

The Concurrence of Decreasing Precipitation and Intensifying Daily Maximums in Iran: Estimating Return Periods of Precipitation Extremes via Generalized Extreme Value (GEV) Distribution

Dadashi-Roudbari, A.¹ 

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

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

(Received: 17 Apr 2026, Revise: 09 Jun 2026, Accepted: 13 Jun 2026, Published online: 13 Jun 2026)

Abstract

The volatile nature of modern climate cycles necessitates a rigorous examination of daily precipitation patterns. To decode daily precipitation dynamics and pinpoint extreme anomalies, this study investigates observational data from 175 synoptic meteorological stations across Iran between 2000 and 2024. Initial findings reveal a steep precipitation gradient heavily modulated by latitudinal variations and topographical constraints. Trend analyses point toward an expanding drought footprint, with statistically significant declines in overall rainfall recorded at over 63% of the monitored stations. Yet, atmospheric systems exhibit a striking behavioral divergence: even as the overall frequency of rainy days steadily declines, maximum daily precipitation is simultaneously rising at roughly 59% of sites. From a thermodynamic perspective, this phase shift and temporal concentration of rainfall align closely with the Clausius-Clapeyron relation. As warming expands the atmosphere's moisture-holding capacity, massive volumes of water are frequently discharged over highly abbreviated timescales. Such mechanics pave the way for devastating floods, starkly evidenced by the unprecedented deluges that struck Kish in 1404. Across vast swaths of the Iranian landmass, the simultaneous reduction in both cumulative precipitation and rainy days further solidifies the "dry-gets-drier" paradigm. When modeling these daily anomalies using the Generalized Extreme Value (GEV) distribution, profound spatial heterogeneity emerges within the country's precipitation regime. Moisture advection and the explosive release of convective energy along the southern Zagros slopes yield a positively skewed statistical distribution specifically, asymptotic Fréchet behavior. This localized dynamic severely amplifies the likelihood of anomalous, heavy rainfall. According to model projections, the areal average of maximum daily precipitation jumps from 20 mm during a 2-year return period to 70 mm at the 100-year mark. Conversely, the Central Plateau conforms to a Weibull distribution, establishing a much stricter upper boundary on extreme events. Ultimately, the gradual replacement of balanced precipitation patterns with episodic, torrential extremes has plunged the national hydrological cycle into disarray. Adapting to this erratic shift dictates an immediate and sweeping overhaul of existing flood risk management infrastructure.

Keywords: Precipitation extremes, Generalized Extreme Value (GEV) distribution, Daily maximum precipitation, Rainy days, Climate change.

Cite this article: Dadashi-Roudbari, A. (2026). The Concurrence of Decreasing Precipitation and Intensifying Daily Maximums in Iran: Estimating Return Periods of Precipitation Extremes via Generalized Extreme Value (GEV) Distribution. *Nivar*, ??(??-??), ??-??. doi: 10.30467/nivar.2026.579032.1374

E-mail:



همزمانی کاهش بارش و تشدید بیشینه بارش روزانه در ایران و برآورد دوره‌های بازگشت فرین‌های بارشی با توزیع فرین تعمیم‌یافته (GEV)

عباسعلی داداشی رودباری[✉]

۱. استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

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

(دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳)

چکیده

بررسی دقیق الگوهای بارش روزانه در مواجهه با تغییر اقلیم ضروری است. این پژوهش با هدف تحلیل رفتار بارش روزانه و رخداد‌های فرین، داده‌های ۱۷۵ ایستگاه هواشناسی همدیدی ایران را طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ بررسی می‌کند. نتایج نشان‌دهنده گرادیان شدید بارشی تحت تأثیر عرض جغرافیایی و توپوگرافی است. بررسی روندها حاکی از گسترش شرایط خشکسالی و کاهش معنادار بارش در بیش از ۶۳ درصد از ایستگاه‌های کشور است. با این وجود، بین متغیرهای مختلف بارش واگرایی قابل توجهی دیده شد؛ درحالی‌که فراوانی روزهای بارانی کاهش یافته، بیشینه بارش روزانه در حدود ۵۹ درصد از ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی است. این تغییر فاز و تمرکز زمانی بارش، از نظر ترمودینامیکی با رابطه کلازیوس-کلاپیرون (Clausius-Clapeyron) انطباق دارد؛ به این معنا که افزایش ظرفیت رطوبتی جو در اثر گرمایش، منجر به تخلیه حجم عظیمی از بارش در زمان کوتاه و رخداد سیلاب‌های ویرانگر (نظیر بارش‌های بی‌سابقه ۱۴۰۴ کیش) می‌شود. همچنین در بخش وسیعی از کشور، همزمانی کاهش بارش و روزهای بارانی، تشدید پدیده خشک‌تر شدن مناطق خشک (Dry-gets-Drier) را تأیید می‌کند. مدل‌سازی رخداد‌های فرین روزانه بر پایه توزیع مقادیر فرین تعمیم‌یافته (GEV)، ناهمگنی شدیدی را در رژیم بارشی کشور نشان می‌دهد. در دامنه‌های زاگرس جنوبی، فرارفت رطوبت و آزادسازی انرژی همرفتی، منجر به شکل‌گیری توزیع آماری با چولگی مثبت (رفتار مجانبی فرشه) شده که خطر رخداد بارش‌های فراتر از نرمال را به شدت افزایش می‌دهد. برآورد‌های مدل نشان می‌دهد میانگین پهنه‌ای بیشینه بارش روزانه از ۲۰ میلی‌متر در دوره بازگشت ۲ ساله، به ۷۰ میلی‌متر در دوره ۱۰۰ ساله می‌رسد. در نقطه مقابل، فلات مرکزی با تبعیت از توزیع وایبول، کران بالای محدودتری دارد. در نهایت، جایگزینی بارش‌های متوازن با رخداد‌های رگباری فرین، چرخه آب کشور را دچار بی‌نظمی کرده و در این شرایط بازنگری فوری زیرساخت‌های مدیریت ریسک سیلاب ضروری است.

کلیدواژه‌ها: فرین‌های بارش، توزیع فرین تعمیم‌یافته (GEV)، بیشینه بارش روزانه، روزهای بارانی، تغییر اقلیم.

۱. مقدمه

(al., 2024). این گرمایش فزاینده صرفاً به بی‌هنجاری‌های دمایی محدود نمی‌شود، بلکه با تشدید چرخه هیدرولوژیک جهانی، الگوهای توزیع مکانی، شدت و فراوانی بارش‌ها را دستخوش تغییرات کلیدی کرده است (Trenberth et al., 2003, 2005; Guan et al., 2024). در دهه‌های گذشته، انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای و تغییرات گسترده کاربری اراضی بر نوسانات اقلیم منطقه‌ای اثر گذاشته (Shahzad et

شواهد نشان می‌دهند که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، سامانه اقلیمی کره زمین در حال تجربه تغییرات بی‌سابقه‌ای است. بر اساس گزارش ارزیابی ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC, 2021)، میانگین دمای کره زمین در دهه اخیر (۲۰۱۱-۲۰۲۰) افزایشی معادل ۱/۰۹ درجه سلسیوس را نسبت به دوران پیش از انقلاب صنعتی ثبت کرده است (Lee et

استناد: داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۵). همزمانی کاهش بارش و تشدید بیشینه بارش روزانه در ایران و برآورد دوره‌های بازگشت فرین‌های بارشی با توزیع فرین

تعمیم‌یافته (GEV). نیوار، ۴۴(۰۰-۰۰)، ۰۰-۰۰. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2026.579032.1374>

رایانامه:



یک پارادوکس اقلیمی خطرناک است که پتانسیل رخداد توأمان خشکسالی‌های طولانی و سیلاب‌های ویرانگر را به شدت افزایش داده است.

با وجود اهمیت حیاتی این موضوع، بیش‌تر مطالعات انجام شده در سطح کشور، تمرکز خود را تنها بر روندهای میانگین بارش، فراوانی روزهای بارانی یا مقادیر تجمعی معطوف کرده‌اند و تحلیل کمی پدیده همزمانی در تغییرات مشخصه‌های بارشی، به‌ویژه در مقیاس بیشینه بارش روزانه، انجام نشده است. در راستای پر کردن این خلأ کلیدی، پژوهش حاضر با هدف پاسخگویی به این پرسش اساسی طراحی شده است که آیا میان همزمانی کاهش مقادیر کل بارش و تشدید بیشینه بارش روزانه در مناطق مختلف ایران رابطه وجود دارد؟ و مشخصه‌های این بارش‌های فرین از چه الگویی پیروی می‌کنند؟ برای دستیابی به این هدف، این مطالعه با اتکا به داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید، رویکردی جامع را برای تحلیل رفتار بارش (شامل مجموع بارش، تعداد روزهای بارانی و بیشینه بارش روزانه) اتخاذ کرده است. وجه تمایز این پژوهش، بهره‌گیری از مدل‌سازی آماری پیشرفته مقادیر فرین و به‌طور خاص توزیع فرین تعمیم‌یافته (GEV) است. با توجه به اینکه مدل GEV به عنوان کارآمدترین و غالب‌ترین توزیع احتمالی برای تحلیل شدت بارش و دوره‌های بازگشت در مناطق مختلف ایران شناخته شده است (Abdolmanafi et al., 2025)، استفاده از این مدل برای محاسبه دوره‌های بازگشت بیشینه‌های بارشی، امکان آشکارسازی تغییرات پنهان در شدت و احتمال رخدادهای فرین را فراهم می‌آورد و بستری علمی را برای ارزیابی دقیق ریسک سیلاب و ارتقای مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم ارایه می‌نماید.

