



Research Article

Spatiotemporal analysis of compound hot-dry extremes in Iran using the standardized compound event indicator (SCEI)

Abbasali Dadashi-Roudbari*

Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 14 Feb 2026 Accepted: 10 Jun 2026

Extended Abstract

Introduction

Anthropogenic climate change stands as one of the most formidable challenges facing contemporary civilization. While climatological research has traditionally prioritized the isolation of individual variables such as temperature or precipitation and their associated extremes (e.g., heatwaves or meteorological droughts), a growing body of scientific evidence suggests that the concurrent or sequential convergence of these hazards yields consequences far more devastating than the sum of their independent effects. Termed compound extremes, these phenomena emerge from intricate interactions between atmospheric physics and land-surface processes. Compound extremes are inherently multidimensional, arising from the interplay of several contributing variables; consequently, accurately characterizing these events necessitates an investigation into the joint and simultaneous behavior of the underlying factors. To illustrate, a compound hot-dry event is typically defined by the coincidence of distinct precipitation deficits alongside positive temperature anomalies or heatwaves. Of particular concern are compound hot-dry events, characterized by the coincidence of elevated temperatures and significant precipitation deficits, typically demarcated by the 80th and 20th percentiles, respectively. These combined extremes possess a potent capacity to amplify environmental stress through positive feedback loops linking soil moisture and air temperature. Under drought-induced moisture deficits, a substantial fraction of incoming solar radiation rather than being dissipated through evapotranspiration is converted into sensible heat. This thermodynamic shift elevates surface temperatures and significantly intensifies heatwave dynamics. Recent global assessments indicate a rising trend in the frequency, intensity, and spatial extent of these compound extremes, particularly within arid and semi-arid zones. Accurately characterizing these events, however, necessitates the deployment of multivariate indices; conventional metrics focusing on singular climatic aspects fail to capture the synergistic nature of coupled hazards. Iran, with its vast climatic diversity and location within the global arid and semi-arid belt, is profoundly vulnerable to climate variability. In recent decades, severe precipitation fluctuations coupled with a prevalent warming trajectory have established ideal conditions for the genesis of compound hot-dry extremes. Such occurrences pose existential threats to the nation's food security, water resources, public health, and biodiversity. Despite the critical implications, few inquiries in Iran have adopted a comprehensive approach using standardized compound metrics to analyze these coupled phenomena. To bridge this knowledge gap, the present study utilizes data from synoptic weather stations and the Standardized Compound Event Indicator (SCEI) to rigorously evaluate the spatiotemporal patterns of compound hot-dry events over the 1991–2020 period.

Citation: Dadashi-Roudbari, A.A., 2026. Spatiotemporal analysis of compound hot-dry extremes in Iran using, *Res. Earth. Sci.* 17(2), (1-17) DOI: 10.48308/esrj.2026.107326

* Corresponding author E-mail address: a-dadashi@um.ac.ir



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Materials and Methods

In pursuit of a rigorous spatiotemporal characterization of compound extreme events across Iran, we curated a dataset comprising daily temperature and precipitation records from 95 synoptic stations, selected for their optimal spatial representativeness. Despite Iran's vast territory, its meteorological station lacks adequate coverage in key desert and mountainous regions. Nevertheless, the aim of this study is to analyze the data recorded by these existing stations to characterize the climatology and trends of compound hot-dry extremes over the last three decades. The study spans a 30-year climatological from 1991 to 2020. To ensure data integrity, the raw time series underwent comprehensive quality control and homogeneity testing prior to any statistical application. For the detection of compound warm-dry episodes, the 20th and 80th percentiles were established as critical thresholds; consequently, a compound event was defined by the concurrent incidence of heat and dry spells within a single calendar month. The methodological cornerstone of this study is the computation of the Standardized Compound Event Index (SCEI). This dimensionless metric is engineered to synthesize the joint anomalies of precipitation and temperature into a unified probabilistic framework. Within this scale, negative values quantify the intensity of warm-dry conditions exceeding the norm, whereas positive values denote the absence of such compound extremes. Based on standard statistical thresholds, the severity of these events was stratified into five distinct intensity classes: CE0 (abnormal), CE1 (moderate), CE2 (severe), CE3 (extreme), and CE4 (exceptional compound warm-dry events). Beyond the derivation of the index, we assessed the statistical significance of temporal trajectories over the past three decades utilizing the Modified Mann-Kendall test alongside Sen's Slope estimator.

Results and Discussion

A concurrent analysis of temperature, precipitation, and the Compound Extreme Index reveals that the spatial distribution of hot-dry extremes across Iran is strictly modulated by the region's topographical configuration. Specifically, the Alborz and Zagros mountain ranges act as orographic barriers, effectively blocking the intrusion of moist air masses from the west and north into the central plateau. These topographical shielding fosters arid and semi-arid climates characterized by intense thermal fluctuations within the interior basins. Consequently, the escalating trajectory of compound hazards observed in central and southern regions is not merely a function of global climate shifts; rather, it emerges from the complex interplay between local physiography and synoptic-scale atmospheric patterns. Dissecting the physical mechanisms governing these trends suggests that the observed variability is the product of intricate coupling between thermodynamic and dynamic variables. Notably, the asymmetric warming pattern where minimum temperatures rise more rapidly than maximums has curtailed the frequency of nocturnal frosts and extended the growing season. This shift inevitably amplifies evaporative demand and accelerates soil moisture depletion, creating a feedback loop that intensifies aridity. Statistical inquiries into the data elucidate a significant upward trend in the frequency of compound hot-dry extremes across the majority of the country. Processing data from 95 synoptic observation stations uncovers substantial heterogeneity in the spatial distribution of these events. Modified Mann-Kendall tests indicate that 80.20% of the studied stations exhibit an increasing trend, with 26% of these shifts proving statistically significant at the 95% confidence level ($p < 0.05$). Conversely, a mere 14.58% of stations displayed a decreasing tendency, none of which reached statistical significance at the 5% or 1% levels. These findings corroborate global studies reporting a surge in compound extreme events across mid-latitudes and arid zones. However, spatial analysis highlights a marked disparity in event distribution: regions within the Central Plateau, as well as Eastern and Southeastern Iran areas inherently predisposed to arid and desert climates have experienced the most pronounced escalation in compound hot-dry occurrences. In these locales, the strong negative covariance between temperature and precipitation (implying that heatwaves are predominantly dry) enhances the sensitivity of the SCEI (Standardized Compound Extreme Indicator) to anomalies. In contrast, while the Zagros and Alborz mountainous zones and the northern coastal strip generally follow an increasing trend, their patterns of compound extreme occurrences exhibit far greater complexity. An examination of the SCEI frequency distribution across its five classification tiers reveals a significant inverse relationship between event intensity and spatial extent. The frequency percentage of SCEI classes over the 30-year study period indicates that the Moderate (10.4%) and Abnormal (6.73%) classes collectively account for over 17% of all recorded hot-dry extremes. This implies that for nearly one-fifth of the temporal scope, Iran's climate possessed a high predisposition for simultaneous positive

thermal anomalies and negative precipitation deviations. At the other end of the spectrum, the Severe, Extreme, and Exceptional classes comprise 3.1%, 2.52%, and 1.24% of occurrences, respectively. Although the cumulative frequency of these three high-intensity tiers is less than 7%, the statistical rarity of such tail-end events must not be conflated with negligible impact; their potential for catastrophic disruption remains disproportionately high.

Conclusion

Utilizing the multivariate Standardized Compound Event Indicator (SCEI) on a 30-year dataset from synoptic meteorological stations, this study reveals that Iran is undergoing a climate transition towards a regime where extreme events manifest not as isolated incidents, but as combined phenomena with escalating intensity. The significant upward trend in these occurrences serves as a stark warning to policymakers and natural resource managers. By integrating the interplay between temperature and precipitation, the SCEI provides a potent tool for the early and precise detection of environmental stresses. The geographical footprint of these compound extremes is expanding, encroaching upon higher latitudes and the mountainous regions of the northwest. This development signals a fundamental shift in the climate patterns. Our findings demonstrate that compound extreme events are no longer transient, random fluctuations; they have consolidated into a structural and recurrent feature of Iran's climate. To illustrate, severe to exceptional hot-dry compound events now account for approximately 7% of all recorded occurrences nationwide a critical alert for water resource and agricultural management. This evolving reality suggests that current crisis management strategies, which are predicated on the probability of univariate events, may lack the efficacy to counteract the intensity and persistence of compound phenomena. This vulnerability is particularly acute in regions where the SCEI has registered markedly negative values (classes CE3 and CE4), as the resilience of both ecological and human systems to these compound pressures has been severely compromised. Ultimately, our trend analysis corroborates this shift: while a mere 15% of stations exhibited a decreasing trend none of which were statistically significant a substantial 26% experienced a significant escalation in compound extreme events. Consequently, it is recommended that future research prioritize the dynamical modeling of interactions between atmospheric circulation patterns and Iran's complex topography. A parallel focus should be on assessing the influence of climate change on the future intensity and frequency of these phenomena. Such efforts are indispensable for formulating more precise adaptation strategies tailored to the nation's most vulnerable regions. This study furnishes policymakers and stakeholders with the essential insights needed to devise robust strategies for adapting to and mitigating the destructive consequences of compounded water and heat stress.

Keywords: Compound Extreme Events, Dry-Hot, Iran, Standardized Compound Event Indicator (SCEI).

