Vol. 15, No. 3, Autumn 2026, p. 204-222 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97860.1649 OPEN ACCESS

Spatial–Temporal Analysis of Climate Hazards Associated with Cold-Season Extreme Precipitation in East and Northeastern Iran

Saeed Negahban [1]*, Parisa Yousefi [2], Abazar Esmaeili Mahmoudabadi [2]

[1] Department of Geography, Faculty of Economic, Management & social Science, Shiraz University, Shiraz, Iran
[2] Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 15 February 2026

Revised: 12 July 2026

Accepted: 13 July 2026

Available Online:

16 July 2026

Keywords:

Extreme Precipitation

Climatic Hazards

Spatio-Temporal Analysis

Climate Change

Precipitation Trends

ABSTRACT

Heavy and extreme rainfall events are among the most critical climatic hazards in the arid and semi-arid regions of Iran. This study investigates the spatiotemporal patterns of intensity, frequency, and trends of extreme precipitation at 18 selected stations in eastern and northeastern Iran over the period 1995–2024. The 95th and 99th percentile indices were employed to identify extreme events, representing relatively frequent high intensity rainfall and very rare but exceptionally intense events, respectively. The results indicated that the highest intensities of heavy rainfall occurred at Quchan, Kashmar, and Torbat-Heydarieh stations, while the greatest frequencies were recorded at Neyshabur, Torbat-Heydarieh, and Golmakan, highlighting the spatial concentration of extreme events in the northern highlands and confirming the role of topography in intensifying such phenomena. Conversely, the 99th percentile analysis revealed that in southern areas such as Nehbandan, although event frequency was lower, the intensity of extreme rainfall reached remarkably high levels, indicating the occurrence of rare but hydrologically powerful events. This points to a strong spatial heterogeneity in extreme rainfall behavior across the study area. Trend analysis using the Mann–Kendall test and Sen's slope estimator showed a statistically significant decrease in daily rainfall at some stations, whereas changes in the intensity of extreme events were mostly limited and exhibited no consistent pattern. Overall, the findings emphasize the necessity of simultaneously considering intensity, frequency, and spatial distribution as key components for accurate assessment of meteorological hazards associated with extreme rainfall in eastern and northeastern Iran.

* Corresponding author: Saeed Negahban E-mail address: Snegahban@shirazu.ac.ir

How to cite this article: Negahban, S., Yousefi, P., & Esmaeili Mahmoudabadi, A. (2026). Spatial–Temporal Analysis of Climate Hazards Associated with Cold-Season Extreme Precipitation in East and Northeastern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(3), 204-222. https://doi.org/10.22067/geoeh.2026.97860.1649

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

In recent years, extreme precipitation events have received increasing attention as a major manifestation of climate change. Characterized by intense rainfall over short periods, these events can generate substantial hydrological, urban, and environmental impacts. Recent studies have shown that the intensity of extreme precipitation in the Northern Hemisphere has increased, in many cases more rapidly than snowfall. Iran, located within the arid and semi-arid belt of the Iranian Plateau, has experienced rising temperatures and a relative decline in precipitation. Previous research indicates that climate change has increased the number of extremely dry days while also altering the probability of heavy rainfall events. Even in areas where mean precipitation has declined, the intensity and frequency of extreme events, particularly those exceeding the 95th and 99th percentiles, remain highly important because warmer atmospheric conditions can increase moisture availability and enhance convective activity.

At broader spatial scales, studies across Asia have documented substantial spatiotemporal changes in extreme precipitation. Increasing trends in indices such as Rx1day and R95p have been reported in East and Southeast Asia, elevating the risk of flash floods. In the Indian subcontinent, heavy daily precipitation has increased in some coastal areas but declined in parts of the interior. In West Asia and Iran, despite reductions in total annual precipitation, the relative contribution of extreme rainfall has increased in many regions. Europe and North America have generally experienced increases in the intensity and frequency of heavy rainfall, whereas trends in Africa and South America remain spatially heterogeneous and strongly dependent on local and seasonal conditions.

Against this background, the present study investigates the intensity, frequency, and long-term trends of heavy and very heavy cold-season precipitation in northeastern Iran over the 30-year period 1995–2024. The main objective is to identify the spatial and temporal patterns of extreme precipitation and assess their long-term behavior using percentile-based indices and non-parametric trend tests, thereby providing information relevant to hydrological risk management and water-resources planning.

