از ۳/۸ روز به ۶/۱ روز در همین بازه زمانی افزایش یافته است. با ورود به دوره‌های آینده، یک جهش افزایشی قابل توجه در هر دو شاخص رخ می‌دهد. تحت سناریوی حد واسط (-SSP2) 4.5)، فراوانی رخدادها از ۴/۸ رخداد در سال در دهه ۲۰۲۰ آغاز شده و با یک شیب ثابت به ۸/۵ رخداد در سال برای متوسط پهنه‌ای کشور تا دهه ۲۰۹۰ می‌رسد که نشان‌دهنده بیش از دو برابر شدن تکرار این پدیده نسبت به اواخر دوره تاریخی است. تغییرات شاخص طول دوره تحت همین سناریو چشمگیرتر است. میانگین طول دوره از ۳/۸ روز در دهه ۲۰۲۰، که از پیشینه دوره تاریخی نیز بیشتر است، به طور پیوسته افزایش یافته و به ۲۱/۳ روز در دهه ۲۰۹۰ می‌رسد. این بدان معناست که حتی در یک سناریوی انتشار متوسط، ماندگاری رخداد‌های فرین گرم-خشک بیش از سه برابر خواهد شد. تحت سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) شتاب تغییرات به‌ویژه از اواسط قرن به بعد بسیار شدید است. در این سناریو، فراوانی سالانه از ۴/۵ رخداد در دهه ۲۰۲۰ به مقدار قابل توجه ۱۱/۱ رخداد در دهه ۲۰۹۰ افزایش می‌یابد که به معنای وقوع تقریباً ماهانه این پدیده فرین ترکیبی است. افزایش قابل توجه و چشمگیر در این سناریو مربوط به مشخصه طول دوره است که با رشدی تصاعدی، از ۷/۹ روز در دهه ۲۰۲۰ به ۲۰/۲ روز در دهه ۲۰۵۰، ۳۰/۹ روز در دهه ۲۰۷۰ و در نهایت به مقدار قابل توجه ۳۹/۷ روز در دهه ۲۰۹۰ می‌رسد. این نتایج نشان‌دهنده یک تغییر فاز اساسی در رژیم اقلیمی ایران است

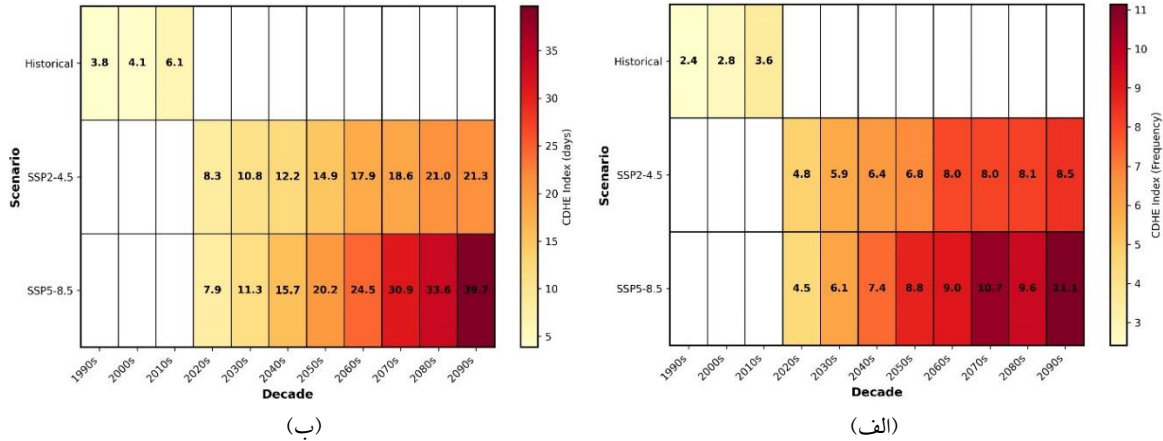
که در آن، رخداد‌های فرین گرم-خشک ترکیبی به شرایطی پایدار و طولانی مدت تبدیل می‌شوند.