تحلیل فضایی-زمانی فرین‌های ترکیبی گرم-خشک در ایران با استفاده از شاخص استاندارد شده رخداد ترکیبی (SCEI)

عباسعلی داداشی رودباری * 

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

چکیده گسترده

مقدمه

در عصر حاضر، تغییر اقلیم ناشی از فعالیت‌های انسانی به عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های پیش روی جوامع بشری شناخته می‌شود. اگرچه به طور سنتی تمرکز مطالعات اقلیمی بر روی تحلیل متغیرهای منفرد نظیر دما یا بارش و رخداد‌های فرین مرتبط با آن‌ها مانند امواج گرمایی یا خشکسالی‌های هواشناسی بوده است، اما شواهد فزاینده علمی نشان می‌دهد که ترکیب همزمان یا متوالی این مخاطرات می‌تواند پیامدهایی به مراتب ویرانگرتر از مجموع اثرات منفرد آن‌ها به شکل مستقل داشته باشد. این پدیده‌ها تحت عنوان فرین‌های ترکیبی شناخته می‌شوند که ناشی از برهمکنش پیچیده میان فرآیندهای فیزیکی جو و سطح زمین هستند. رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک که حاصل هم‌رخدادی دمای بالا و بارش بسیار پایین هستند که معمولاً با صدک ۸۰ و ۲۰ مشخص می‌شوند. رخداد‌های فرین ترکیبی به دلیل سازوکارهای بازخوردی مثبت میان رطوبت خاک و دمای هوا، پتانسیل بالایی برای تشدید تنش‌های محیطی دارند. در شرایط کمبود رطوبت خاک ناشی از خشکسالی، کسر بزرگی از انرژی تابشی خورشید به جای صرف شدن در فرآیند تبخیر-تعرق، به گرمای محسوس تبدیل شده و موجب افزایش دمای سطحی و تقویت امواج گرمایی می‌گردد. مطالعات جهانی اخیر نشان داده‌اند که فراوانی، شدت و گستره مکانی این رخداد‌های فرین ترکیبی در بسیاری از مناطق جهان، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، روندی افزایشی داشته است. با این حال، ارزیابی دقیق این پدیده‌ها نیازمند به کارگیری شاخص‌های ترکیبی است، یعنی شاخص‌هایی که صرفاً یک متغیر را بررسی نکنند. شاخص‌های متداول پیشین که تنها بر یک جنبه از اقلیم تمرکز داشتند، قادر به بازتاب ماهیت توأمان و هم‌افزایی این مخاطرات نیستند. ایران با قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی و دارا بودن تنوع اقلیمی بالا، یکی از مناطق بسیار آسیب‌پذیر در برابر تغییر اقلیم محسوب می‌شود. نوسانات شدید بارش و روند افزایشی دما در دهه‌های اخیر، بستر مناسبی را برای شکل‌گیری رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک فراهم کرده است. رخداد چنین پدیده‌هایی می‌تواند تهدیدی جدی برای امنیت غذایی، منابع آب، سلامت عمومی و تنوع زیستی کشور باشد. با وجود اهمیت حیاتی این موضوع، مطالعه‌ای در ایران که با رویکردی جامع و با استفاده از شاخص‌های ترکیبی استاندارد شده به واکاوی دقیق این پدیده‌ها پرداخته باشد، انجام نشده است.

استناد: داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۵. تحلیل فضایی-زمانی فرین‌های ترکیبی گرم-خشک در ایران، پژوهشهای دانش زمین: ۱۷(۲)،

DOI: 10.48308/esrj.2026.107326، (۱-۱۷)

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

* نویسنده مسئول:



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلاء علمی، به دنبال آن است تا با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید و شاخص رخداد ترکیبی استاندارد شده (SCEI)، الگوی مکانی و زمانی رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک را در دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ مورد ارزیابی قرار دهد.

مواد و روش‌ها

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش و واکاوی دقیق رخداد‌های فرین ترکیبی در ایران، داده‌های اقلیمی شامل دما و بارش روزانه از ۹۵ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک که دارای پراکنش مناسب مکانی در سطح کشور بودند، اخذ گردید. بازه زمانی مورد مطالعه، دوره ۳۰ ساله از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ میلادی انتخاب شد. پیش از انجام هرگونه تحلیل آماری، داده‌های خام تحت آزمون‌های کنترل کیفی قرار گرفتند تا از درستی و همگنی سری‌های زمانی اطمینان حاصل شود. در این پژوهش، به منظور آشکارسازی رخداد‌های ترکیبی گرم-خشک صدک‌های ۲۰ و ۸۰ به عنوان آستانه در نظر گرفته شدند. در نهایت، زمانی که هر دو رخداد خشکی و گرما در یک ماه واحد رخ دادند، به عنوان یک رخداد ترکیبی تعریف شد. تمرکز اصلی روش‌شناسی این پژوهش، محاسبه شاخص رخداد ترکیبی استاندارد شده (SCEI) است. این شاخص به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند وضعیت مشترک بی‌هنجاری‌های بارش و دما را ترکیب نماید. شاخص SCEI بدست آمده، معیاری بدون بُعد است که مقادیر منفی آن نشان‌دهنده شرایط فرین ترکیبی گرم-خشک شدیدتر از نرمال و مقادیر مثبت بیانگر شرایط عدم رخداد فرین ترکیبی است. طبقه‌بندی شدت رخدادها بر اساس آستانه‌های استاندارد آماری انجام شد. شاخص SCEI به پنج طبقه تقسیم می‌شود. این طبقات شامل CE0 برای رخداد ترکیبی گرم-خشک غیر عادی، CE1 رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک متوسط، CE2 رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک شدید، CE3 رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک فرین، CE4 رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک استثنایی می‌باشند. علاوه بر محاسبه شاخص، تحلیل روند تغییرات زمانی با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال تصحیح شده و برآوردگر شیب سن انجام شد تا معناداری آماری تغییرات در طول سه دهه اخیر سنجیده شود.

نتایج و بحث

تحلیل همزمان نقشه‌های دما، بارش و شاخص فرین ترکیبی نشان می‌دهد که توزیع فضایی فرین‌های گرم-خشک در ایران تابعیت شدیدی از الگوی توپوگرافی دارد؛ به‌طوری که رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس با جلوگیری از نفوذ توده‌های هوای مرطوب غربی و شمالی به فلات مرکزی، موجب شکل‌گیری اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک با نوسانات شدید دمایی در بخش‌های داخلی شده‌اند. بنابراین، روند افزایشی مخاطرات ترکیبی در نواحی مرکزی و جنوبی، نه تنها تابعی از تغییرات جهانی، بلکه حاصل برهم‌کنش ویژگی‌های جغرافیایی محلی با الگوهای بزرگ مقیاس جوی است. تحلیل سازوکارهای فیزیکی حاکم بر این روندها نشان می‌دهد که تغییرات مشاهده شده محصول برهم‌کنش پیچیده میان متغیرهای ترمودینامیکی و دینامیکی است. افزایش دماهای کمینه با سرعتی بیش از دماهای بیشینه، موجب کاهش رخداد یخبندان‌های شبانه و طولانی‌تر شدن فصل رشد شده که خود منجر به افزایش نیاز آبی گیاهان و تخلیه رطوبت خاک می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که فراوانی فرین‌های ترکیبی گرم-خشک در اکثر مناطق کشور روندی افزایشی و معنادار داشته است. پردازش‌های آماری بر روی داده‌های ۹۵ ایستگاه همدید، ناهمگونی قابل‌توجهی را در توزیع فراوانی رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک آشکار می‌سازد. آزمون‌های آماری من-کندال تصحیح شده نشان می‌دهند که ۸۰/۲۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی هستند. که از این تعداد، ۲۶ درصد با سطح اطمینان ۵ درصد ($p < 0.05$) این تغییرات افزایشی را تجربه کرده‌اند. در نقطه مقابل، تنها ۱۴/۵۸ درصد از ایستگاه‌ها روند کاهشی از خود نشان داده که همگی فاقد روند آماری مشخص در سطوح ۵ و ۱ درصد بوده‌اند. این یافته همسو با نتایج مطالعات جهانی است که افزایش رخداد‌های فرین ترکیبی را در عرض‌های جغرافیایی میانی و مناطق خشک گزارش کرده‌اند. بررسی‌های مکانی نشان‌دهنده ناهمگونی قابل توجهی در توزیع این رخدادها در سطح کشور است. مناطق واقع در فلات مرکزی، شرق و جنوب شرق ایران که ذاتاً دارای اقلیم خشک و بیابانی هستند، بیشترین افزایش را در رخداد‌های فرین‌های ترکیبی گرم-خشک تجربه کرده‌اند. در این مناطق، همبستگی منفی قوی میان دما و بارش (به معنای آنکه روزهای گرم معمولاً با عدم بارش همراه‌اند) باعث شده است که شاخص SCEI با حساسیت بیشتری بی‌هنجاری‌ها را شناسایی کند. در مقابل، در نواحی کوهستانی زاگرس و البرز و همچنین سواحل شمالی کشور، اگرچه روند کلی افزایشی بوده است، اما الگوهای