گرمایش جهانی و تغییر اقلیم ناشی از آن، طی دهه‌های اخیر، چرخه هیدرولوژیک زمین را دستخوش تغییرات اساسی کرده است. بطور کلی این مطالعات را در سه دسته کلی روند الگوهای بارشی، مدل‌سازی دوره‌های بازگشت و تحلیل توزیع فرین تعمیم‌یافته (GEV) و پارادوکس‌های هیدرولوژیک دسته بندی کرد. گروه نخست به بررسی

(al., 2026) و سبب شده تا سهم بارش‌های سبک در مقیاس جهانی کاهش یافته و در مقابل، بر شدت و فراوانی بارش‌های سنگین افزوده شود (Min et al., 2011).

گذار به سمت رخدادهای فرین، چالش‌های عظیم اقتصادی، اجتماعی و زیرساختی به همراه داشته است. رخدادهای فرین بارشی امروزه به عنوان یکی از مخرب‌ترین مخاطرات اقلیمی شناخته می‌شوند که، به‌ویژه در ترکیب با سایر مخاطرات اقلیمی، مخاطرات ترکیبی (Compound Hazards) ویرانگری همچون سیلاب‌های برق‌آسا، زمین‌لغزش و تخریب بنیادین زیرساخت‌ها را رقم می‌زنند (Touma et al., 2022; Thomas et al., 2024; Granata et al., 2025). پیامدهای ناشی از این رخدادها، نظیر شکست در سازه‌های طراحی شده بر اساس اقلیم گذشته و افزایش تلفات انسانی (Ashley & Ashley, 2008; ASCE, 2016)، تاب‌آوری جوامع و امنیت منابع آب را به شدت تهدید می‌کند (NOAA, 2017; Fang et al., 2025).

ضرورت درک این سازوکارهای پیچیده در جغرافیای ایران، که در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده و به‌شدت در مواجهه با تنش‌های محیطی و توسعه سریع قرار دارد (Naseer et al., 2025)، اهمیتی دوچندان می‌یابد. بررسی‌های اقلیمی نشان می‌دهد ایران در دهه‌های اخیر گرمایشی سریع (حدود ۱/۳ درجه سلسیوس طی شش دهه) را همراه با کاهش میانگین بارش سالانه (۸ میلی‌متر در دهه) و گسترش پهنه‌های خشک تجربه کرده است (Alizadeh-Choobari & Najafi, 2018). در حالی که ارزیابی‌های مبتنی بر داده‌های بازتحلیل حاکی از روندهای کاهش در مجموع بارش‌ها، رواناب‌ها و رخدادهای فرین در سطح کشور است (Malaekheh et al., 2022). تحلیل‌های دقیق‌تر مبتنی بر شاخص تمرکز بارش و آنتروپی شانون، نشان دهنده توزیع روزانه به‌شدت نامنظم دارد؛ به‌طوری‌که در مناطقی نظیر سواحل خلیج فارس، حاشیه دریای خزر و بخش‌های جنوب شرقی، بارش‌ها با تمرکز بالا و بی‌نظمی شدید رخ می‌دهند (Mirzaei Hassanlu et al., 2024). این رفتار متناقض یعنی کاهش بارش‌های ملایم و مجموع سالانه همگام با افزایش تمرکز و شدت گرفتن فرین‌های کوتاه‌مدت

بازگشت طولانی مدت تر، از نظر آماری معنادارتر و بزرگ تر هستند.

در سال های اخیر، بخش بزرگی از پژوهش های انجام شده به بررسی پیامدهای پارادوکس های هیدرولوژیکی پرداختند. در یکی از این تحقیقات، (Sharma et al., 2018) این پیش فرض که افزایش بارش های فرین الزاماً به افزایش سیلاب ها منجر می شود را به چالش کشیدند. آن ها استدلال کردند که علی رغم شواهد متقن مبنی بر افزایش فرین های بارشی، شدت سیلاب ها در بسیاری از مناطق کاهش یافته است. در همین راستا (Xiong et al., 2022) پارادایم کلاسیک مناطق خشک، خشک تر و مناطق مرطوب، مرطوب تر می شوند (DDWW) را مورد نقد قرار داد و با بررسی بی هنجاری های ذخیره آب زمینی (TWSAs) نشان دادند که تنها بخش کوچکی از خشکی های کره زمین (بین ۱۱ تا ۴۰/۸ درصد) از پارادایم DDWW تبعیت می کنند و بخش قابل توجهی از مناطق روندی کاملاً معکوس دارند. در یکی از جدیدترین تحقیقات انجام شده (Park et al., 2026) با بررسی داده های بلندمدت هواشناسی و دبی در کره جنوبی نشان دادند علی رغم افزایش میانگین بارش ها، شرایط خشکسالی در اکثر مناطق وخیم تر شده است. همبستگی قوی و معنادار (با $r > 0.79$) میان شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) و شاخص جریان رودخانه استاندارد شده (SSI) اثبات کرد که افزایش تغییرپذیری و نوسانات هواشناختی، به کاهش قابلیت اطمینان و حجم آب در دسترس منجر شده است.

مطالعات زیادی در ایران به بررسی تغییرات بارشی و فرین های مرتبط با آن پرداختند. اما این موضوعات از نظر هدف صرفاً یک مشخصه بارشی را مورد بررسی قرار دادند. از جمله این مطالعات می توان به تحقیق Alizadeh-Choobari and Najafi (2017) اشاره کرد که با بررسی داده های بلندمدت نشان دادند که روند دما در بیشتر مناطق ایران افزایشی بوده، در حالی که مجموع بارش سالانه روندی کاهش را طی کرده و کشور را به سمت شرایطی خشک تر سوق داده است. (Gholami (2022) با مطالعه بیشینه بارش

روندهای خطی و تغییرات مجموع بارش های سالانه در مقیاس های منطقه ای پرداختند و تغییرات زیادی را برای بارش نشان داده است. در یکی از مطالعات (Zhai et al., 2005) با تحلیل داده های بارش نیم قرن اخیر چین نشان دادند که اگرچه مجموع بارش سالانه تغییر معناداری نداشته، اما کاهش تعداد روزهای بارانی همزمان با افزایش چشمگیر شدت بارش ها ثبت شده است. در همین راستا (Wang et al., 2013) دریافتند که در شمال غرب چین، همگام با افزایش میانگین بارش، شاخص های فرین بارشی نظیر بیشینه بارش یک روزه (RX1day) و پنج روزه (RX5day) نیز روند افزایشی معناداری را تجربه کرده اند. این همبستگی قوی میان میانگین بارش و فرین های جوی در مناطق کوهستانی نظیر رشته کوه هنگ دوان (Hengduan) نیز تایید شده است (Zhang et al., 2014). در تحقیقی دیگر، (Duan et al., 2015) در ژاپن با بهره گیری از روش موجک پیوسته نشان دادند که علی رغم کاهش مجموع بارش، بیشینه بارش های روزانه و همچنین روزهای خشک متوالی افزایش یافته است. گروه دوم از مطالعات به مدلسازی دوره های بازگشت و تحلیل توزیع فرین تعمیم یافته (GEV) پرداختند. این مطالعات به درک ترمودینامیکی و مدلسازی آماری فرین های بارشی پرداختند. از مطالعات انجام شده این گروه می توان به (Westra et al., 2013) اشاره کرد. نامبرده با تحلیل بیش از ۸۳۰۰ ایستگاه در سطح جهان و استفاده از توزیع فرین تعمیم یافته (GEV)، اثبات کردند که شدت بارش های فرین رابطه ای مستقیم با دمای میانگین جهانی دارد. یافته های آن ها نشان داد که شدت فرین های بارشی به ازای هر درجه کلونین گرمایش، با نرخی بین ۵/۹ تا ۷/۷ درصد افزایش می یابد که تطابق قابل توجهی با معادله ترمودینامیکی کلازیوس-کلاپیرون (Clausius-Clapeyron) دارد. در تحقیقی دیگر (Kunkel et al., 2020) که در ایالات متحده آمریکا انجام شده است با ترکیب فواصل بازگشت متوسط از ۱ تا ۲۰ سال با تداوم های ۱ تا ۳۰ روزه، نشان دادند که در بخش اعظم این کشور، روندهای افزایشی فرین های بارشی با دوره های

استفاده از توزیع فرین تعمیم‌یافته (GEV) در گستره جغرافیایی ایران، چارچوبی متقن برای طراحی زیرساخت‌های مقاوم، مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییر اقلیم ارائه نماید.