۳-۵. سری زمانی سالانه رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE)

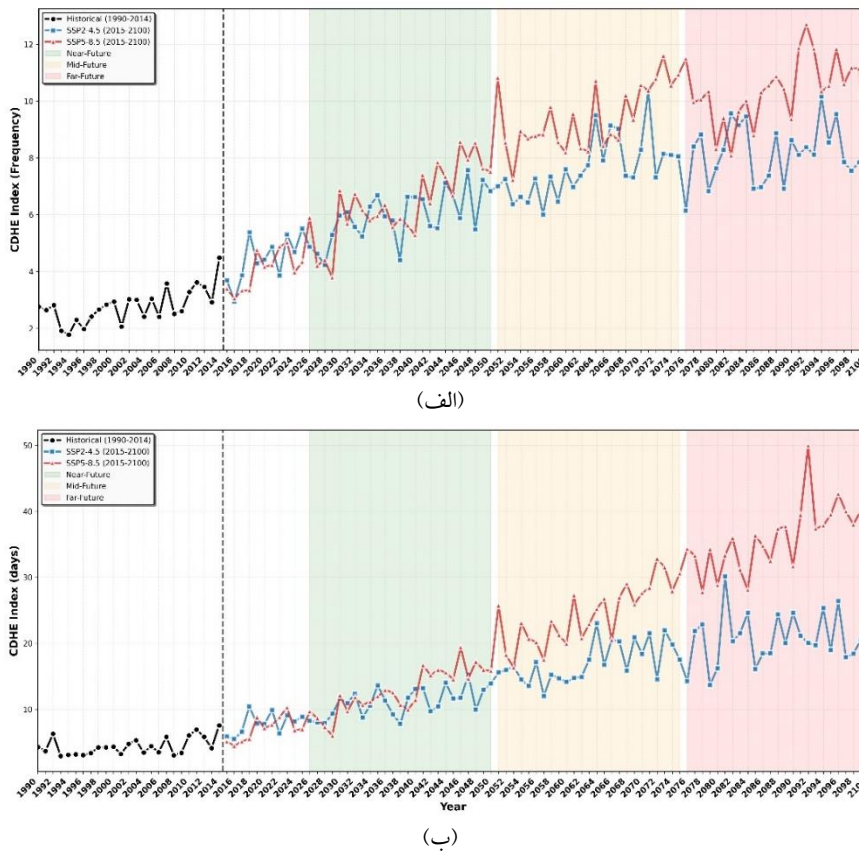
تحلیل سری زمانی سالانه رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE) در متوسط پهنه‌ای کشور از سال ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰، روندی افزایشی و معنادار در هر دو شاخص فراوانی (شکل ۷-الف) و طول دوره (شکل ۷-ب) را نشان می‌دهد که شدت آن به‌طور قابل توجهی در آینده تشدید می‌شود. در دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، با وجود نوسانات بین‌ساله قابل توجه، یک روند افزایشی مثبت و آماری معنادار در هر دو متغیر قابل مشاهده است. فراوانی رخدادها با شیب ۰/۵۳ رخداد/دهه ($R^2 = 0.40$, $p\text{-value} < 0.01$) و طول دوره با شیب روند ۰/۸۶ روز/دهه ($R^2 = 0.22$, $p\text{-value} < 0.05$) در حال افزایش است. با ورود به دوره پیش‌نگری (۲۱۰۰-۲۰۱۵)، افزایش معنی‌دار در مقادیر فراوانی و طول دوره CDHE رخ می‌دهد و روند افزایشی با شتابی به مراتب بیشتر ادامه می‌یابد. تحت سناریوی حد واسط (-SSP2) 4.5)، فراوانی با همان شیب روند دوره تاریخی (۰/۵۳ رخداد/دهه) اما با ضریب تبیین بسیار بالاتر ($R^2 = 0.67$) و معناداری آماری قوی‌تر ($p\text{-value} < 0.0001$) دارای روند افزایشی است. در همین حال، طول دوره با شیب روند بیش از دو برابر دوره تاریخی، معادل ۱/۹ روز/دهه ($R^2 = 0.74$, $p\text{-value} < 0.0001$)، افزایش می‌یابد که به معنای طولانی‌تر شدن رخداد‌های CDHE به مقدار تقریباً ۲ روز در هر دهه است. اما سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) روندی قابل توجه را ارائه داده است. در این سناریو، روند افزایش فراوانی به ۰/۹۱ رخداد/دهه ($R^2 = 0.82$, $p\text{-value} < 0.0001$) می‌رسد که تقریباً دو برابر شیب روند سناریوی SSP2-4.5 است. روند افزایشی قابل توجه مربوط به مشخصه طول دوره CDHE است که با شیب روند فوق‌العاده شدید ۴/۴۳ روز/دهه افزایش می‌یابد. این روند، با ضریب تبیین بسیار بالا ($R^2 = 0.94$),