رخدادهای فرین ترکیبی پیچیدگی بیشتری دارند. تحلیل توزیع فراوانی شاخص SCEI در طبقات پنج‌گانه، بیانگر یک رابطه معکوس معنادار میان شدت رخداد و گستردگی آن است. درصد فراوانی طبقات شاخص SCEI در دوره ۳۰ ساله مورد مطالعه نشان می‌دهد طبقه متوسط با ۱۰/۴ درصد و طبقه غیرعادی با ۶/۷۳ درصد از کل مشاهدات، در مجموع بیش از ۱۷ درصد از فرین‌های ترکیبی گرم-خشک را دوره آماری به خود اختصاص داده‌اند. این یافته بیانگر آن است که نزدیک به یک‌پنجم از سال‌های مورد مطالعه، اقلیم ایران پتانسیل بالایی برای هم‌زمانی بی‌هنجاری مثبت دمایی و بی‌هنجاری منفی بارش داشته است. در سوی دیگر طیف آماری، طبقه شدید تنها ۳/۱ درصد، طبقه فرین ۲/۵۲ درصد و طبقه استثنایی ۱/۲۴ درصد از رخدادهای تشکیل می‌دهند. اگرچه مجموع فراوانی این سه طبقه کمتر از ۷ درصد است، اما نادر بودن این رخدادهای نباید به معنای کم‌اهمیت بودن آن‌ها تفسیر شود.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با بکارگیری شاخص چندمتغیره SCEI بر روی داده‌های ۳۰ ساله ایستگاه‌های هواشناسی همدید نشان داد که ایران در حال تجربه گذار به اقلیمی است که در آن رخدادهای فرین نه به صورت منفرد، بلکه به صورت ترکیبی و با شدتی فزاینده رخ می‌دهند. روند افزایشی معنادار این رخدادهای هشدار جدی برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی است. شاخص SCEI با لحاظ کردن برهمکنش میان دما و بارش، ابزاری قدرتمند برای شناسایی زود هنگام و دقیق‌تر تنش‌های محیطی فراهم می‌آورد. قلمرو فرین‌های ترکیبی به عرض‌های جغرافیایی بالاتر و نواحی کوهستانی شمال غرب در حال گسترش است. روند افزایشی معنی‌دار در ۸۰/۲۰ درصد از ایستگاه‌های کشور نشان دهنده تغییر در الگوهای اقلیمی کشور است. نتایج نشان داد که رخدادهای فرین ترکیبی به عنوان نوسانات تصادفی و گذرا نیستند، بلکه به ویژگی ساختاری و تکرارپذیر اقلیم ایران تبدیل شده‌اند. به طوری که رخدادهای شدید تا استثنایی فرین ترکیبی گرم-خشک حدود ۷ درصد از کل رخدادهای کشور را در بر می‌گیرند و یک هشدار جدی برای مدیریت منابع آب و کشاورزی است. این وضعیت بیانگر آن است که استراتژی‌های مدیریت بحران فعلی که بر اساس احتمال وقوع رخدادهای تک‌متغیره تدوین شده‌اند، ممکن است در برابر شدت و تداوم رخدادهای ترکیبی کارایی لازم را نداشته باشند. به‌ویژه در مناطقی که شاخص SCEI مقادیر منفی قابل توجهی (طبقات CE3 و CE4) را ثبت کرده است، تاب‌آوری سیستم‌های اکولوژیک و انسانی در برابر فرین‌های ترکیبی به شدت کاهش یافته است. در نهایت، تحلیل روند آماری نشان داد که تنها نزدیک به ۱۵ درصد ایستگاه‌ها روند کاهشی داشته‌اند که هیچ‌یک از آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبوده‌اند، در حالی که ۲۶ درصد از ایستگاه‌ها افزایش معنی‌داری را در رخدادهای فرین ترکیبی تجربه کرده‌اند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی بر مدل‌سازی دینامیکی برهم‌کنش الگوهای گردش جوی با توپوگرافی پیچیده ایران و همچنین ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی این پدیده‌ها در افق‌های زمانی آینده متمرکز گردند تا بتوان راهکارهای سازگاری دقیق‌تری را برای مناطق آسیب‌پذیر تدوین نمود. به طور کلی نتایج این مطالعه بینش‌های ضروری را جهت تدوین راهبردهای سازگاری و تعدیل پیامدهای مخرب ناشی از تنش‌های آبی و گرمایی در اختیار سیاست‌گذاران و ذی‌نفعان قرار می‌دهد.

واژگان کلیدی: ایران، رخدادهای فرین ترکیبی، شاخص رخداد ترکیبی استاندارد شده (SCEI)، گرم-خشک.

مقدمه

رخدادهای اقلیمی فرین به ویژه زمانی که به شکل ترکیبی ظاهر می‌شوند، چالش‌های پیچیده‌ای را برای پایداری اکوسیستم‌ها ایجاد می‌کنند. رخدادهای فرین عموماً بر مبنای رطوبت جو به دو دسته رخدادهای ترکیبی گرم-خشک^۱ (CDHEs) و گرم-مرطوب^۲ (CHHEs) تفکیک می‌شوند، باید توجه داشت اگرچه این رخدادهای ماهیت فرین خود مشترک هستند، اما پیامدهای اکولوژیکی آن‌ها

به شدت وابسته به الگوهای زمانی-فضایی متفاوت است (Buzan and Huber, 2020; Fan et al, 2024). هم‌زمانی رخدادهای فرین ترکیبی، نظیر گرما و خشکسالی، می‌تواند اختلالات فیزیولوژیکی و ساختاری گسترده‌تری نسبت به رخداد منفرد ایجاد کند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، هم‌رخدادی این شرایط احتمال افت عملکرد اکوسیستم را در مقایسه با فرین‌های منفرد به شکل معناداری افزایش می‌دهد (Zhu et al, 2021). اثرات فرین‌های ترکیبی نه تنها

بلادرنگ، بلکه با تأخیر زمانی و به شکل تغییر در توازن آب و انرژی نمایان می‌شود (Dong et al, 2025). این پاسخ‌های تأخیری بسته به نوع اکوسیستم و اقلیم متفاوت بوده و نیازمند بررسی‌های جامع در مقیاس‌های زمانی و مکانی گوناگون است (Liu et al, 2025). رخداد فرین ترکیبی گرم- خشک به وقوع هم‌زمان کاهش بارش و افزایش دمای هوا گفته می‌شود که پیامدهای زیان‌باری بر اکولوژی، کشاورزی و مؤلفه‌های اجتماعی- اقتصادی تحمیل می‌کند (Feng et al, 2025). ایران به دلیل شرایط جغرافیایی خود، در کانون آسیب‌پذیری رخدادهای فرین ترکیبی قرار دارد. تجربه سال ۱۴۰۴ نمونه‌ای روشن از این واقعیت است. در این سال تلاقی موج‌های گرمایی با خشکسالی‌های گسترده در کشور، منجر به تشدید تنش‌های محیطی و افت قابل توجه تولیدات کشاورزی شد. این رخداد ترکیبی به روشنی نشان داد که تحلیل ریسک‌های اقلیمی در ایران بدون در نظر گرفتن ماهیت هم‌افزایی فرین‌های گرم- خشک، ناکافی خواهد بود. بنابراین، شناسایی و پایش دقیق این مخاطرات ترکیبی برای تدوین استراتژی‌های سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. فرین ترکیبی شامل چندین متغیر تأثیرگذار است؛ بنابراین توصیف ویژگی‌های آن نیازمند بررسی رفتار مشترک و توأمان این متغیرهاست. برای مثال، یک رخداد گرم- خشک معمولاً با کسری بارش و بی‌هنجاری مثبت دما یا موج گرما مشخص می‌شود. رفتار مشترک آن را می‌توان با استفاده از یک توزیع دومتغیره از خشکسالی و گرما (یا بارش و دما) مدل‌سازی کرد (AghaKouchak et al, 2014; Hao et al, 2019). زایشلر و سنویراتنه (Zscheischler and Seneviratne, 2017) با بهره‌گیری از رویکرد مبتنی بر تابع مفصل^۲، به تبیین رخداد پدیده‌های ترکیبی گرم- خشک در مقیاس جهانی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد رخداد هم‌زمان این پدیده‌ها عمده‌تأ ناشی از وجود همبستگی منفی میان متغیرهای بارش و دما در طول فصل تابستان است. همسو با این مطالعات، در سال‌های اخیر توسعه شاخص‌های نوین جهت کمی‌سازی و توصیف رخدادهای فرین ترکیبی مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان نمونه، هائو و همکاران (Hao et al, 2018) نشان دادند که در پدیده‌های ترکیبی با بارش کم، رطوبت خاک پایین و دمای بالا، می‌توان از احتمال مشترک این متغیرها به عنوان معیاری برای

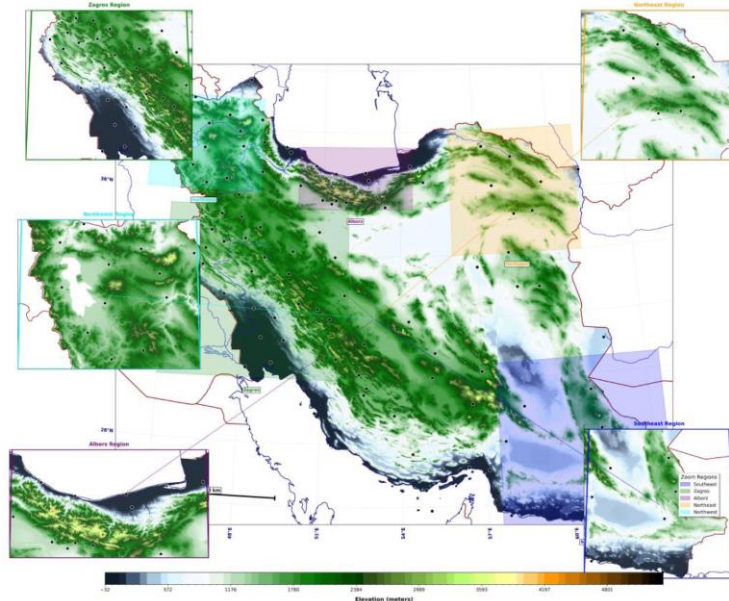
سنجش شدت رخداد استفاده نمود. در راستای کمی‌سازی فرین‌های ترکیبی گرم- خشک، شاخص‌های کارآمدی همچون شاخص استاندارد رخدادهای ترکیبی^۴ (SCEI) (Hao et al, 2019) و شاخص استاندارد گرم-خشک^۵ (SDHI) (Hao et al, 2018) معرفی شده‌اند که از نظر آماری، رخداد این پدیده‌ها را بر اساس رخداد هم‌زمان متغیر بارش (X) کمتر یا مساوی آستانه معین (x) و متغیر دما (Y) فراتر از آستانه (y) تبیین می‌کنند. در پژوهش حاضر، شاخص SCEI به دلیل مزیت‌های ساختاری و نظری بهتر نسبت به سایر روش‌ها، به عنوان مبنای این تحقیق انتخاب شده است. این شاخص با بهره‌گیری از توابع کاپولا، قابلیت مدل‌سازی دقیق توزیع احتمالاتی مشترک و وابستگی‌های غیرخطی میان متغیرهای دما و بارش را فراهم آورده و ضمن ارائه مقادیر استاندارد جهت مقایسه‌پذیری در اقلیم‌های مختلف و بازه‌های زمانی متفاوت، از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است. تحقیقات بر روی رخدادهای فرین ترکیبی، به ویژه فرین‌های گرم- خشک، در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. مطالعاتی همچون وو و همکاران (Wu et al, 2020) با تحلیل داده‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۱، تشدید فراوانی، شدت و گستره CDHEs را در مناطق وسیعی مانند آمریکای شمالی و اروپای مرکزی گزارش کردند و شاخص‌هایی همچون SCEI و BDHI^۶ را برای برآورد دقیق‌تر فرین‌های ترکیبی معرفی نمودند. در سطح منطقه‌ای نیز تحقیقاتی مانند کومار و گوپال (Kumar and Goyal, 2024) در هند روند منفی SCEI (مقدار منفی در شاخص SCEI به منزله افزایش رخدادهای فرین ترکیبی گرم- خشک است) را در دوره‌های تاریخی و آینده تحت سناریو RCP8.5 نشان دادند. در همین راستا یین و همکاران (Yin et al, 2025) با توسعه ابزار CETD، چارچوبی برای تشخیص رخدادهای فرین ترکیبی ارائه دادند. در ادامه این روند، فنگ و همکاران (Feng et al, 2025) در حوضه یانگتسه، کاهش SCEI را به گرمایش انسان‌ساخت نسبت دادند و تشدید CDHEs را تحت سناریوهای آینده گزارش کرده‌اند. جی و همکاران (Ji et al, 2025) با شاخص SCDHI^۷ روزانه در نینگشیا، روند افزایشی رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک را پس از ۱۹۹۶ میلادی برای مناطق خشک گزارش کردند. لیو و همکاران (Liu et al, 2025) تأثیرات متفاوت CDHEs و