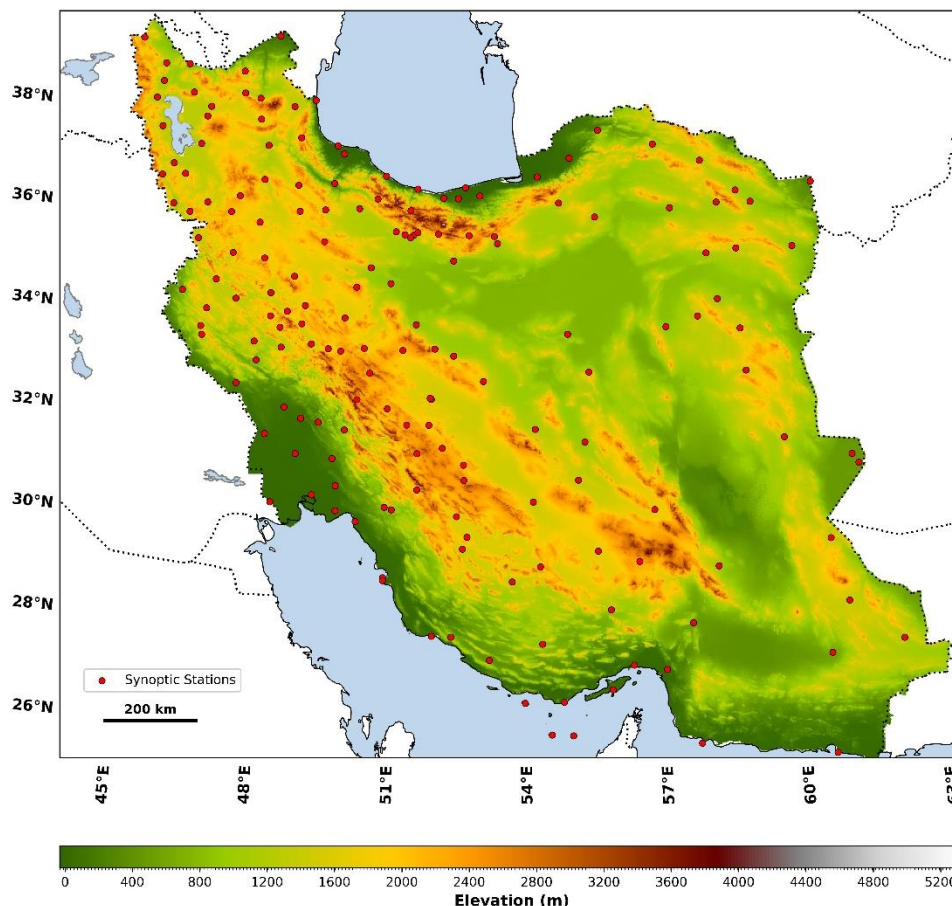
۲. روش تحقیق

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه جغرافیایی این پژوهش، کشور ایران است که با مساحتی بالغ بر ۱ میلیون ۶۴۸ هزار کیلومتر مربع در عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی گسترده شده است (شکل ۱). اقلیم ایران، بازتابی از شرایط اقلیم قاره‌ای است که با نوسانات شدید دمایی، بارش‌های کمتر از متوسط جهانی و رطوبت نسبی بسیار پایین شناخته می‌شود. ویژگی‌هایی که ایران را به شدت در برابر رخداد پدیده‌های فرین نظیر بارش‌های سیل‌آسا متوالی آسیب‌پذیر ساخته است. همانند الگوهای اقلیمی حاکم بر مناطق خشک، اقلیم ایران نیز تحت سیطره شرایط گرم-خشک قرار دارد و اثرگذاری سامانه‌های رطوبتی در آن محدود است.

سالانه در حوضه هراز، روش حداکثر درست‌نمایی را به عنوان مطلوب‌ترین رویکرد برای برآزش توزیع‌های آماری معرفی کرد. در مقیاسی کلان‌تر، Zarrin and Dadashi- (2022) Roudbari با بهره‌گیری از داده‌های MSWEP و توزیع فرین تعمیم‌یافته (GEV) دریافتند که بیشترین احتمال و شدت بارش‌های فرین در سواحل شمالی و جنوبی ایران متمرکز است، در حالی که بالاترین سطح عدم قطعیت مدل‌سازی به مناطق کوهستانی پربارش اختصاص دارد. بررسی رفتار زمانی و تداوم فرین‌های بارشی که توسط Asakereh & Ashrafi (2023) انجام شد نشان دادند که بارش‌های فرین در ایران دستخوش تغییر شده است. بطوریکه فراوانی بارش‌های فرین کوتاه‌مدت افزایش یافته، اما سهم و تداوم بارش‌های فرین بلندمدت کاهش یافته است.

مرور پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که برخلاف روند مطالعات انجام شده در سطح جهانی در بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته برای درک پارادوکس‌های اقلیمی، مطالعات داخلی در پهنه اقلیمی ایران عمدتاً به تحلیل‌های صرف فرین‌های بارشی پرداختند و شکاف عمیقی در ارزیابی همزمان رفتار فرین‌ها و روندهای بارشی وجود دارد. در راستای پر کردن این خلأ علمی، پژوهش حاضر به تحلیل تغییرات بارشی شامل مجموع سالانه، بیشینه روزانه و تعداد روزهای بارانی پرداخته و با



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مورد بررسی

۲-۲. داده‌ها

جهت تحلیل تغییرات متغیرهای بارشی شامل مجموع بارش سالانه (میلی‌متر)، بیشینه بارش روزانه (میلی‌متر) و تعداد روزهای بارانی (روز)، از داده‌های ۱۷۵ ایستگاه هواشناسی همدید در ایران استفاده شد (شکل ۱). انتخاب بازه زمانی ۲۵ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ میلادی) با هدف پوشش جدیدترین تغییرات بارشی در کشور، رخداد‌های فرین و دوره‌های خشکسالی اخیر در ایران صورت گرفته است؛ ضمن آنکه این دوره از نظر کفایت و پیوستگی شبکه ایستگاهی، بالاترین کیفیت و کمترین مقدار داده‌های گمشده را دارا بوده و طول دوره آن برای تحلیل روندهای اقلیمی اخیر در تطابق با استانداردهای اقلیم‌شناسی است. این داده‌ها در مقیاس روزانه از سازمان هواشناسی کشور اخذ و پس از اعمال کنترل کیفیت، جهت انجام پردازش‌های بعدی به مقیاس سالانه تجمیع شدند. به این صورت که برای روزهای بارانی، ابتدا تعداد این روزها برای هر سال به طور مجزا محاسبه شد و

سپس میانگین بلندمدت آن‌ها در طی دوره استخراج گردید. در مورد بیشینه بارش نیز، ابتدا بیشترین مقدار بارش روزانه در هر سال تعیین شد و در نهایت میانگین این مقادیر بیشینه سالانه در طول دوره آماری محاسبه شد تا رفتار اقلیمی این متغیر به درستی نمایان شود. همچنین برای مجموع بارش‌ها نیز پس از محاسبه مقادیر سالانه، میانگین بلندمدت کل دوره استخراج و مبنای نهایی تولید نقشه‌ها قرار گرفت.

۲-۳. روش تحقیق

به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش و ارزیابی دقیق فرین‌های بارشی، چارچوب روش‌شناسی در چهار گام پیوسته طراحی و اجرا شد. گام نخست شامل پیش‌پردازش، کنترل کیفی و ارزیابی همگنی سری‌های زمانی داده‌های هواشناسی است. گام دوم به تحلیل روند سری‌های زمانی با بهره‌گیری از آزمون ناپارامتری من-کندال تصحیح‌شده (جهت رفع اثر خودهمبستگی) اختصاص دارد. در گام سوم، بزرگی و نرخ تغییرات با استفاده از برآوردگر شیب سن محاسبه گردید. در

۳-۳-۲. **برآورد بزرگی روند با برآوردگر شیب سن**
 برای محاسبه نرخ خطی تغییرات بارش و مشخصه‌های آن در واحد زمان، آزمون شیب سن (Sen, 1968) به کار گرفته شد. این روش ناپارامتری به دلیل استفاده از میانه، مقاومت بسیار بالایی در برابر داده‌های پرت دارد. در این الگوریتم، ابتدا مجموعه‌ای از شیب‌های خطی برای تمام جفت داده‌های متوالی محاسبه می‌شود. در این پژوهش علاوه بر برآوردگر نقطه‌ای، حدود اطمینان بالا و پایین با سطح معنی‌داری ۹۵ درصد ($conf. level = 0.95$) نیز استخراج شد (Hipel and McLeod, 1994).

۳-۳-۴. مدل‌سازی دوره بازگشت با توزیع فرین تعمیم‌یافته (GEV)

جهت مدل‌سازی مقادیر فرین بارشی و برآورد سطوح بازگشت در دوره‌های تناوب مختلف (دوره‌های ۲ ساله، ۵ ساله، ۱۰ ساله، ۲۵ ساله، ۵۰ ساله و ۱۰۰ ساله)، از خانواده توابع توزیع مقادیر فرین تعمیم‌یافته (GEV) استفاده شد. این توزیع به طور نظری برای مدل‌سازی بیشینه‌های استخراج شده از بلوک‌های زمانی بزرگ طراحی شده است (Coles, 2001) و سه خانواده از توابع فرین شامل گامبل (Gumbel) با پارامتر شکل برابر صفر و دم سبک، فرشه (Frechet) با پارامتر شکل مثبت و دم سنگین و وایبول معکوس با پارامتر شکل منفی و دم بالایی محدود را در یک ساختار یکپارچه پوشش می‌دهد (Jenkinson, 1955). سطوح بازگشتی در این روش ذاتاً همان چندک‌های توزیع هستند.

به منظور حفظ انسجام ساختاری مقاله از ارائه بسط ریاضی و تشریح جزئیات معادلات آماری در متن صرف نظر شده است. شایان ذکر است که تمامی فرآیندهای محاسباتی این پژوهش شامل اجرای آزمون‌های ناپارامتری، مدل‌سازی نایستای مقادیر فرین و استخراج سطوح بازگشت در محیط R و به طور یکپارچه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته کتابخانه extRemes پیاده‌سازی و اجرا شده‌اند. از این رو، جهت بررسی دقیق‌تر ساختار توابع، الگوریتم‌های تخمین پارامتر و روابط بسط‌یافته ریاضی، می‌توان به راهنمای این کتابخانه رجوع کرد.

نهایت، گام چهارم بر مدل‌سازی مقادیر فرین و برآورد سطوح بازگشت از طریق توزیع فرین تعمیم‌یافته متمرکز است. در ادامه، جزئیات محاسباتی و تحلیلی هر یک از این مراحل تشریح شده است.