Material and Methods

Daily precipitation data for the five cold months of the year (November to March) during 1995–2024 were obtained from the Iran Meteorological Organization. Eighteen synoptic stations in northeastern Iran were selected: Torbat-e Jam, Bojnord, Boshruyeh, Birjand, Torbat-e Heydariyeh, Zabol, Zahedan, Sabzevar, Sarakhs, Quchan, Kashmar, Gonabad, Mashhad, Nehbandan, Nishapur, Ferdows, Golmakan, and Qaen. The data were processed in Excel, and days with precipitation totals below 1 mm were excluded from the analysis. Extreme precipitation events were identified using the 95th and 99th percentiles of wet-day precipitation. Trend analysis was performed using the non-parametric Mann–Kendall test and Sen's slope estimator. The Mann–Kendall test is widely used to detect monotonic trends in hydroclimatic time series and is relatively robust to outliers, whereas Sen's slope estimator is used to quantify the magnitude and direction of trends.

Results and Discussion

Based on the 95th percentile, the highest heavy-precipitation threshold values were observed at Quchan (15.25 mm), Kashmar (14.85 mm), and Torbat-e Heydariyeh (14.69 mm), whereas Zabol (9.17 mm), Zahedan (9.59 mm), and Bojnord (9.90 mm) recorded the lowest values. In terms of frequency, the highest numbers of heavy-rainfall days were recorded in Nishapur (71 days), Torbat-e Heydariyeh (70 days), and Golmakan (62 days), while Zabol (16 days) and Nehbandan (17 days) had the fewest. These patterns suggest that topography and elevation may play an important role in shaping the spatial distribution of heavy precipitation.

For the 99th percentile, the highest very heavy precipitation values were observed in Nehbandan (35.24 mm), Torbat-e Heydariyeh (28.51 mm), and Kashmar (27.45 mm). The highest frequencies were recorded in Bojnord (27 days), Quchan (25 days), and Mashhad (24 days). Despite its high intensity, Nehbandan experienced only five days of very heavy precipitation, indicating the occurrence of rare but

potentially hazardous events. By contrast, northern stations such as Quchan and Torbat-e Heydariyeh exhibited both relatively high intensity and high frequency, implying greater cumulative hazard.

More than 70% of heavy precipitation events during the cold season occurred between December and March. Golmakan recorded 30 events in March, representing the highest monthly frequency, whereas Nishapur and Torbat-e Heydariyeh showed a more even monthly distribution. Zabol and Nehbandan experienced notable events mainly in only one or two months, reflecting the influence of the arid, low-precipitation climate of southeastern Iran.

Trend analysis using the Mann–Kendall test and Sen's slope estimator indicated decreasing tendencies in daily precipitation totals at most stations. Statistically significant declines were identified in Nehbandan ($p=0.02p = 0.02p=0.02$), Boshruyeh ($p=0.01p = 0.01p=0.01$), and Mashhad ($p=0.04p = 0.04p=0.04$). The estimated slope was -0.04-$0.04-0.04$ mm/day in Boshruyeh, while it was close to zero in Torbat-e Jam. No station showed a statistically significant increasing trend. These findings suggest that declines in mean precipitation do not necessarily imply a reduced risk of extreme rainfall events. Annual variations also revealed marked interannual variability in heavy and very heavy precipitation, with peaks in 1999, 2007, 2017, and 2019, and minima in 2001, 2010, 2016, and 2021. Northern and high-elevation areas such as Nishapur, Quchan, and Bojnord experienced more frequent and persistent heavy precipitation, whereas the drier southeastern areas were characterized by infrequent but highly intense events.

Conclusion

Analysis of the 95th and 99th percentiles at 18 stations in northeastern Iran revealed substantial spatial and temporal heterogeneity in heavy and very heavy cold-season precipitation. Northern and high-elevation areas, characterized by both high intensity and high frequency, are more exposed to recurrent flooding, whereas the arid southeastern regions, despite lower event frequency, face an elevated risk of sudden and localized floods due to the occurrence of rare but intense rainfall. The seasonal concentration of events is broadly consistent with the influence of Mediterranean systems and western atmospheric disturbances. Long-term trends indicate a general decline in daily precipitation, although reductions in mean rainfall do not necessarily correspond to a lower risk of extreme events. These findings highlight the need for resilient infrastructure, improved runoff management, and long-term monitoring systems to support more accurate climate-hazard assessment and adaptation planning.