سطح جهانی و منطقه‌ای به‌ویژه در شرق آسیا، بررسی منابع نشان می‌دهد اگرچه مطالعات زیادی فرین‌های دما و بارش منفرد ایران را بررسی کردند، اما مطالعه‌ای در خصوص فرین‌های ترکیبی گرم-خشک در ایران انجام نشده است، شکافی که پژوهش حاضر با هدف پر کردن آن و ارائه تحلیلی جامع از فرین‌های ترکیبی گرم-خشک طراحی شده است. با توجه به قرارگیری ایران در کمربند خشک جهانی و آسیب‌پذیری بالا نسبت به تغییرات توامان دما و بارش، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ علمی و ارائه تحلیلی دقیق از وضعیت این رخدادهای فرین ترکیبی تدوین شده است.

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، کشور ایران است که در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان در غرب آسیا واقع شده است. اقلیم ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی پیچیده و تنوع توپوگرافی قابل توجه، از ناهمگونی فضایی-زمانی قابل توجهی برخوردار است. وجود رشته‌کوه‌های مرتفع البرز در شمال و زاگرس در غرب، همچون سدی در برابر سامانه‌های رسیده به مناطق داخلی کشور عمل کرده و موجب توزیع نامتقارن بارش در سطح کشور شده است؛ به طوری که نوار ساحلی دریای خزر از اقلیم مرطوب برخوردار است، در حالی که نواحی مرکزی و جنوب شرقی (دشت کویر و دشت لوت) تحت حاکمیت اقلیم خشک قرار دارند. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود ایران با گستردگی قابل توجه خود، پراکنش مناسبی از ایستگاه‌ها را در مناطق کویری و کوهستانی ندارد با این حال تمرکز اصلی این مطالعه بر تحلیل داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی جهت ارزیابی اقلیم شناسی و روند فرین‌های ترکیبی گرم-خشک در سه دهه اخیر است تا کمترین عدم قطعیت را در برآورد این دست از این فرین‌های اقلیمی داشته باشیم.

CHHEs جهانی را بررسی کرده و اثرات کاهشی CDHEs را در بیشتر مناطق شناسایی کردند. این یافته‌ها با پژوهش ژو و همکاران (Zhou et al, 2025) که پیش‌نگری‌های رخداد فرین‌های ترکیبی با استفاده از CMIP6 در چین پرداختند همخوانی دارد، آن‌ها افزایش فراوانی رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک را در مناطق غربی چین گزارش کردند. نهایتاً کائو و همکاران (Cao et al, 2026) با در نظر گرفتن متغیر تبخیر-تعرق در SCDHI، دقت برآورد فرین‌های ترکیبی را افزایش داده و نشان دادند که این دسته از مخاطرات در سطح جهانی دارای روند افزایشی هستند. بررسی سیر مطالعات اقلیم‌شناسی فرین‌ها در ایران نشان می‌دهد که تحقیقات انجام شده با تمرکز بر آشکارسازی و پهنه‌بندی فرین‌های دمایی و بارشی منفرد انجام شده است. اسدی و مسعودیان (Asadi and Masoodian, 2014) با پهنه‌بندی ایران بر پایه دماهای فرین، نواحی غربی را کانون شدیدترین دماهای فرین معرفی کردند و عساکره و شادمان (Asakereh and Shadman, 2017) ضمن تأیید روند افزایشی فراوانی روزهای گرم، وجود چرخه‌های نوسانی ۳ تا ۴ ساله را در رخدادهای دمایی کشور شناسایی نمودند. گروه دیگری از محققان توجه خود به تغییرات فرین‌های بارشی معطوف کردند. جوانشیری و همکاران (Javanshiri et al, 2024) نشان دادند که تغییر اقلیم اثرات یکسانی بر بارش ندارد؛ به طوری که رخدادهای سنگین بارشی در شرق و شمال‌غرب کاهش، اما در زاگرس و سواحل شمالی افزایش یافته است. هم‌راستا با این یافته‌ها، افروغ و همکاران (afroogh et al, 2025) با تمرکز بر نیمه شرقی کشور، نشان دادند که علیرغم عدم معناداری روند بسیاری از شاخص‌ها، بیشینه مطلق بارش افزایش است. در همین راستا میری و همکاران (Miri et al, 2025) نشان دادند که در آینده، روند شاخص‌های فرین گرم رفتاری یکنواخت و مستقل از توپوگرافی در سراسر کشور خواهد داشت. علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در بررسی فرین‌های ترکیبی در



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی همدید (واحد نقشه: متر)

Fig. 1: The study area and the synoptic stations analyzed in this study (Map unit: meters).

مواد و روش‌ها

داده‌های تحقیق

در این پژوهش، به منظور بررسی فرین‌های ترکیبی گرم-خشک ایران، از داده‌های مشاهداتی روزانه شامل بارش و دما استفاده شده است. این داده‌ها از ۹۵ ایستگاه هواشناسی همدید که دارای پراکنش جغرافیایی مناسبی در سطح ایران هستند، برای یک دوره آماری ۳۰ ساله از ۱۹۹۱ تا

۲۰۲۰ جمع‌آوری گردیدند (جدول ۱). داده‌های خام مورد استفاده تحت فرآیندهای کنترل کیفی قرار گرفته‌اند تا از درستی و همگنی سری‌های زمانی اطمینان حاصل شود. انتخاب این بازه زمانی ۳۰ ساله، مطابق با استانداردهای سازمان جهانی هواشناسی^۸ (WMO) برای تعیین نرمال‌های اقلیمی است و امکان تحلیل‌های آماری مناسب را فراهم می‌آورد.

جدول ۱: موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی مورد بررسی برای محاسبه رخداد فرین‌های ترکیبی

Table 1: Locations of the studied synoptic meteorological stations used to compute the occurrence of compound extreme events

Row	Station	Elevation	Row	Station	Elevation	Row	Station	Elevation
1	Abadan	6.6	34	Qom	879.1	67	Ramhormoz	150.5
2	Abadeh	2030	35	Quchan	1287	68	Ramsar	-20
3	Abali	2465.2	36	Gorgan	0	69	Rasht	-8.6
4	Abu Musa Island	6.6	37	Hamedan	1740.8	70	Ravansar	1380
5	Ahar	1391	38	Ilam	1337	71	Sabzevar	962
6	Ahvaz	22.5	39	Iranshahr	591.1	72	Safiabad (Dezful)	82.9
7	Aligudarz	2022.1	40	Jask	5.2	73	Saqqez	1522.8
8	Anar	1409	41	Jolfa	736.2	74	Sanandaj	1373.4
9	Arak	1661.9	42	Kahnuj	499	75	Sarab	1682
10	Ardabil	1314.3	43	Kangavar	1468	76	Sarakhs	278
11	Babolsar	-21	44	Karaj	1292.9	77	Saravan	1182
12	Baft	2280	45	Kashan	955	78	Sarpol-e Zahab	545
13	Bam	940	46	Kashmar	1109.7	79	Semnan	1127
14	Bandar Anzali	-23.6	47	Kerman	1754	80	Shahr-e Babak	1834.1
15	Bandar Abbas	9.8	48	Kermanshah	1318.5	81	Shahrekord	2048.9
16	Bandar Lengeh	22.7	49	Khalkhal	1797.4	82	Shahrud	1325.2
17	Bandar Mahshahr	6.2	50	Khash	1427	83	Shiraz	1488
18	Bijar	1883.4	51	Khur (Birjand)	1117.4	84	Tabas	711
19	Birjand	1491	52	Khoy	1103.4	85	Tabriz	1361
20	Bojnourd	1065	53	Khorramabad	1147.8	86	Takab	1817.2