۳-۳-۱. کنترل کیفی و همگنی داده‌های هواشناسی

با توجه به اینکه وجود داده‌های پرت و خطاهای ثبت شده می‌تواند انحرافات قابل توجهی در تحلیل روند ایجاد کند، اجرای یک پیش‌پردازش دقیق امری اجتناب‌ناپذیر است. در این گام، کنترل کیفی داده‌ها انجام شد. برای این منظور در ایستگاه‌هایی که بیش از سه روز رکورد نامعتبر در یک ماه وجود داشت، کل داده‌های آن ماه از فرآیند محاسبه شاخص‌های فرین حذف شد. پس از پالایش اولیه، ارزیابی همگنی سری زمانی برای اطمینان از اینکه نوسانات تنها ناشی از تغییر اقلیم بوده و نه عوامل غیرطبیعی نظیر جابجایی ایستگاه و تغییر ابزارآلات یا محیط پیرامون، صورت گرفت. برای این منظور، از الگوریتم RHTest (Aguilar et al., 2009) استفاده شد که می‌تواند تغییرات پله‌ای چندگانه و مصنوعی را در سری‌های زمانی شناسایی و اثر آن‌ها را تعدیل نماید.

۳-۳-۲. تحلیل روند با آزمون من-کندال تصحیح شده

اغلب سری‌های زمانی هیدرو اقلیمی تحت تاثیر مشاهدات پیشین خود قرار دارند. استفاده از آزمون‌های ناپارامتری کلاسیک با وجود خودهمبستگی منجر به کاهش کاذب واریانس آماره و در نتیجه خطای نوع اول می‌شود. برای رفع این چالش، از آزمون من-کندال تصحیح شده مبتنی بر رویکرد تصحیح واریانس Hamed and Rao (۱۹۹۸) استفاده شد. در این روش، ابتدا روند سری‌های زمانی با استفاده از شیب سن (Sen's slope) حذف می‌شود. سپس حجم نمونه موثر یا N/N^* صرفاً با استفاده از رتبه‌های ضرایب خودهمبستگی معنی‌دار (رتبه اول) محاسبه می‌گردد. خروجی این روش شامل آماره تصحیح شده Z_c و مقدار احتمال جدید پس از تصحیح واریانس است (Rao et al., 2003).

۳. بحث

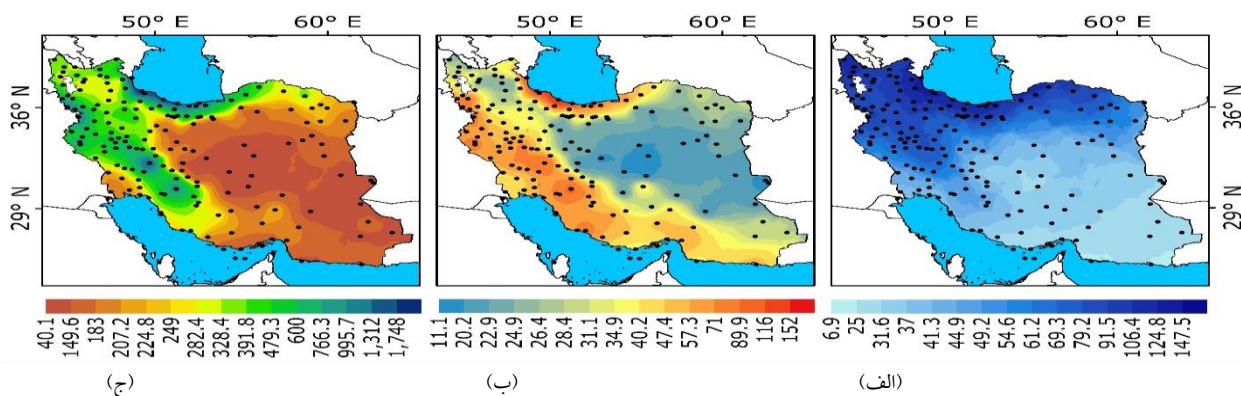
۳-۱. تحلیل مؤلفه‌های بارش و ارزیابی نقش واداشت‌های کوهساری

به منظور ارزیابی توزیع مکانی بارش، نقشه میانگین مجموع بارش سالانه بر مبنای داده‌های ۱۷۵ ایستگاه هواشناسی همدیدی طی بازه زمانی ۲۰۲۴-۲۰۰۰ تهیه گردید (شکل ۲-الف). بررسی توزیع فضایی این متغیر، اختلاف چشمگیری را در سطح کشور نشان می‌دهد؛ به طوری که مقادیر بیشینه مطلق با ثبت بیش از ۱۵۰۰ میلی‌متر در نوار ساحلی جنوب غربی دریای خزر متمرکز شده‌اند. همچنین در امتداد دامنه‌های غربی زاگرس، هسته‌های بارشی با مقادیری در بازه ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر حاکمیت دارند. در مقابل، پهنه‌های وسیعی از فلات مرکزی ایران با مقادیر ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر در شرایط کمینه بارشی قرار گرفته‌اند.

این توزیع ناهمگون، خروجی مستقیم تقابل عرض جغرافیایی و واداشت‌های کوهساری است. برخورد جریان‌های جوی با موانع کوهستانی (البرز و زاگرس)، صعود مکانیکی و آدیاباتیک توده‌های هوای مرطوب را در دامنه‌های رو به باد رقم می‌زند. پس از تخلیه رطوبتی در دامنه‌های بادگیر، توده‌های هوا هنگام نزول در دامنه‌های بادپناه تحت تأثیر گرمایش قرار گرفته و رطوبت نسبی آن‌ها شدیداً افت می‌کند. این سازوکار ترمودینامیکی که مفهوم سایه بارشی را تبیین می‌نماید، در تلفیق با فرونشینی دینامیکی هوا در عرض‌های میانی، اقلیم بیابانی خشک را در فلات مرکزی ایران تثبیت ساخته است (Kehl, 2009).

در بخش دوم، به منظور واکاوی رفتار سامانه‌های جوی، مجموع روزهای بارانی طی کل دوره آماری ۲۵ ساله مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۲-ب). داده‌های این شکل نشان می‌دهند که رژیم‌های باران‌زای شمالی در دامنه البرز و سواحل خزر با ثبت بیشترین مقدار (تا ۱۵۲ روز بارانی در میانگین دوره آماری)، بالاترین فراوانی رخداد بارش را به خود اختصاص داده‌اند. زاگرس غربی نیز با ثبت فراوانی بالایی از روزهای بارانی، الگوی پاییزه-زمستانه سامانه‌های برون‌حاره‌ای را به خوبی منعکس می‌سازد. در نقطه مقابل، فلات مرکزی و حوضه‌های شرقی با کمترین مجموع روزهای بارانی در کمینه مطلق قرار دارند. علت کلیدی این الگوی فضایی را باید در استمرار نفوذ امواج غربی در عرض‌های بالاتر تلفیق‌شده با صعود کوهساری مداوم در ارتفاعات البرز جستجو کرد که این فراوانی بالا را در نوار شمالی رقم زده‌اند. از منظر دینامیک جوی، شرایط حاکم بر این پهنه بیانگر یک رژیم بارشی با فراوانی بالا و شدت توزیع‌شده است که پتانسیل ایجاد بارش‌های پایدار با نرخ بارش پایین را فراهم می‌آورد (شکل ۲-ج).

از منظر دینامیک جوی، شرایط حاکم بر این پهنه بیانگر یک رژیم بارشی با فراوانی بالا و شدت توزیع‌شده است که پتانسیل ایجاد بارش‌های پایدار با نرخ بارش پایین را فراهم می‌آورد (شکل ۲-ج).



شکل ۲. مؤلفه‌های بارشی در ایران طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ بر اساس داده‌های مشاهداتی. الف) روزهای بارانی (روز)، ب) بیشینه بارش یک روزه (میلی‌متر) و ج) مجموع بارش سالانه (میلی‌متر)

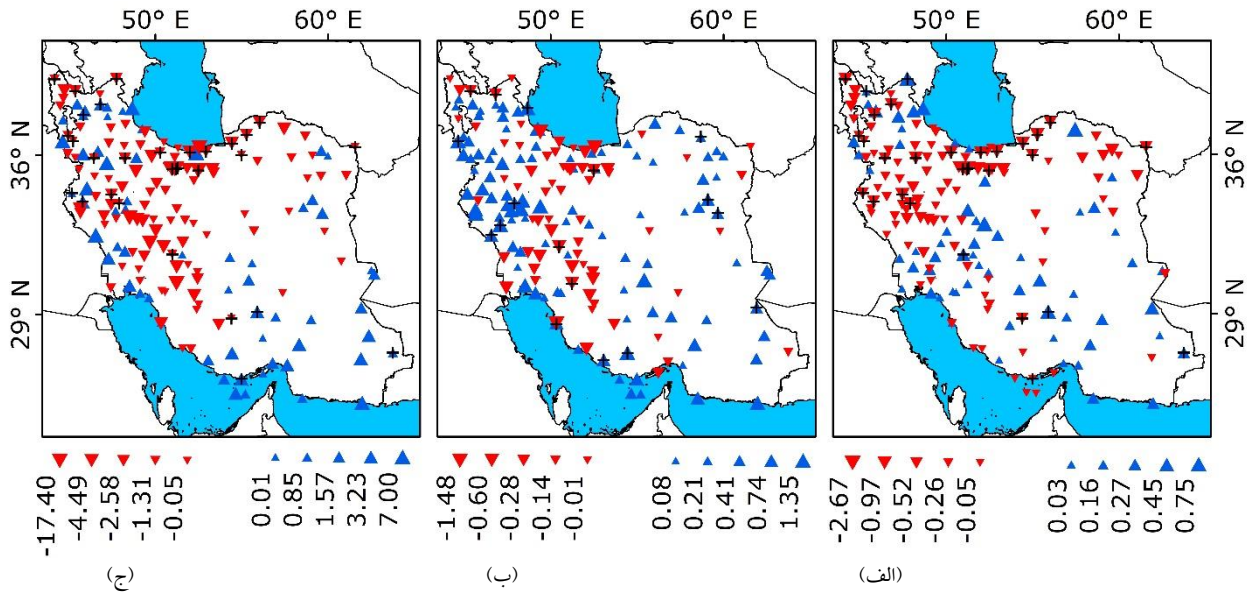
۲-۳. تحلیل روندهای مؤلفه‌های بارشی ایران