کم است، پس از آن شکاف بین دو سناریو به‌شکل تصاعدی افزایش یافته و نشان می‌دهد که سناریوهای مختلف با سطح متفاوت انتشار گازهای گلخانه‌ای در بلندمدت به آینده‌های اقلیمی کاملاً متفاوتی برای ایران منجر خواهد شد.

نشان‌دهنده یک رابطه خطی بسیار قوی است که بر اساس آن، طول دوره رخدادها در هر دهه بیش از ۴ روز افزایش خواهد یافت. نکته کلیدی دیگر در این نمودارها، واگرایی فزاینده بین دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با گذر زمان است. در حالی که تا اواسط قرن تفاوت‌ها نسبتاً



شکل ۶. تغییرات دهه‌ای میانگین فراوانی (الف) و طول دوره (ب) رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE) در ایران برای دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و پیش‌نگری آینده تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5.



شکل ۷. سری زمانی سالانه فراوانی (الف) و طول دوره (ب) رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE) برای دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و دوره آینده (۲۰۱۵-۲۱۰۰) تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5. دوره‌های آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور با رنگ‌های سبز، زرد و صورتی مشخص شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در چارچوب گرمایش جهانی، مطالعه رخداد‌های فرین ترکیبی، به‌ویژه فرین‌های ترکیبی گرم-خشک، به‌دلیل اثرات قابل‌توجه بر بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، منابع آب و سلامت عمومی از اهمیت بالایی برخوردار است. همان‌طور که مطالعات جهانی نشان داده‌اند فراوانی و شدت این پدیده‌ها در دهه‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است (وو و همکاران، ۲۰۲۱؛ یو و همکاران، ۲۰۲۴؛ فانگ و همکاران، ۲۰۲۵). این پژوهش با هدف ارزیابی و پیش‌نگری مشخصه‌های رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک (CDHE) در ایران انجام شد. مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق به شرح زیر است.

پراکنش مکانی رخداد‌های فرین گرم-خشک در ایران دارای دو الگوی کلی است. به‌طوری‌که نوار شرقی از خراسان رضوی تا سیستان و بلوچستان و مناطق غربی کشور کانون‌های اصلی فراوانی این پدیده هستند، در حالی که ایران مرکزی و جنوب شرقی با وجود فراوانی کمتر، بیشترین طول دوره و ماندگاری را تجربه می‌کنند که پتانسیل ایجاد تنش‌های شدیدتر آبی و گرمایی را به‌همراه دارد.

مناطق ماندگاری شرق و جنوب شرق ایران که در دوره تاریخی نیز کانون‌های اصلی این رخدادها از نظر فراوانی و طول دوره فرین‌های ترکیبی گرم-خشک بوده‌اند، در آینده با چالش‌های جدی‌تری در زمینه مدیریت منابع آب، امنیت غذایی و سلامت عمومی مواجه خواهند شد. در همین راستا، جنگی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از شاخص گرمای مازاد (EHF) افزایش امواج گرمایی در ایران را گزارش کرده‌اند. آنها نشان دادند که تمامی جنبه‌های موج گرما، از جمله تعداد، فراوانی و مدت تداوم در سراسر کشور دارای روند افزایشی معناداری بوده‌اند. بیشترین تعداد امواج گرما در شرق و جنوب غرب و شدیدترین آنها از نظر دامنه و بزرگی در نواحی شمال غربی و کوهستانی مشاهده می‌شود. به‌طور همزمان و در تأیید این یافته‌ها، پژوهش صفایی و همکاران (۲۰۲۵) با بررسی خشکسالی‌ها با

شاخص SPEI، تشدید شرایط خشکسالی را در ۸۷٪ از مساحت کشور آشکار ساخت. این مطالعه نشان داد که افزایش روندهای دمای بیشینه و کمینه و کاهش همزمان بارش، از محرک‌های اصلی تشدید خشکسالی به‌ویژه در مناطق غربی و شمال غربی کشور بوده است.

طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک از یک روند افزایشی آماری معنادار در فراوانی و طول دوره برخوردار هستند. پیش‌نگری‌ها حاکی از روند معنادار در طول قرن بیست و یکم است. بیشترین افزایش تحت سناریوی SSP5-8.5 رخ داده است. به‌طوری‌که فراوانی سالانه رخداد‌های CDHE بیش از چهار برابر و طول دوره آنها به شکل چشمگیری نزدیک به ده برابر نسبت به دوره تاریخی افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه با یافته‌های جهانی و منطقه‌ای که بر افزایش رخداد همزمان موج گرما و خشکسالی در چارچوب گرمایش جهانی تأکید دارند، همسو است (وو و همکاران، ۲۰۲۱؛ ریدر و همکاران، ۲۰۲۲؛ کریشان و همکاران، ۲۰۲۵). به‌طور خاص، یافته‌های این تحقیق تأییدی بر مطالعات پیشین است که غرب آسیا را به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی افزایش رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک معرفی کرده‌اند (یانگ و ژائو، ۲۰۲۴).

نتایج این تحقیق یک زنگ خطر جدی برای سیاست‌گذاران و مدیران در کشور است. واگرایی تصاعدی و چشمگیر بین سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پس از اواسط قرن، به روشنی نشان می‌دهد که سیاست‌های جهانی و ملی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیری حیاتی بر آینده اقلیمی ایران خواهند داشت. این یافته‌ها ضرورت بازنگری فوری در استراتژی‌های مدیریت منابع آب، تدوین برنامه‌های سازگاری در بخش کشاورزی برای تضمین امنیت غذایی و تقویت زیرساخت‌های بهداشت عمومی برای مقابله با تنش‌های گرمایی را برجسته می‌سازد.

مراجع

- ۳)۴۹، ۷۴۶-۷۲۷.
- زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ع. (۱۴۰۰ الف). پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برونداد همادی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۷(۳)، ۵۶۱-۵۷۸.
- زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ع. (۱۴۰۰ ب). مدیریت ریسک خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم: نقش سیاست‌های ملی و برنامه مدیریت خشکسالی (DMP). *فصلنامه آب و توسعه پایدار*، ۸(۱)، ۱۰۷-۱۱۲.
- Adeyeri, O. E., Zhou, W., Ndehedehe, C. E., & Wang, X. (2024). Global vegetation, moisture, thermal and climate interactions intensify compound extreme events. *Science of the Total Environment*, 912, 169261.
- Alizadeh-Choozari, O., & Najafi, M. S. (2018). Extreme weather events in Iran under a changing climate. *Climate dynamics*, 50(1), 249-260.
- Asadi-RahimBeygi, N., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Near-term temperature extremes in Iran using the decadal climate prediction project (DCPP). *Stochastic environmental research and risk assessment*, 38(2), 447-466.
- Chen, W., Jiang, Z., & Li, L. (2011). Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*, 24(17), 4741-4756.
- Clima, T., & Te, W. (2023). Guidelines on the Definition and Characterization of Extreme Weather and Climate Events. *World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland*.
- Cutter, S. L. (2018). Compound, cascading, or complex disasters: what's in a name?. *Environment: science and policy for sustainable development*, 60(6), 16-25.
- Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., & Liebert, J. H. E. S. S. (2012). HESS Opinions" Should we apply bias correction to global and regional climate model data?". *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3391-3404.
- Fang, P., Wang, T., Yang, D., Tang, L., & Yang, Y. (2025). Substantial increases in compound climate extremes and associated socio-economic exposure across China under future climate change. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 8(1), 17.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp., doi:10.1017/9781009157896.
- Jahanshahi, A., Booij, M. J., Patil, S. D., & Gupta, H. (2024). An ensemble-based projection of future hydro-climatic extremes in Iran. *Journal of Hydrology*, 642, 131892.
- Jangi, M. R., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Intensifying heatwave trends in Iran based on observational data using excess heat factor (EHF). *Natural Hazards*, 120(2), 2073-2090.
- Jiang, Z., Li, W., Xu, J., & Li, L. (2015). Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part I: Model evaluation. *Journal of Climate*, 28(21), 8603-8619.
- Knutti, R., Rugenstein, M. A., & Hegerl, G. C. (2017). Beyond equilibrium climate sensitivity. *Nature Geoscience*, 10(10), 727-736.
- Krishnan, R., Dhara, C., Horinouchi, T., Gotangco Gonzales, C. K., Dimri, A. P., Singh Shrestha, M., Swapna, P., Roxy, M. K., Son, S.-W., Ayantika, D. C., Cruz, F. A. T., & Qiao, F. (2025). Compound weather and climate extremes in the Asian region: science-informed recommendations for policy. *Frontiers in Climate*, 6, 1504475.
- Liu, W., Sun, F., Feng, Y., Li, C., Chen, J., Sang, Y. F., & Zhang, Q. (2021). Increasing population exposure to global warm-season concurrent dry and hot extremes under different warming levels. *Environmental Research Letters*, 16(9), 094002.
- Liu, Z., Jiao, L., & Lian, X. (2025). Changes in compound extreme events and their impacts on cropland productivity in China, 1985-2019. *Earth's Future*, 13(3), e2024EF005038.
- Maraun, D., Shepherd, T. G., Widmann, M.,

- Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J. M., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P. M. M., Hall, A., & Mearns, L. O. (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, 7(11), 764-773.
- Messori, G., Bevacqua, E., Caballero, R., Coumou, D., De Luca, P., Faranda, D., Kornhuber, K., Martius, O., Pons, F., Raymond, C., Ye, K., Yiou, P., & Zscheischler, J. (2021). Compound climate events and extremes in the midlatitudes: Dynamics, simulation, and statistical characterization. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(4), E774-E781.
- Ridder, N. N., Ukkola, A. M., Pitman, A. J., & Perkins-Kirkpatrick, S. E. (2022). Increased occurrence of high impact compound events under climate change. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1), 3.
- Safaei, V., Zarrin, A., Mosaedi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2025). Intensifying droughts and their relationship with temperature and precipitation extremes in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(9), 1-24.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106, 4793-4801.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR)/International Science Council (ISC) (2020). Hazard Definition and Classification Review – Technical Report; UNDRR: Geneva, 2020. <https://www.undrr.org/publication/hazard-definition-and-classification-review-technical-report>.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR)/International Science Council (ISC) (2021). Hazard Information Profiles: Supplement to Hazard Definition and Classification Review – Technical Report; UNDRR: Geneva, 2021. <https://www.undrr.org/publication/hazard-information-profiles-hips>.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464.
- Wu, Y., Miao, C., Sun, Y., AghaKouchak, A., Shen, C., & Fan, X. (2021). Global observations and CMIP6 simulations of compound extremes of monthly temperature and precipitation. *GeoHealth*, 5(5), e2021GH000390.
- Yang, Y., & Tang, J. (2023). Substantial differences in compound long-duration dry and hot events over China between transient and stabilized warmer worlds at 1.5° C global warming. *Earth's Future*, 11(3), e2022EF002994.
- Yang, Y., & Zhao, N. (2024). Future projections of compound temperature and precipitation extremes and corresponding population exposure over global land. *Global and Planetary Change*, 236, 104427.
- Yu, H., Lu, N., Fu, B., Zhang, L., Wang, M., & Tian, H. (2022). Hotspots, co-occurrence, and shifts of compound and cascading extreme climate events in Eurasian drylands. *Environment International*, 169, 107509.
- Yu, R., Dong, S., Han, Z., & Li, W. (2024). Increased exposure of rice to compound drought and hot extreme events during its growing seasons in China. *Ecological Indicators*, 167, 112735.
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2022). Future changes in precipitation extremes over Iran: Insight from a CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Pure and Applied Geophysics*, 179(1), 441-464.
- Zhang, L., Yuan, F., & He, X. (2024). Probabilistic assessment of global drought recovery and its response to precipitation changes. *Geophysical Research Letters*, 51(1), e2023GL106067.
- Zhang, W., Luo, M., Gao, S., Chen, W., Hari, V., & Khouakhi, A. (2021). Compound hydrometeorological extremes: Drivers, mechanisms and methods. *Frontiers in Earth Science*, 9, 673495.