21	Bushehr Airport	9	54	Kish Island	30	87	Tehran Mehrabad	1191
22	Borujen	2260	55	Kuhrang	2365	88	Tehran (Shemiran)	1549.1
23	Borujerd	1629	56	Lar	792	89	Torbat-e Heydarieh	1451
24	Chabahar	8	57	Mahabad	1351.8	90	Yasuj	1816.3
25	Dehloran	232	58	Maku	1411.2	91	Yazd	1230.2
26	Dorudzan	1642	59	Maragheh	1344	92	Zabol	489.2
27	Isfahan	1551.9	60	Mashhad	999.2	93	Zahedan	1370
28	Eslamabad-e Gharb	1348.8	61	Masjed Soleyman	320.5	94	Zanjan	1659.4
29	Fasa	1268	62	Minab	29.6	95	Zarqan	1596
30	Ferdows	1293	63	Mianeh	1110			
31	Qarakheil	14.7	64	Noshahr	-20.9			
32	Qorveh	1906	65	Urmia	1328			
33	Qazvin	1279.1	66	Parsabad (Airport)	77.8			

شناسایی رخدادهای ترکیبی گرم-خشک

در این پژوهش، به منظور آشکارسازی رخدادهای ترکیبی گرم-خشک صدک‌های ۲۰ و ۸۰ به عنوان آستانه در نظر گرفته شدند (Hao et al, 2019; Zhao et al, 2025). در نهایت، زمانی که هر دو رخداد خشکی و گرما در یک ماه واحد رخ دادند، به آن رخداد به عنوان یک رخداد ترکیبی تعریف شد. به منظور توصیف شدت رخداد ترکیبی گرم-خشک، از شاخص رخداد ترکیبی استاندارد شده (SCEI) استفاده شد. مقادیر پایین‌تر SCEI بیانگر شرایط شدیدتر در رخدادهای ترکیبی می‌باشد.

به عنوان نمونه، توزیع احتمال برای بارش پایین و دمای بالا مطابق رابطه ۱ بیان می‌شود (Hao et al, 2019; Li et al, 2024):

رابطه ۱)

$$P(X \leq x, Y > y) = P(X \leq x) - P(X \leq x, Y \leq y)$$

احتمال رخداد توأمان بر اساس موقعیت ترسیمی گرینگورت^۹ برآورد گردید (رابطه ۲):

رابطه ۲)

$$P(x_i, y_i) = \frac{n_i - 0.44}{n + 0.12}$$

که در رابطه بالا n طول کل سری زمانی و n_i تعداد رخدادهایی است که در آن‌ها شرط $x_k \leq x_i$ و $y_k > y_i$ برقرار باشد ($1 \leq k \leq n$). به منظور اطمینان از اینکه P از یک توزیع یکنواخت پیروی می‌کند، توزیع تجربی F بر احتمال توأم P برازش داده شد. در نهایت، شاخص شدت برای رخداد ترکیبی گرم-خشک (SCEI) با استفاده از توزیع نرمال استاندارد (Φ) استخراج شد. شاخص SCEI به شکل رابطه ۳ بیان می‌شود (Hao et al, 2019):

رابطه ۳)

$$SCEI = \Phi^{-1}(F(P(X \leq x, Y > y)))$$

در رابطه بالا، Φ بیانگر توزیع نرمال استاندارد و F تابع توزیع تجمعی است. مقادیر پایین‌تر شاخص SCEI، بیانگر شرایط شدیدتر رخدادهای ترکیبی گرم-خشک است. شاخص SCEI به پنج طبقه تقسیم می‌شود. این طبقات شامل CE0 برای رخداد ترکیبی گرم-خشک غیر عادی، CE1 رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک متوسط، CE2 رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک شدید، CE3 رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک فرین، CE4 رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک فرین استثنایی می‌باشند که در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲: طبقات رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک بر اساس شاخص SCEI. هر طبقه متناظر با احتمال رخداد آن در هر ۱۰۰ سال می‌باشد (Wu et al, 2020).

Table 2: Classification for compound hot-dry extreme events as defined by the Standardized Compound Event Indicator (SCEI), with each category corresponding to its 100-year return period (Wu et al, 2020).

طبقه	رخداد فرین ترکیبی گرم-خشک	احتمال (صدک)	SCEI
Category	Compound DryHot	Percentile chance	
CE0	غیرعادی (Abnormal)	20 to $\leq$ 30	-0.5 to -0.7
CE1	متوسط (Moderate)	10 to $\leq$ 20	-0.8 to -1.2
CE2	شدید (Severe)	5 to $\leq$ 10	-1.3 to -1.5
CE3	فرین (Extreme)	2 to $\leq$ 5	-1.6 to -1.9
CE4	استثنایی (Exceptional)	$\leq$ 2	-2.0 or less

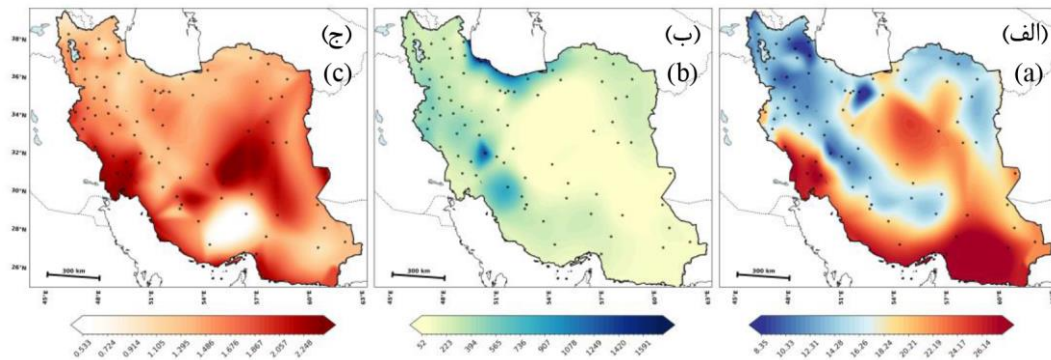
تحلیل روند فرین‌های ترکیبی گرم-خشک با استفاده از آزمون من-کندال تصحیح شده

جهت ارزیابی تغییرات زمانی و آشکارسازی رفتار بلندمدت در سری‌های زمانی فرین‌های ترکیبی گرم-خشک، استفاده از روش‌های ناپارامتری کلاسیک به دلیل وجود احتمالی خودهمبستگی در داده‌های اقلیمی، ممکن است منجر به برآوردهای نادرست در سطح معنی‌داری آزمون روند شود (Mann, 1945; Kendall, 1975). از این‌رو، برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان با وجود خودهمبستگی، از آزمون من-کندال تصحیح شده (Modified Mann-Kendall) با رویکرد تصحیح واریانس پیشنهاد شده توسط حامد و رائو (Hamed and Rao, 1998) استفاده شد. این روش با تعدیل واریانس آماره S، اثرات خودهمبستگی را خنثی کرده و آماره Z دقیق‌تری را برای رد یا تایید فرض صفر ارائه می‌دهد (Rao et al, 2003). برای کمی‌سازی شدت تغییرات و برآورد آهنگ شیب خط روند در رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک، از برآوردگر ناپارامتری شیب سن (Sen's Slope) استفاده شد که مقاومت بالایی در برابر داده‌های پرت دارد و مکمل مناسبی برای آزمون من-کندال تصحیح شده و من-کندال محسوب می‌شود (Sen, 1968).

بحث و نتایج

تحلیل فضایی رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک در ایران طی دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰، بیانگر ناهمگنی شدید اقلیمی و وجود یک گرادیان آشکار شمال‌غربی-جنوب‌شرقی است. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد که توزیع مکانی این پدیده تحت تأثیر مستقیم برهم‌کنش‌های پیچیده میان الگوهای گردش جوی، توپوگرافی پیچیده و سازوکارهای بازخورد زمین-جو قرار دارد. دامنه تغییرات شاخص فرین ترکیبی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، طیفی از ۰/۵۳ درصد تا ۲/۲۴ درصد را طی دوره ۳۰ ساله در بر می‌گیرد. بیشینه رخدادهای فرین گرم-خشک در نیمه جنوبی و به‌ویژه جنوب‌غرب و شرق کشور متمرکز شده است. دشت لوت و مناطق مجاور آن کانون اصلی این مخاطرات اقلیمی محسوب می‌شوند. این منطقه جغرافیایی که از نظر طبقه‌بندی اقلیمی در مناطق بیابانی قرار می‌گیرد، با میانگین بارش سالانه کمتر از ۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه فراتر از ۲۴ تا ۲۶ درجه سلسیوس، شرایط ایده‌آلی

را برای همزمانی رخداد بارش‌های کمتر از صدک بیستم و دماهای بالاتر از صدک هشتادم فراهم می‌آورد. شرایط مشابهی در استان خوزستان در جنوب غرب کشور مشاهده می‌شود. در این منطقه از کشور بارش سالانه بیش از ۳۰۰ میلی‌متر، به دلیل تمرکز بارش‌ها در فصل سرد و حاکمیت تابستان‌های بسیار گرم، باعث شده است تعداد رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک این منطقه بیش از سایر مناطق کشور باشد. در این مناطق، سازوکار بازخورد مثبت خشکی خاک و دما نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند؛ بدین صورت که کاهش رطوبت خاک منجر به محدودیت تبخیر-تعرق و در نتیجه اختصاص بخش عمده انرژی تابشی به شار گرمای محسوس می‌شود که خود تشدیدکننده دما و پایداری شرایط خشک است. نواحی شمالی کشور شامل سواحل جنوبی دریای خزر و دامنه‌های شمالی البرز، کمترین فراوانی رخدادهای گرم-خشک را تجربه کرده‌اند. این الگو همبستگی معکوس و معنی‌داری را با توزیع مکانی بارش سالانه نشان می‌دهد. نوار شمالی کشور با دریافت بارش سالانه بین ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس، کمتر در مواجهه همزمانی شرایط فرین گرم-خشک قرار می‌گیرد. همچنین، نواحی کوهستانی زاگرس در غرب کشور با بارش سالانه بیش از ۵۰۰ میلی‌متر، به عنوان مانعی در برابر نفوذ رطوبت عمل کرده و مقادیر شاخص را در دامنه‌های بادپناه افزایش می‌دهند. این اثر سایه بارش به روشنی در حوضه‌های داخلی و مرکزی ایران (دشت کویر) قابل مشاهده است، به گونه‌ای که با کاهش بارش به کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و افزایش دامنه نوسانات دمایی، فراوانی رخدادهای ترکیبی را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد. تحلیل همزمان نقشه‌های دما، بارش و شاخص فرین ترکیبی نشان می‌دهد که توزیع فضایی فرین‌های گرم-خشک در ایران تابعیت شدیدی از الگوی توپوگرافی دارد؛ به طوری که رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس با جلوگیری از نفوذ توده‌های هوای مرطوب شمالی و غربی به فلات مرکزی، موجب شکل‌گیری اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک با نوسانات شدید دمایی در بخش‌های داخلی شده‌اند. بنابراین، روند افزایشی مخاطرات ترکیبی در نواحی مرکزی و جنوبی، نه تنها تابعی از تغییرات جهانی، بلکه حاصل برهم‌کنش ویژگی‌های جغرافیایی محلی با الگوهای بزرگ مقیاس جوی است.