تحلیل فضایی مجموع بارش سالانه در فلات ایران طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، حاکی از غلبه روند کاهشی و به بیان دقیق‌تر، تشدید شرایط خشکی اقلیمی در بخش وسیعی از کشور است (شکل ۳-الف). داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهد که در ۶۳/۴۲ درصد از مساحت کشور، بارش سالانه روند منفی را تجربه می‌کند. شیب تند این روند کاهشی عمدتاً در دامنه‌های جنوبی البرز متمرکز است؛ به طوری که هسته‌های اصلی این کاهش در ایستگاه‌های فیروزکوه، درود، بیارجمند، مهدیشهر، تهران (ژئوفیزیک)، چیتگر و سمنان قرار دارند. در مقابل، روندهای افزایشی مجموع بارش، تنها محدود به ۳۶/۵۷ درصد از گستره کشور بوده و به صورت محلی و مجزا در مناطقی نظیر لار، جزیره کیش و بیجار مشاهده می‌شوند (شکل ۳-ج).

برخلاف بارش‌های سالانه، روند متغیر بیشینه بارش یک‌روزه (Rx1day) انحرافی آشکار و الگویی ناهمگون در مقایسه با میانگین‌های بلندمدت نشان می‌دهد. توزیع فضایی این شاخص حاکی از آن است که اگرچه در ۵۸/۸۵ درصد از ایستگاه‌ها شیب تغییرات مثبت بوده است و ۴۱/۱۵ درصد مابقی روند کاهشی یا فاقد روند را تجربه کرده‌اند، اما این سیگنال افزایشی تنها در ۱۴/۵۶ درصد از کل شبکه ایستگاهی از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. با توجه به پایین بودن سهم ایستگاه‌های دارای روند معنی‌دار، نمی‌توان وقوع یک روند افزایشی یکپارچه و فراگیر را برای بارش‌های فرین در سطح ایران تأیید کرد؛ بلکه این مقادیر نمایانگر تشدید محلی و نقطه‌ای رخدادهای فرین است. وردایی این فرین‌های محلی، گستره‌ای از غرب، شمال غرب، شمال شرق و به ویژه خطوط ساحلی جنوب را در بر می‌گیرد (شکل ۳-ب). گستره این الگوی افزایشی در نوار ساحلی

خلیج فارس و دریای عمان، با رخدادهای فرین اخیر نظیر بارش بیش از ۱۴۰ میلی‌متر در کیش (آذر ۱۴۰۴) و سیلاب‌های هرمزگان، بوشهر (آذر ۱۳۹۹) و دشتیاری (اردیبهشت) انطباق فضایی دارد. تمرکز بارش‌های سنگین در پهنه‌هایی با روند منفی بارش سالانه، نشان‌گر تقویت ناپایداری‌های همرفتی و پاسخ ترمودینامیکی جو به گرمایش است؛ سازوکاری که ظرفیت نگهداری رطوبت جو را بالا برده و آن را به نفع رخدادهای رگباری تخلیه می‌کند.

سازوکار این رخدادهای ریشه در دگرگونی توزیع زمانی روزهای بارشی دارد. فراوانی روزهای بارانی در ۶۸ درصد از ایران دارای روند کاهشی است. روند کاهشی ۱۷/۶۴ درصد از ایستگاه‌ها در سطح $p \leq 0.05$ معنی‌دار است. دامنه‌های جنوبی البرز، خزر شرقی، غرب، شمال غرب و شرق ایران کانون‌های اصلی این روند کاهشی روزهای بارانی محسوب می‌شوند (شکل ۳-الف). بیشینه روند کاهشی معنی‌دار در تهران (ژئوفیزیک)، چیتگر، فیروزکوه، سهند، بندرلنگه، ساری و گنبد کاووس به ثبت رسیده است. یک الگوی روند منطقه‌ای روزهای بارانی در جنوب شرق ایران دیده می‌شود. در این پهنه به استثنای یک ایستگاه، همگرایی کاملی میان روند افزایشی روزهای بارانی، بیشینه بارش و مجموع سالانه وجود دارد. رفتار آماری این متغیرها در جزایر جنوبی با بارش‌های سیل‌آسا در سال‌های اخیر در این منطقه همخوانی دارد. افزایش حجم و شدت بارش دقیقاً همزمان با تقلیل روزهای بارانی رخ داده است. این تمرکز زمانی به معنای تخلیه حجم عظیمی از آب قابل بارش در دوره زمانی بسیار کوتاه است. جایگزینی توزیع متوازن بارشی با بارش‌های رگباری، ضمن تشدید پتانسیل تخریب زیرساخت‌ها و فرسایش خاک، چرخه هیدرولوژیک را به سمت بی‌نظمی سوق می‌دهد.



شکل ۳. روند مولفه‌های بارشی در ایران طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ بر اساس داده‌های مشاهداتی. الف) روزهای بارانی (روز)، ب) بیشینه بارش یک روزه (میلی‌متر) و ج) مجموع بارش سالانه (میلی‌متر). مثلث‌های قرمز روند افزایشی و مثلث‌های آبی روند کاهشی را نشان می‌دهند ایستگاه‌هایی که با رنگ سیاه برجسته مشخص شدند روند در سطح $p \leq 0.05$ معنی‌دار است.

این شکل نشان می‌دهد که هسته اصلی این ویژگی آماری در حوضه خلیج فارس متمرکز است؛ به طوری که ایستگاه‌های واقع در استان هرمزگان شامل جزایر ابوموسی، کیش، قشم، سیری و بندرلنگه این الگو را با شدت بیشتری تجربه می‌کنند و اقلیم جدیدی نیز در پهنه‌های شمال‌غرب و غرب شکل گرفته است. در تحلیل این یافته، تمرکز بارش‌های سنگین در روزهای کمتر نشان‌دهنده تغییر در دینامیک سامانه‌های جوی است که با نتایج مطالعات گذشته مطابقت دارد (Jamali et al., 2022). اهمیت این نتیجه از آن جهت است که با رخداد‌های فرین اخیر کاملاً همخوانی دارد؛ به‌عنوان مثال، سیل بی‌سابقه ۲۵ و ۲۶ آذر ۱۴۰۴ در جزیره کیش که رکورد بارش حدود ۱۴۱ میلی‌متر را ثبت کرد، نمود بارز این الگوی آماری است (Asr Iran, 2025).

در نهایت، مطابق با نتایج ارائه شده در شکل (۴-ج)، بررسی مولفه‌های سه‌گانه بارش در ۱۷۵ ایستگاه هواشناسی همدیدی طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که در بیش از ۲۱ درصد از ایستگاه‌های مورد بررسی، روند کاهشی بارش‌های تجمعی سالانه با روند افزایشی مقادیر بیشینه روزانه همگرا شده است. این شکل به روشنی نشان می‌دهد که این ویژگی آماری، رفتار جوی مناطق غرب، شمال‌غرب، شمال‌شرق و

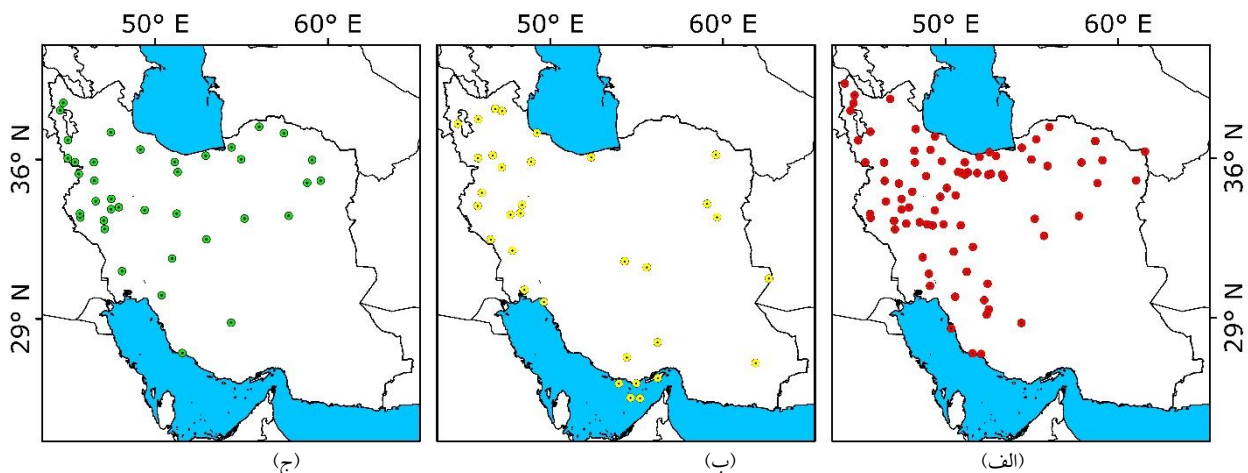
۳-۳. تحولات ساختاری و تغییر رفتار رژیم بارشی ایران

همان‌طور که در شکل (۴-الف) به تصویر کشیده شده است، یک الگوی خشکی فراگیر در ایران وجود دارد. این شکل نشان می‌دهد که بیش از ۴۵ درصد از ایستگاه‌ها روند کاهشی توأمان در مقادیر بارش سالانه و روزهای بارانی را ثبت کرده‌اند و از نظر جغرافیایی، این الگو بیشتر در نوار ساحلی خزر، زاگرس و شمال‌غرب گسترش یافته است. در بیان علت و تحلیل این توزیع فضایی، باید اشاره کرد که این مناطق از نظر فیزیکی با تضاد خشکی‌افزایی (Dry-gets-Drier) در تطابق هستند. در این تضاد اقلیمی، روند افزایشی آستانه‌های تبخیر-تعرق پتانسیل و کسری رطوبت خاک به شدت غالب می‌شود که با شرایط اقلیم فعلی ایران همخوانی کامل دارد. این سازوکار خشکی‌افزایی پیش‌تر نیز در مطالعات (Zaitchik et al., 2023) به‌عنوان یکی از پیامدهای کلیدی تغییر اقلیم مورد بحث قرار گرفته و نتایج این پژوهش، توسعه آن را در مناطق یادشده تایید می‌کند.