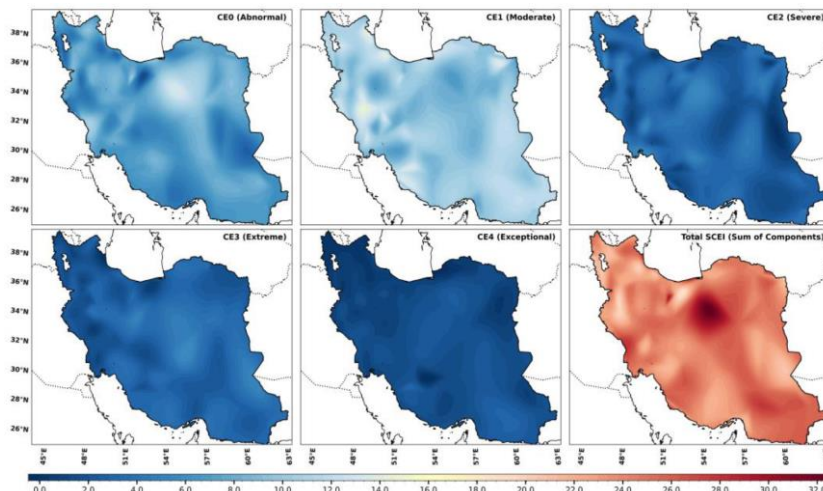


شکل ۲: اقلیم شناسی ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) دما (الف)، بارش (ب) و رخداد فرین‌های گرم-خشک (ج)؛ (واحد الف: درجه سلسیوس، ب: میلی‌متر و ج: رخداد).

Fig. 2: The 30-year climatology (1991–2020) for (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) precipitation (mm), and (c) the frequency of hot-dry extremes.

ترکیبی، نه به صورت تصادفی، بلکه به صورت سیستماتیک و با فراوانی بالاتری نسبت به سایر مناطق کشور رخ داده است. در مقابل، سواحل جنوبی دریای خزر و ارتفاعات زاگرس به دلیل برخورداری از بارش بیش‌تر و پراکنده در طول سال، مقادیر SCEI بالاتری را نشان داده و کمترین آسیب‌پذیری را نسبت به این رخداد‌های ترکیبی داشته‌اند. تبیین فیزیکی شکل‌گیری این رخدادها، بر برهم‌کنش پیچیده سازوکارهای دینامیکی و ترمودینامیکی جو استوار است. استیلای پرفشار جنب‌حاره بر فلات ایران در فصل تابستان، ضمن سرکوب سامانه‌های بارشی، موجب افزایش تابش ورودی و تشدید گرمایش سطح می‌شود. در نواحی شرق و جنوب‌شرق، این الگوی گردش جوی با توپوگرافی خاص منطقه پتانسیل تبخیر-تعرق را به شدت افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، سازوکارهای ترمودینامیکی ناشی از گرمایش، نقش محرک را در تشدید شدت این رخدادها ایفا کرده‌اند. جابه‌جایی توزیع احتمالاتی دما به سمت مقادیر بالاتر، سبب شده است که حتی در شرایط بارش نرمال یا کاهش جزئی بارش، رخداد موج‌های گرمایی منجر به عبور شاخص از آستانه‌های بحرانی شود. در حوضه‌های خشک داخلی مانند دشت لوت، بازخورد مثبت زمین-جو نقش تعیین‌کننده‌ای دارد؛ به گونه‌ای که کاهش رطوبت اولیه خاک ناشی از بارش کم، منجر به تقسیم انرژی سطحی به نفع شار گرمای محسوس و در نتیجه گرمایش بیشتر لایه مرزی جو می‌شود که تداوم شرایط فرین ترکیبی گرم-خشک را سبب می‌شود.

تحلیل فضایی شاخص SCEI، الگوی ناهمگن و پیچیده‌ای از رخداد‌های فرین ترکیبی گرم-خشک ایران را نشان می‌دهد. فراوانی رخداد این پدیده از یک گرادیان جغرافیایی مشخص پیروی می‌کند. در بررسی طبقات شدت پایین‌تر، شامل شرایط غیرعادی (CE0) با احتمال رخداد ۲۰ تا ۳۰ درصد و شرایط متوسط (CE1) با احتمال ۱۰ تا ۲۰ درصد، گستره وسیعی از کشور را در بر گرفته‌اند. این پراکنش جغرافیایی بیانگر آن است که بخش‌های بزرگی از کشور، به ویژه حوضه‌های داخلی و نواحی نیمه‌خشک، دارای یک حساسیت ذاتی به فرین‌های ترکیبی هستند. با حرکت به سمت مرکز ایران و دامنه‌های داخلی زاگرس، فراوانی طبقه CE1 افزایش می‌یابد. تمرکز اصلی مخاطرات فرین ترکیبی گرم-خشک در تحلیل طبقات فرین (CE2 تا CE4) نمود پیدا می‌کند، در این سه طبقه هم‌زمانی خشکی و گرما از آستانه‌های آماری معمول فراتر رفته و به رخداد‌های شدید، فرین و استثنایی می‌رسند. تحلیل‌های مکانی، وجود کانون‌های بحرانی را در جنوب‌شرق کشور (شامل سواحل مکران و بلوچستان) و شرق کشور (حوضه لوت) برجسته می‌سازد. در این مناطق جغرافیایی، شاخص SCEI مقادیر منفی قابل توجهی را ثبت کرده است که متناظر با طبقات CE3 (احتمال ۲ تا ۵ درصد) و CE4 (احتمال کمتر از ۲ درصد) می‌باشد. به طور مشخص، جنوب شرقی ایران، بالاترین شدت هم‌زمانی فرین‌های ترکیبی را تجربه کرده‌اند. این هم‌گرایی مکانی در مقادیر فرین شاخص SCEI نشان می‌دهد که در این پهنه‌ها، احتمال وقوع رخداد فرین

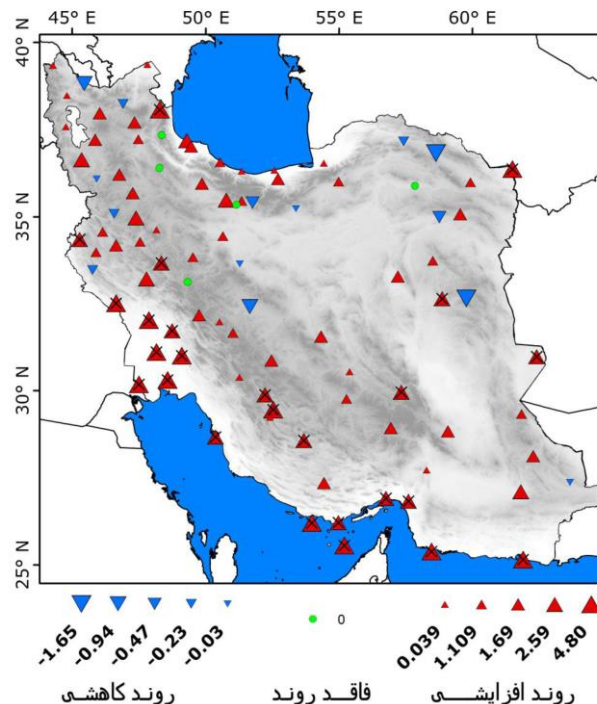


شکل ۳: شاخص استاندارد شده رخداد ترکیبی (SCEI) ایران برای رخدادهای غیرعادی (CE0)، متوسط (CE1)، شدید (CE2)، فرین (CE3) و استثنایی (CE4)، (واحد: درصد).

Fig. 3: The Standardized Compound Event Index (SCEI) for Iran, stratified by event intensity: abnormal (CE0), moderate (CE1), severe (CE2), extreme (CE3), and exceptional (CE4) (Unit: %).