از سوی دیگر، بر اساس داده‌های شکل (۴-ب)، روند افزایشی بارش همراه با روند کاهشی روزهای بارانی در ۸۵/۱۸ درصد از ایستگاه‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود.

مبنی بر تغییر رفتار سامانه‌های بارشی همسو است. درستی میدانی این روند آماری از طریق پایش رخداد‌های بارش سیل آسا در سال‌های اخیر در لرستان (پل دختر، نورآباد و کوه‌دشت)، آذربایجان غربی (خوی، سلماس، سردشت و نقده) و گلستان (گرگان و مراوه‌تپه) اثبات شده و پاسخ‌های این ساختار جوی به شکل سیلاب‌های ناگهانی در شمال غرب (۱۳۹۶)، پل دختر و آق‌قلا (۱۳۹۸) و مشهد (۱۴۰۳) نمود فیزیکی یافته است.

دامنه‌های جنوبی البرز را تحت کنترل دارد. در تحلیل علت این تغییر فاز قطعی به سوی فرین‌های هیدرومتئورولوژیک، می‌توان گفت که تشدید محلی بارش‌های کوتاه‌مدت از نظر ترمودینامیکی با مقیاس‌بندی کلازیوس-کلاپرون انطباق دارد؛ به طوری که افزایش ظرفیت رطوبتی جو در ترکیب با سازمان‌یافتگی همرفتی میان‌مقیاس، مقدار بارش در هر سامانه را به شدت افزایش داده است. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات پیشین (Bayat-Afshary & Danesh-Yazdi, 2023)



شکل ۴. روند توامان مولفه‌های بارشی در ایران طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ بر اساس داده‌های مشاهده‌ای. الف) روند همزمان کاهش مجموع بارش سالانه و روزهای بارانی، ب) روند همزمان افزایش بارش و روند کاهش روزهای بارانی و ج) روند همزمان کاهش بارش سالانه همراه با روند افزایشی مقادیر بیشینه روزانه.

پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE) را به صورت انفجاری آزاد کرده و منجر به رخداد‌های فرین با پتانسیل هیدرولوژیکی ویرانگر می‌شود. در پهنه شمالی (البرز)، فرین‌های روزانه در بازه ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر محدود شده‌اند که اثبات‌کننده ماهیت کمتر همرفتی سیستم‌های پایدار خزری است. گرادیان شرقی-غربی فرین‌های بارشی در ایران، تحت کنترل شدید ساختارهای توپوگرافیک قرار دارد. پهنه‌های غربی زاگرس و نوار شمالی البرز هسته‌های اصلی بیشینه بارش را تشکیل می‌دهند؛ برآوردهای GEV مقادیر فراتر از ۱۰۰ میلی‌متر را برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله را ثبت کرده‌اند. مقادیر بارش در فلات مرکزی و دشت لوت به دلیل استقرار در سایه بارش، به مقادیر کمتر از ۴۰ میلی‌متر تقلیل می‌یابند (شکل ۵).

پاسخ سیستم جوی به دوره‌های بازگشت، بارشدنمایی شدت فرین‌های بارشی و تغییرات شدید در گشتاورهای آماری

۳-۴. برآورد دوره‌های بازگشت بیشینه بارش روزانه بر پایه تابع توزیع تعمیم‌یافته فرین (GEV)

بر اساس برآزش توزیع GEV، پاسخ ترمودینامیکی سامانه‌های همرفتی در عرض‌های پایین‌تر، رژیم فرین‌ها را به سمت رخداد‌هایی با شدت بالا و فراوانی پایین سوق می‌دهد؛ ساختاری که با الگوی بارش‌های با فراوانی بالا اما با شدت تعدیل‌یافته در نوار شمالی، تضاد فیزیکی و آماری معناداری دارد. بیشینه بارش روزانه در دامنه‌های جنوبی زاگرس مقادیر فرین ۱۰۰ تا بیش از ۱۵۰ میلی‌متر در روز را ثبت کرده است. این مناطق علی‌رغم دارا بودن میانگین بارش سالانه متوسط (۳۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر) و تعداد روزهای بارانی محدود (۵۰ تا ۸۰ روز)، مستعد تولید مخاطرات جوی نظیر سیلاب‌های گسترده هستند. فرارفت رطوبت سطح پایین از خلیج فارس به سمت دامنه‌های پرشیب زاگرس جنوبی، همرفت عمیق مرطوب را آغاز می‌کند. این سازوکار کوهساری، انرژی

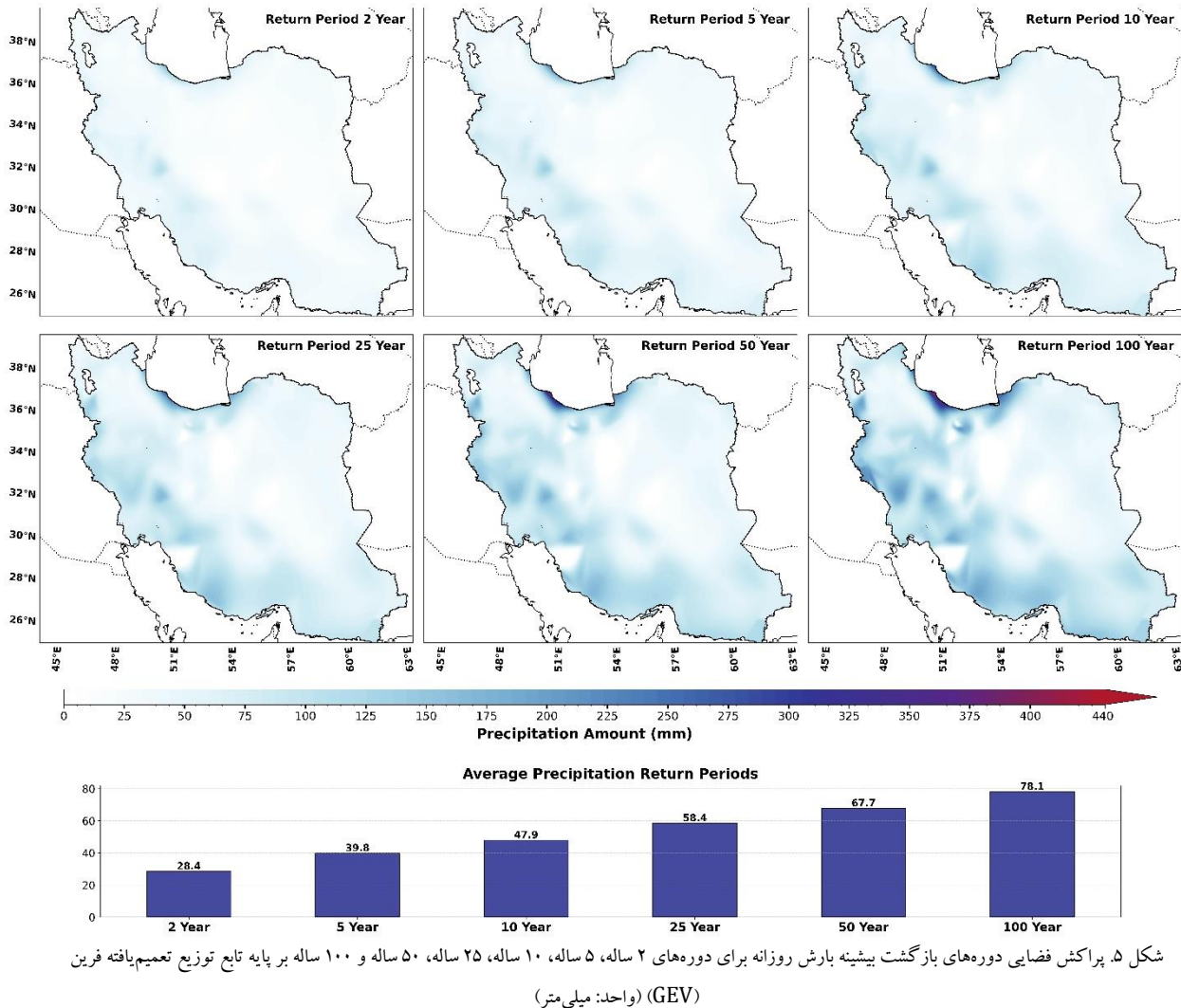
می‌کند. پارامتر شکل (ξ) در دامنه‌های جنوبی زاگرس مقادیر مثبت ($0 < \xi$) به خود می‌گیرد. این رفتار مجانبی، معرف توزیع فرشه است که احتمال وقوع رخداد‌های فرین با شدت‌های خارج از مقادیر نرمال را به شدت افزایش می‌دهد. دوره بازگشت‌های ۵۰ و ۱۰۰ ساله مدل‌سازی شده برای این پهنه‌های جنوبی، حجم بارشی فراتر از ظرفیت نفوذپذیری خاک را پیش‌بینی می‌کند. فلات مرکزی با پارامتر مکان (μ) و مقیاس (σ) بسیار پایین، از توزیع وایبول ($0 < \xi$) با کران بالای محدود تبعیت می‌کند. بر اساس اصول دینامیک و ترمودینامیک جوی، پاسخ غیرخطی جو به گرادیان‌های دمایی-رطوبتی عرض‌های جغرافیایی از طریق سازوکارهای نظیر تشدید ناپایداری‌های باروکلینیک و انتقال شار رطوبتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی توزیع فضایی فرین‌های بارش و پتانسیل ریسک سیلاب‌های ناگهانی در سامانه اقلیمی ایران ایفا می‌کند (Lashkari & Esfandiari, 2021)

پاسخ غیرخطی جو به گرادیان‌های دمایی-رطوبتی عرض‌های جغرافیایی، توزیع فضایی فرین‌های بارش و ریسک سیلاب‌های ناگهانی را در سامانه اقلیمی ایران کنترل می‌کند.

توزیع همراه است. میانگین پهنه‌ای بیشینه بارش روزانه از مرز ۲۰ میلی‌متر در دوره بازگشت ۲ ساله عبور کرده و به مقادیر فراتر از ۶۰ میلی‌متر در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله افزایش می‌یابد. انحراف معیار و واریانس مقادیر مدل‌سازی شده در بازه‌های زمانی طولانی‌تر، به ویژه در مناطق غربی، بسط چشمگیری می‌یابند. این رفتار آماری در سطوح بالای بازگشت، نمایانگر عدم قطعیت ذاتی در رفتار مجانبی رخداد‌های فرین حاکم بر اقلیم‌های نیمه‌خشک است. سازوکارهای عرض‌های جغرافیایی بالاتر در البرز شمالی، دینامیک متفاوتی را در مواجهه با مناطق غربی ایجاد کرده است. این منطقه فرین‌هایی بیشینه بارشی یک روزه ۵۰ تا ۸۰ میلی‌متر را برای دوره بازگشت ۵۰ ساله را ثبت کرده است. خشکی ذاتی جو بر فراز فلات مرکزی ایران، میانگین مقادیر را در مقایسه با مناطق غربی و شمالی کاهش داده است که امری طبیعی است (شکل ۵).

مدلسازی احتمالی این فرین‌های بارشی با استفاده از توزیع مقدار فرین تعمیم‌یافته (GEV)، ناهمگنی اساسی را در ساختار پارامتریک (μ, σ, ξ) مناطق مختلف اقلیمی اثبات

^۱ رفتار مجانبی به وضعیتی گفته می‌شود که یک تابع یا نمودار، در مقادیر بسیار بزرگ (مثلاً وقتی $X \rightarrow \infty$) چگونه رفتاری از خود نشان می‌دهد و به چه مقداری نزدیک می‌شود.



شکل ۵. پراکنش فضایی دوره‌های بازگشت بیشینه بارش روزانه برای دوره‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ ساله بر پایه تابع توزیع تعمیم‌یافته فرین (GEV) (واحد: میلی‌متر)

روندی افزایشی (۱۴/۵۶ درصد در سطح معنی‌داری $p \leq 0.05$) را تجربه کرده است. رخداد همزمان کاهش بارش سالانه و افزایش مقادیر بیشینه روزانه در بیش از ۲۱ درصد از ایستگاه‌ها به‌ویژه در غرب، شمال‌غرب و دامنه‌های جنوبی البرز، نمایانگر یک پارادوکس اقلیمی در سطح کشور است. این واگرایی آماری، تطابق بالایی با نتایج ارائه‌شده توسط Duan et al., (2015) در ژاپن دارد. آن‌ها نیز دریافتند که به‌رغم کاهش بارش‌های سالانه و فصلی، شاخص‌های فرین نظیر $R99p$ و $Rx1day$ افزایش یافته‌اند. افزون بر این، نتایج به دست آمده در ایران با نتایج ارائه‌شده توسط Park et al., (2026) در کره جنوبی همخوانی دارد؛ بطوریکه افزایش تغییرپذیری‌های جوی، بارش‌های سیل‌آستری را در کره جنوبی رقم زده است.

۴. نتیجه‌گیری

تحلیل همزمان مؤلفه‌های بارشی و رفتار هیدرومتئورولوژیک در ایران نشان از یک تغییر ساختاری و بی‌نظمی در چرخه هیدرولوژیک کشور دارد. نقش دو عامل واداشت‌های کوهساری و دینامیک عرض‌های جغرافیایی، به شکل‌گیری یک گرادیان فضایی شدید بارش منجر شده است؛ به‌طوریکه تضاد آشکاری میان بارش‌های بیش از ۱۵۰۰ میلی‌متر در سواحل جنوبی دریای خزر و مقادیر ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر فلات مرکزی وجود دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد که ۶۳/۴۲ درصد از ایران تحت سیطره یک رژیم خشک فراگیر باروند کاهشی مجموع بارش سالانه قرار دارد. با این وجود، متغیر بیشینه بارش روزانه ($Rx1day$) در بیش از ۵۸ درصد از ایستگاه‌های کشور

(Heavy-tailed) است که خطر رخداد بارش‌های بسیار شدید (۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر) با فراوانی پایین را در این مناطق، به واسطه فرارفت رطوبتی از خلیج فارس، به شدت بالا می‌برد. در نقطه مقابل، فلات مرکزی با مقادیر منفرد و پارامتر شکل منفی ($\xi < 0$)، از توزیع ویبول پیروی می‌کند. رشد نمایی شدت بارش در دوره‌های بازگشت طولانی عبور میانگین پهنه‌ای از ۲۰ میلی‌متر در بازگشت ۲ ساله به بیش از ۷۰ میلی‌متر در دوره ۱۰۰ ساله یک تهدید جدی برای افزایش رخدادهای سیل آسا در کشور است.

مهم‌ترین نتیجه این تحقیق، تطابق تغییرات بارش ایران طی دهه‌های اخیر با پارادایم‌های پذیرفته‌شده جهانی است. بطوریکه شواهد جهانی نیز نشان از روند کاهشی محسوس سهم بارش‌های سبک و روند افزایشی همزمان شدت و فراوانی بارش‌های سنگین دارند (Karl & Knight, 1998; Min et al., 2011). نمونه روشن تغییر ساختاری در اقلیم ایران، تقابل معنادار روند کاهشی فراگیر روزهای بارانی با روند افزایشی شاخص‌های فرین همانند $Rx1day$ و رخدادهای سیل آسای کشور است. در تبیین ترمودینامیکی این پدیده، نتایج پژوهش حاضر مستقیماً سازوکار و دلایل فیزیکی ارائه‌شده توسط (Hennessy et al., 1997) را تایید می‌کند. بر این اساس، سامانه اقلیمی ایران برای حفظ توازن خود در برابر گرمایش جهانی و تغییرات چرخه هیدرولوژیکی، رطوبت انباشته‌شده را در دوره زمانی بسیار کوتاه و با شدت به‌مراتب بالاتری تخلیه می‌نماید. پیامد این سازوکار فیزیکی در ایران به‌روشنی اثبات شده است، بطوریکه کاهش بارش‌های ملایم و الگوهای بارشی پایدار در روند کاهشی تعداد روزهای بارانی و روند افزایشی بیشینه بارش روزانه در کشور مشهود است. این تغییرات اساسی چرخه آب را کشور به سمت بی‌نظمی سوق داده و تاب‌آوری زیرساخت‌های کشور را با چالش‌های بی‌سابقه‌ای مواجه می‌سازد.

۵. تشکر و قدردانی

کاهش معنی‌دار روزهای بارانی در ۶۸ درصد از گستره کشور، در کنار رخداد بارش‌های سیل آسا مانند رکورد استثنایی ۱۴۱ میلی‌متر در جزیره کیش در آذر ۱۴۰۴، اثبات می‌کند که رژیم توزیع متوازن بارش در ایران جای خود را به رگبارهای کوتاه‌مدت اما با حجم عظیم تخلیه رطوبتی داده است. در ۱۸/۵۸ درصد از ایستگاه‌ها که عمدتاً در نوار ساحلی خلیج فارس و شمال‌غرب قرار دارند، افزایش مجموعه بارش سالانه دقیقاً با کاهش روزهای بارانی رخ داده است. این نتیجه، با یافته‌های (Zhai et al., 2005) در چین مطابقت دارد. آن‌ها نیز نشان دادند کاهش تعداد روزهای بارانی در کنار افزایش میانگین شدت بارش، به منجر به افزایش رخدادهای فرین منجر می‌شود. از دیدگاه ترمودینامیکی، این سازوکار فیزیکی تابعی از قانون کلازیوس-کلاپیرون است. همان‌طور که (Westra et al., 2013) در مقیاس جهانی و (Kunkel et al., 2020) در ایالات متحده نشان دادند، گرمایش جهانی ظرفیت نگهداری آب قابل بارش را در جو افزایش می‌دهد. در اقلیم ایران، این رطوبت انباشته‌شده به محض مواجهه با ناپایداری‌های همرفتی میان‌مقیاس، انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE) را به‌صورت انفجاری آزاد کرده و ظرفیت جو را در قالب رخدادهای رگباری مخرب تخلیه می‌کند.

تحلیل‌های همزمان مولفه‌های بارشی نشان داد که بیش از ۴۵ درصد از ایستگاه‌ها شامل زاگرس، شمال‌غرب و نوار ساحلی خزر روند کاهشی توأمان در مجموع بارش سالانه و روزهای بارانی را ثبت کرده‌اند. این رفتار سیستماتیک که منجر به تشدید کسری رطوبت خاک و افزایش آستانه‌های تبخیر-تعرق پتانسیل می‌شود، با پارادایم شناخته‌شده خشکی افزایشی مطابقت دارد. این الگو، هم‌راستا با ارزیابی‌های جهانی (Xiong et al., 2022) است.