روندهای افزایشی معنی‌دار در ایستگاه‌هایی نظیر اردبیل ($Z_c = 3.19$) و دهلران ($Z_c = 3.08, p = 0.002$) نشان‌دهنده تغییر در الگوهای بارش و دما این مناطق از کشور است. به طور کلی افزایش دما و به تبع آن افزایش پتانسیل تبخیر-تعرق، موازنه هیدرولوژیک را به سمت شرایط فرین سوق داده است. ایستگاه‌هایی مانند اصفهان ($Z_c = -1.09$)، بیرجند ($Z_c = -1.50$) و سمنان ($Z_c = -0.37$) روندهای کاهشی ضعیف و غیرمعنی‌داری را ثبت کرده‌اند. این کاهش جزئی در شاخص فرین‌های ترکیبی گرم-خشک، لزوماً به معنای بهبود شرایط اقلیمی نیست؛ بلکه می‌تواند ناشی از پدیده اشباع خشکی^{۱۰} باشد. این مناطق به دلیل قرارگیری در شرایط خشک و افت شدید منابع آب زیرزمینی، ظرفیت کمتری برای نوسانات آماری بیشتر دارند و یا مداخلات انسانی و تغییر کاربری اراضی بر سیگنال‌های طبیعی اقلیمی غلبه کرده است. در نهایت، تحلیل سازوکارهای فیزیکی حاکم بر این روندها نشان می‌دهد که تغییرات مشاهده شده محصول برهم‌کنش پیچیده میان متغیرهای ترمودینامیکی و دینامیکی است. افزایش دماهای کمینه با سرعتی بیش از دماهای بیشینه، موجب کاهش رخداد یخبندان‌های شبانه و طولانی‌تر شدن فصل رشد شده که خود منجر به افزایش نیاز آبی گیاهان و تخلیه رطوبت خاک می‌گردد. همزمان، تغییرات در گردش کلی جو، شدت و فراوانی فرین‌های ترکیبی گرم-خشک را در سه دهه اخیر به طور قابل توجهی تشدید کرده است.

تحلیل روند شاخص رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک در بازه زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰، بیانگر افزایش قابل توجه فرین‌های ترکیبی ایران است. تحلیل روند ۹۵ ایستگاه همدید، ناهمگونی قابل‌توجهی را در فراوانی رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک آشکار می‌سازد. آزمون آماری من-کندال تصحیح شده نشان می‌دهند که ۸۰/۲۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی هستند. که از این تعداد، ۲۶ درصد با سطح اطمینان ۵ درصد ($p < 0.05$) این تغییرات افزایشی را تجربه کرده‌اند. در نقطه مقابل، تنها ۱۴/۵۸ درصد از ایستگاه‌ها روند کاهشی از خود نشان داده که همگی این ایستگاه‌ها فاقد روند آماری مشخص هستند. از منظر توزیع مکانی، کانون‌های اصلی تشدید فرین‌های ترکیبی با الگوی خوشه‌ای در پهنه‌های ساحلی و پست جنوبی توزیع شده‌اند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که شدیدترین مقادیر آماری آزمون (Z_c) مربوط به جنوب‌غرب و سواحل خلیج فارس است. الگوی مشابهی در جنوب‌شرقی و سواحل دریای عمان مشاهده می‌شود که به عنوان دومین کانون بیشینه روند افزایشی فرین‌های ترکیبی گرم-خشک ایران شناسایی شد. ایستگاه‌های ساحلی و جزیره‌ای نظیر کیش ($Z_c = 3.66$)، جاسک ($Z_c = 3.45$) و ابوموسی ($Z_c = 3.25$)، تحت تأثیر ترکیبی از گرمایش آب‌های سطحی و خشکی قرار دارند. نکته قابل توجه در این بررسی، گسترش قلمرو جغرافیایی فرین‌های گرم-خشک به عرض‌های جغرافیایی بالاتر و نواحی کوهستانی شمال‌غرب کشور است.



شکل ۴: روند شاخص فرین ترکیبی گرم-خشک در ایران طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ با استفاده از آزمون سن، معنی‌داری روند با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال تصحیح شده بررسی شده است. ایستگاه‌هایی با علامت ضربدر در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

Fig. 4: Trends in the hot-dry compound extreme index over Iran during the 1991–2020 period, quantified by Sen's slope estimator. The statistical significance of these trends was evaluated using the modified non-parametric Mann-Kendall test. Cross symbols highlight stations where the observed trend is significant at the 5% level.

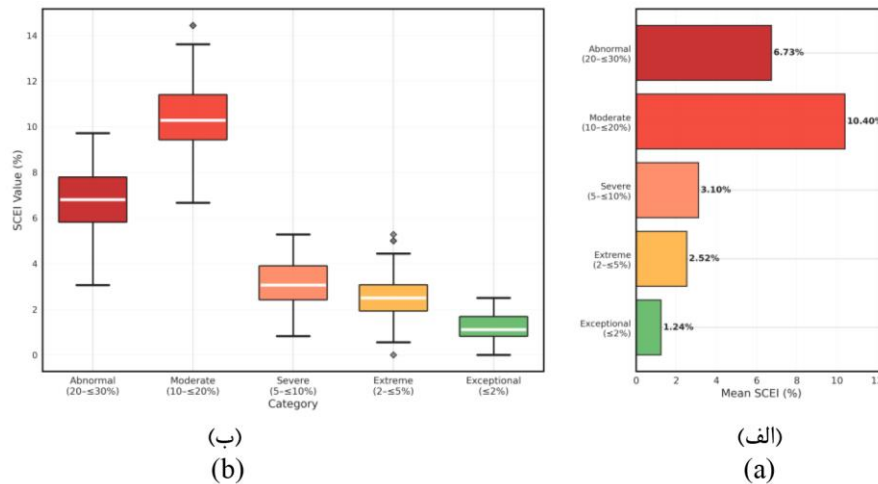
تحلیل آماری شاخص SCEI

تحلیل توزیع فراوانی شاخص SCEI در طبقات پنج‌گانه، بیانگر یک رابطه معکوس معنادار میان شدت رخداد و گستردگی آن است. در طبقه غیرعادی که معرف شرایط آغازین رخداد فرین ترکیبی است، میانه شاخص SCEI معادل ۷ درصد برآورد گردید که با نوسانات بین‌سالانه قابل‌توجهی در بازه ۳ تا ۹/۶ درصد همراه بوده است. با عبور به طبقه متوسط، میانه شاخص با افزایش محسوس به حدود ۱۰ درصد می‌رسد و دامنه نوسانات نیز بین ۶/۸ تا ۱۱/۵ درصد ثبت شده است. این افزایش در میانه توزیع نشان می‌دهد که رخداد‌های فرین ترکیبی با شدت متوسط، تمایل بیشتری گسترش پهنه‌های وسیع‌تری از کشور دارند. در طبقه شدید، میانه شاخص به طور ناگهانی به حدود ۳ درصد کاهش یافته و دامنه تغییرات نیز به بازه محدود ۰/۸ تا ۴/۳ درصد می‌رسد. این توزیع آماری یک نتیجه کلیدی برای تحقیق حاضر است که ماهیت محلی رخداد‌های فرین ترکیبی را در ایران نشان می‌دهد؛ این نتیجه نشان می‌دهد اگرچه شدت رخداد‌های فرین ترکیبی در کشور افزایش می‌یابد، اما قلمرو جغرافیایی تحت تأثیر آن به طور

معناداری محدود می‌شود. این روند کاهشی در طبقات فرین و استثنایی با شدت بیشتری ادامه می‌یابد، به طوری که میانه شاخص برای این دو طبقه به ترتیب به ۱/۵ و ۱/۲ درصد کاهش می‌یابد. تحلیل درصد فراوانی طبقات شاخص SCEI در دوره ۳۰ ساله مورد مطالعه نشان می‌دهد طبقه متوسط با ۱۰/۴ درصد و طبقه غیرعادی با ۶/۷۳ درصد از کل مشاهدات، در مجموع بیش از ۱۷ درصد از فرین‌های ترکیبی گرم-خشک دوره آماری را به خود اختصاص داده‌اند. این یافته بیانگر آن است که نزدیک به یک‌پنجم از سال‌های مورد مطالعه، اقلیم ایران پتانسیل بالایی برای هم‌زمانی بی‌هنجاری مثبت دمایی و بی‌هنجاری منفی بارش داشته است. از سوی دیگر طیف، طبقه شدید تنها ۳/۱ درصد، طبقه فرین ۲/۵۲ درصد و طبقه استثنایی ۱/۲۴ درصد از رخدادها را تشکیل می‌دهند. اگرچه مجموع فراوانی این سه طبقه کمتر از ۷ درصد است، اما نادر بودن این رخدادها نباید به معنای کم‌اهمیت بودن آن‌ها تفسیر شود. برخلاف شاخص‌های تک‌متغیره همانند شاخص دمای استاندارد شده $^{11}(STI)$ ، شاخص ترکیبی SCEI با شناسایی دقیق رخداد‌های فرین ترکیبی، نشان می‌دهد که هم‌زمانی

ایران است، زیرا نشان می‌دهد که رخداد های فرین ترکیبی نه به عنوان بی‌هنجاری های تصادفی، بلکه به عنوان یک ویژگی ساختاری و تکرارپذیر در اقلیم ایران تثبیت شده‌اند.

رخداد های فرین دما و بارش، فشاری به مراتب فراتر از مجموع خطی دو متغیر بر بیلان آبی کشور وارد می‌کند. این مخاطره، هشدار جدی برای مدیریت منابع آب در



شکل ۵: الف: متوسط پهنه‌ای شاخص استاندارد شده رخداد ترکیبی (SCEI) در ایران؛ نمودار جعبه‌ای شاخص SCEI برای طبقات مختلف آن طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ (واحد: درصد)

Fig. 5: a: Area-averaged Standardized Compound Event Index (SCEI) across Iran; box plots depicting the SCEI distribution across distinct categories spanning the 1991–2020 period (Unit: %).