مدل‌سازی فرین‌های بارشی تحت توزیع فرین تعمیم‌یافته (GEV)، ناهمگنی اساسی را در ساختار فرین‌های بارشی مناطق مختلف ایران آشکار ساخت. در دامنه‌های جنوبی زاگرس، مقادیر پارامتر شکل مثبت است ($\xi > 0$). این رفتار مجانبی نشان‌دهنده توزیع فرشه (Fréchet) با دم‌سنگین

- of floods increasing in Iran due to climate change? Implications from a 50-year analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 68(15), 2243-2261.
- 11.(EN) Coles, S. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer-Verlag.
 - 12.(EN) Duan, W., He, B., Takara, K., Luo, P., Hu, M., Alias, N. E., & Nover, D. (2015). Changes of precipitation amounts and extremes over Japan between 1901 and 2012 and their connection to climate indices. *Climate Dynamics*, 45, 2273-2292.
 - 13.(EN) Fang, Z., Morales, A. B., Wang, Y., & Lombardo, L. (2025). Climate change has increased rainfall-induced landslide damages in central China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 119, 105320.
 - 14.(EN) Gholami, A. (2022). Comparative Study of the Best Methods for Estimating Maximum Annual Precipitation in Selected Stations of Haraz River. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(1), 163-183.
 - 15.(EN) Granata, F., Zhu, S., & Di Nunno, F. (2025). Hydrological extremes in the Mediterranean basin: interactions, impacts, and adaptation in the face of climate change. *Regional Environmental Change*, 25(3), 100.
 - 16.(EN) Guan, Y., Gu, X., Slater, L. J., Li, X., Li, J., Wang, L., ... & Zhang, X. (2024). Human-induced intensification of terrestrial water cycle in dry regions of the globe. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1), 45.
 - 17.(EN) Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196.
 - 18.(EN) Hennessy, K. J., Gregory, J. M., & Mitchell, J. F. B. (1997). Changes in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions. *Climate Dynamics*, 13, 667-680.
 - 19.(EN) Hipel, K. W., & McLeod, A. I. (1994). *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*. Elsevier Science.
 - 20.(EN) IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- از سازمان هواشناسی کشور بخاطر در اختیار قرار دادن داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی تشکر و قدردانی می‌شود.
- ### منابع
1. (EN) Abdolmanafi, A., Saghafian, B., & Aminyavari, S. (2025). Classification of design precipitation intensities for different return periods in Iran. *Earth Science Informatics*, 18(3), 308.
 2. (EN) Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C., & Wieringa, J. (2003). Guidelines on climate metadata and homogenization. World Meteorological Organization, WMO-TD No. 1186, 55 pp.
 3. (EN) Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., ... & Rahimzadeh, F. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
 4. (EN) Alizadeh-Choobari, O. and Najafi, M. S. (2017). Trends and changes in air temperature and precipitation over different regions of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(3), 569-584.
 5. (EN) Alizadeh-Choobari, O., & Najafi, M. S. (2018). Extreme weather events in Iran under a changing climate. *Climate dynamics*, 50(1), 249-260.
 6. (EN) American Society of Civil Engineers (ASCE). (2016). Failure to act: Closing the infrastructure investment gap for America's economic future. ASCE Report.
 7. (EN) Asakereh, H., & Ashrafi, S. (2023). An investigation into trends in frequency and proportion of different durations of various types of extreme precipitation in Iran. *Meteorological Applications*, 30(1), e2117.
 8. (EN) Ashley, S. T., & Ashley, W. S. (2008). Flood fatalities in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3), 805-818.
 9. (FA) Asr Iran. (2025, December 17). Record-breaking rain in Kish; 141 mm in less than 24 hours. News code: 1124418. Retrieved from <https://www.asriran.com/fa/news/1124418>
 - 10.(EN) Bayat-Afshary, N., & Danesh-Yazdi, M. (2023). Are the magnitude and frequency

- 31.(EN) Min, S. K., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Hegerl, G. C. (2011). Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470(7334), 378–381.
- 32.(EN) Mirzaei Hassanlu, A., Erfanian, M., Javan, K., & Najafi, M. R. (2024). Daily precipitation concentration and Shannon's entropy characteristics: spatial and temporal variability in Iran, 1966–2018: A. Mirzaei Hassanlu et al. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(1), 489-511.
- 33.(EN) Naseer, U., Ahmad, A., Adnan, M., Yousaf, M., Du, Z., Qiu, C., & Yue, T. (2025). Spatial distribution and health risk assessment of potentially toxic elements along GT road from Sialkot to Rawalpindi. *Environmental Advances*, 20, 100632.
- 34.(EN) NOAA. (2017). U.S. billion-dollar weather and climate disasters. National Centers for Environmental Information (NCEI).
- 35.(EN) Park, S., Western, A. W., & Peel, M. C. (2026). Climate change paradox: worsening droughts amidst increasing average precipitation across South Korea. *Journal of Hydrology*, 665, 134658.
- 36.Rao, A. R., Hamed, K. H., & Chen, H.-L. (2003). Nonstationarities in hydrologic and environmental time series. Ringgold Inc.
- 37.(EN) Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.
- 38.(EN) Shahzad, F., Mehmood, K., Anees, S. A., Adnan, M., Haidar, I., Jabbarov, U., ... & Oliveira, M. (2026). Remote sensing analysis of forest fire impacts on ecosystem productivity, greenhouse gas emissions, and fire risk in Pakistan. *Carbon Balance and Management*.
- 39.(EN) Sharma, A., Wasko, C., & Lettenmaier, D. P. (2018). If precipitation extremes are increasing, why aren't floods?. *Water Resources Research*, 54, 8545–8551.
- 40.(EN) Thomas, M. A., Michaelis, A. C., Oakley, N. S., Kean, J. W., Gensini, V. A., & Ashley, W. S. (2024). Rainfall intensification amplifies exposure of American Southwest to conditions that trigger postfire debris flows. *NPJ Natural Hazards*, 1(1), 14.
- 41.(EN) Touma, D., Stevenson, S., Swain, D. L., Singh, D., Kalashnikov, D. A., & Huang, X. (2022). Climate change increases risk of
- 21.(EN) Jamali, M., Gohari, A., Motamedi, A., & Haghghi, A. T. (2022). Spatiotemporal changes in air temperature and precipitation extremes over Iran. *Water*, 14(21), 3465.
- 22.(EN) Jenkinson, A. F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81, 158–171.
- 23.(EN) Karl, T. R., & Knight, R. W. (1998). Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 231–242.
- 24.(EN) Kehl, M. (2009). Quaternary climate change in Iran—the state of knowledge. *Erdkunde*, 1-17.
- 25.(EN) Keikhosravi-Kiany, M. S., Masoodian, S. A., & Balling Jr, R. C. (2023). Reliability of satellite-based precipitation products in capturing extreme precipitation indices over Iran. *Advances in Space Research*, 71(3), 1451-1472.
- 26.(EN) Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Hegerl, G. C. (2007). Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *Journal of Climate*, 20(8), 1419–1444.
- 27.(EN) Kunkel, K. E., Karl, T. R., Squires, M. F., Yin, X., Stegall, S. T., & Easterling, D. R. (2020). Precipitation extremes: Trends and relationships with average precipitation and precipitable water in the contiguous United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59, 125–142.
- 28.(FA) Lashkari, H. and Esfandiari, N. (2021). Synoptic and thermodynamic patterns of atmospheric rivers associated to heavy precipitation in the cold period of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(29), 125-144.
- 29.(EN) Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., ... & Ruane, A. C. (2024). Climate change 2023 synthesis report summary for policymakers. CLIMATE CHANGE 2023 synthesis report: summary for policymakers.
- 30.(EN) Malaekheh, S., Safaie, A., Shiva, L., & Tabari, H. (2022). Spatio-temporal variation of hydro-climatic variables and extreme indices over Iran based on reanalysis data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(11), 3725-3752.

- extreme rainfall following wildfire in the western United States. *Science advances*, 8(13), eabm0320.
- 42.(EN) Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205–1218.
- 43.Trenberth, K. E., Fasullo, J., & Smith, L. (2005). Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Climate Dynamics*, 24(7), 741–758.
- 44.(EN) Wang, H., Chen, Y., & Chen, Z. (2013). Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960–2010. *Hydrological Processes*, 27, 1807–1818.
- 45.(EN) Westra, S., Alexander, L. V., & Zwiers, F. W. (2013). Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, 26, 3904–3918.
- 46.(EN) Xiong, J., Guo, S., Abhishek, Chen, J., & Yin, J. (2022). Global evaluation of the “dry gets drier, and wet gets wetter” paradigm from a terrestrial water storage change perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 6457–6476.
- 47.(EN) Zaitchik, B. F., Rodell, M., Biasutti, M., & Seneviratne, S. I. (2023). Wetting and drying trends under climate change. *Nature Water*, 1(6), 502-513.
48. (FA) Zarrin, A. and Dadashi Roudbari, A. (2022). Investigating Precipitation Return Period and its Probability of Occurrence in Iran based on Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(4), 209-227.
- 49.(EN) Zhai, P., Zhang, X., Wan, H., & Pan, X. (2005). Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 18, 1096–1108.
- 50.(EN) Zhang, K., Pan, S., Cao, L., Wang, Y., Zhao, Y., & Zhang, W. (2014). Spatial distribution and temporal trends in precipitation extremes over the Hengduan Mountains region, China, from 1961 to 2012. *Quaternary International*, 1-11.