نتیجه‌گیری

(Afroogh et al, 2025) این پژوهش گسترش قلمرو جغرافیایی فرین‌های ترکیبی به عرض‌های جغرافیایی بالاتر و نواحی کوهستانی شمال غرب، را نشان داده است. روند افزایشی معنی‌دار در ۸۰/۲۰ درصد از ایستگاه‌های کشور نشان دهنده تغییر در الگوهای اقلیمی کشور است. رخداد های فرین ترکیبی به عنوان نوسانات تصادفی و گذرا نیستند، بلکه به ویژگی ساختاری و تکرارپذیر اقلیم ایران بدل شده‌اند. رخداد های شدید تا استثنایی در حدود ۷ درصد از رخداد های کشور را در بر می‌گیرند و یک هشدار جدی برای مدیریت منابع آب و کشاورزی است. این وضعیت بیانگر آن است که استراتژی‌های مدیریت فعلی که بر اساس احتمال وقوع رخداد های تک‌متغیره تدوین شده‌اند، ممکن است در برابر شدت و تداوم رخداد های ترکیبی کارایی لازم را نداشته باشند. به‌ویژه در مناطقی که شاخص SCEI مقادیر منفی قابل‌توجهی (طبقات CE3 و CE4) را ثبت کرده است. در نهایت، تحلیل روند آماری نشان داد تنها در ۱۴/۵۸ درصد ایستگاه‌ها شاخص فرین ترکیبی گرم- خشک روند کاهشی داشته است که هیچ‌یک از آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبوده‌اند، در حالی که ۲۶ درصد از ایستگاه‌ها افزایش معنی‌داری را در سطح ۵ درصد

پژوهش حاضر با هدف برآورد رخداد های فرین ترکیبی گرم- خشک در پهنه ایران طی بازه زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰، انجام شد. نتایج کلیدی این تحقیق، وجود یک گردان آشکار شمال غربی- جنوب شرقی را در توزیع رخداد های فرین ترکیبی را تأیید می‌کند که طیف تغییرات آن در ایستگاه‌های مورد مطالعه از ۰/۵۳ درصد تا بیشینه ۲/۲۴ درصد متغیر است. نتایج مؤید آن است که شاخص SCEI به عنوان یک چارچوب آماری کارآمد، قابلیت اطمینان بالایی در پایش فرین‌های ترکیبی گرم- خشک در اقلیم ایران دارد. واکاوی داده‌های مشاهداتی ۹۶ ایستگاه سینوپتیک در بازه زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ نشان داد الگوی مکانی-زمانی این رخداد ها به‌شدت متأثر از ساختار وابستگی متقابل میان بارش و بی‌هنجاری‌های مثبت دمای است. همسو با مبانی ترمودینامیکی حاکم بر مناطق خشک و نیمه‌خشک (Zhu et al, 2021)، نتایج بیانگر آن است که تشدید جفت‌شدگی خشکی-جو در دهه‌های اخیر موجب شده تا خشکسالی‌های هواشناسی به‌عنوان پیشران تقویت امواج گرمایی عمل کرده و شدت و فراوانی رخداد های فرین ترکیبی افزایش دهند. در مقایسه با مطالعات پیشین

پیامدهای مخرب ناشی از تنش‌های آبی و گرمایی در اختیار سیاست‌گذاران و ذی‌نفعان قرار می‌دهد.

سیاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

در رخدادهای فرین ترکیبی گرم-خشک تجربه کرده‌اند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی بر مدل‌سازی دینامیکی برهم‌کنش الگوهای گردش جوی با توپوگرافی پیچیده ایران و همچنین ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی این پدیده‌ها در افق‌های زمانی آینده متمرکز شوند تا بتوان راهکارهای سازگاری دقیق‌تری را برای مناطق آسیب‌پذیر تدوین نمود. به طور کلی نتایج این مطالعه بینش‌های ضروری را جهت تدوین راهبردهای سازگاری و تعدیل

پانویس

- 1-Compound Dry and Hot Events (CDHEs)
- 2-Compound Heat-Humidity Extremes (CHHEs)
- 3-Copula
- 4-Standardized Compound Event Indicator (SCEI)
- 5-Standardized Dry and Hot Index (SDHI)
- 6-Blended Dry and Hot Events Index (BDHI)

- 7-Standardized Compound Drought and Heatwave Index (SCDHI)
- 8-World Meteorological Organization (WMO)
- 9-Gringorten plotting position
- 10-Aridity Saturation
- 11-Standardized Temperature Index (STI)

References

- Afroogh, B., Babaeian, I. and Mofidi, A., 2025. Study of precipitation trends in the eastern half of the Iran using ETCCDI indices and the impact of temperature on RX1day. *Nivar*, v. 49(130-131), p. 62-78 (In Persian).
- AghaKouchak, A., Cheng, L., Mazdiyasni, O. and Farahmand, A., 2014. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought. *Geophysical Research Letters*, v. 41(24), p. 8847-8852.
- Asadi, A. and Masoodian, A., 2014. Regionalization of Iran based on extreme warm temperatures. *Journal of the Earth and Space Physics*, v. 40(4), p. 155-168 (In Persian).
- Asakereh, H. and Shadman, H., 2017. Statistical Analysis of the Frequency and Temperature Changes in Hot Days in Iran. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, v. 25(100), p. 147-156 (In Persian).
- Buzan, J.R. and Huber, M., 2020. Moist heat stress on a hotter Earth. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 48(1), p. 623-655.
- Cao, S., Li, L., He, C. and Qi, T., 2026. Standardized compound drought and heatwave index: A new compound drought and heatwave events monitoring index considering evapotranspiration effects. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 146, 105023.
- Dong, Y., Liu, G., Wu, X., Wang, L., Xu, H., Yang, S. and Shao, M., 2025. Spatiotemporal variations in compound extreme events and their cumulative and lagged effects on vegetation in the northern permafrost regions from 1982 to 2022. *Remote Sensing*, v. 17(1), 169 p.
- Fan, X., Miao, C., Wu, Y., Mishra, V. and Chai, Y., 2024. Comparative assessment of dry-and humid-heat extremes in a warming climate: frequency, intensity, and seasonal timing. *Weather and Climate Extremes*, v. 45, 100698.
- Feng, S., Gu, X., Guan, Y., Wang, Q.J., Wang, L., Du, L. and Kong, D., 2025. Anthropogenic exacerbations of summer-autumn compound dry-hot severity in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, v. 646, 132346.
- Feng, S., Gu, X., Guan, Y., Wang, Q.J., Wang, L., Du, L. and Kong, D., 2025. Anthropogenic exacerbations of summer-autumn compound dry-hot severity in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, v. 646, 132346.
- Hamed, K.H. and Rao, A.R., 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, v. 204(1-4), p. 182-196.
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V.P. and Zhang, X., 2019. Statistical prediction of the severity of compound dry-hot events based on El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Hydrology*, v. 572, p. 243-250.
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V.P., Xia, Y., Shi, C. and Zhang, X., 2018. A multivariate approach for statistical assessments of compound extremes. *Journal of hydrology*, v. 565, p. 87-94.
- Javanshiri, Z., Asadi Oskoue, E. and Abbasi, F., 2024. An Investigation of the Changes in the Iran Precipitation Extreme Indices in Two Normal Climate Periods, 1981-2010 and 2020-1991. *Nivar*, v. 48(124-125), p. 66-83 (In Persian).
- Ji, S., Yang, S., Al-Sakkaf, A.S., Seka, A.M. and Zhang, J., 2025. Intensified compound drought and heat events in typical arid-semiarid

- transition region over the last four decades based on a daily-scale index. *Science of the Total Environment*, v. 1001, 180541.
- Kendall, M., 1975. *Rank Correlation Methods*. Griffin, London.
- Kumar, N. and Goyal, M.K., 2024. Projected changes in monsoonal compound dry-hot extremes in India. *Atmospheric Research*, v. 310, 107605.
- Li, J., Zhang, Y., Bevacqua, E., Zscheischler, J., Keenan, T.F., Lian, X. and Piao, S., 2024. Future increase in compound soil drought-heat extremes exacerbated by vegetation greening. *Nature Communications*, v. 15(1), 10875.
- Liu, M., Yu, H., Duan, W. and Wu, M., 2025. Differential impacts of compound dry-and humid-hot events on global vegetation productivity. *Frontiers in Environmental Science*, v. 13, 1597553.
- Liu, M., Yu, H., Duan, W. and Wu, M., 2025. Differential impacts of compound dry-and humid-hot events on global vegetation productivity. *Frontiers in Environmental Science*, v. 13, 1597553.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, v. 13(3), p. 245-259.
- Miri, M., Zand, M., Kousari, M.R. and Rahimi, M., 2025. Spatial and temporal analysis of historical and future extreme temperature events in Iran under the influence of climate change. *Watershed Engineering and Management*, v. 17(3), p. 267-284 (In Persian).
- Rao, A.R., Hamed, K.H. and Chen, H.L., 2003. Nonstationarities in hydrologic and environmental time series. Ringgold Inc., Portland, Oregon.
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63(324), 1379.
- Wu, H., Su, X., Singh, V.P. and Zhang, T., 2023. Compound climate extremes over the globe during 1951–2021: Changes in risk and driving factors. *Journal of Hydrology*, v. 627, 130387.
- Wu, X., Hao, Z., Zhang, X., Li, C. and Hao, F., 2020. Evaluation of severity changes of compound dry and hot events in China based on a multivariate multi-index approach. *Journal of Hydrology*, v. 583, 124580.
- Yin, C., Ting, M., Kornhuber, K., Horton, R.M., Yang, Y. and Jiang, Y., 2025. CETD, a global compound events detection and visualisation toolbox and dataset. *Scientific Data*, v. 12(1), 356.
- Zhao, B., Horvat, C. and Gao, H., 2025. An optimal path threshold method for rigorously identifying extreme climate events. *Environmental Research Letters*, v. 20(2), 024048.
- Zhou, C., Wang, G., Jiang, H., Li, S., Shi, X., Hu, Y. and Cabral, P., 2025. Spatio-temporal patterns of compound dry-hot extremes in China. *Atmospheric Research*, v. 314, 107795.
- Zhu, X., Zhang, S., Liu, T. and Liu, Y., 2021. Impacts of heat and drought on gross primary productivity in China. *Remote Sensing*, v. 13(3), 378.
- Zscheischler, J. and Seneviratne, S.I., 2017. Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Science advances*, v. 3(6), e1700263.