جلد ۱۵، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵ ، ص ۲۲۲-۲۰۴ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97860.1649 دسترسی آزاد

تحلیل مکانی - زمانی مخاطرات اقلیمی ناشی از بارش‌های فرین فصل سرد در شرق و شمال‌شرق ایران

سعید نگهبان[۱*]، پریسا یوسفی[۲]، اباذر اسمعیلی محمودآبادی[۲]

[۱] گروه جغرافیا، دانشکدهٔ اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
[۲] گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

کلمات کلیدی:
بارش‌های حدی
مخاطرات اقلیمی
تحلیل مکانی- زمانی
تغییر اقلیم
روند بارش

چکیده

بارش‌های سنگین و فوق‌سنگین از جمله رویدادهای قرین اقلیمی با پیامدهای مخاطره‌آمیز در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران هستند. این پژوهش با هدف بررسی الگوی مکانی- زمانی شدت، فراوانی و روند این بارش‌ها در ۱۸ ایستگاه واقع در شرق و شمال‌شرق ایران طی بازه ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ انجام شد. برای شناسایی رخدادهای حدی، از شاخص‌های صدکی ۹۵ و ۹۹ استفاده گردید که به‌ترتیب بیانگر بارش‌های نسبتاً مکرر با شدت بالا و رویدادهای بسیار نادر با شدت فوق‌العاده زیاد هستند. یافته‌ها نشان داد که بیشترین شدت بارش‌های سنگین متعلق به ایستگاه‌های قوچان، کاشمر و تربت‌حیدریه است، در حالی که بیشترین فراوانی رخدادها در نیشابور، تربت‌حیدریه و گلمکان مشاهده شد که تمرکز فضایی این پدیده را در نواحی مرتفع شمالی منطقه تأیید می‌کند و نقش توپوگرافی را در تشدید بارش‌های حدی آشکار می‌سازد. در مقابل، تحلیل صدک ۹۹ نشان داد که در نواحی جنوبی مانند نهبندان، اگر چه تعداد رویدادها کمتر است، اما شدت بارش‌های فوق‌سنگین به طور چشمگیری افزایش می‌یابد که حاکی از وقوع رخدادهای نادر اما بسیار پرقدرت از نظر هیدرولوژیکی است. این امر بیانگر ناهمگنی شدید مکانی در رفتار بارش‌های حدی منطقه می‌باشد. بررسی روند با آزمون من-کندال و شیب سن نیز کاهش معنادار آماری در بارش روزانه برخی ایستگاه‌ها را نشان داد، در حالی که تغییرات شدت رویدادهای حدی عمدتاً محدود و فاقد الگوی یکنواخت بود. در مجموع، نتایج بر لزوم درنظرگرفتن همزمان سه مؤلفه شدت، فراوانی و توزیع مکانی برای ارزیابی دقیق مخاطرات ناشی از بارش‌های حدی در منطقه تأکید دارد.

* نویسنده مسئول: سعید نگهبان
Email: snegahban@shirazu.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، بارش‌های فرین به عنوان شاخصی برجسته از تغییراقلیم مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ این رخدادها، که شامل تجمع زیاد بارش در بازه‌های زمانی کوتاه یا خیلی کوتاه هستند، پیامدهای وسیع هیدرولوژیکی، شهری و زیست‌محیطی به همراه دارند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که در نیمکره شمالی، شدت بارش‌های فرین در سال‌های اخیر به حدود ۰/۲۶۹ میلی‌متر در سال افزایش یافته که تقریباً ۹ برابر افزایش مشابه برای بارش‌های برفی است (Dixit, Goswami, Jain & Das, 2024). کشور ایران، واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک فلات ایران، با افزایش محسوسی در دما و کاهش نسبی در میزان بارش مواجه شده است؛ مطالعات اخیر نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی سبب شده‌اند تا وقوع روزهای بسیار خشک افزایش یابد و هم‌زمان احتمال وقوع بارش‌های بسیار سنگین نیز تغییر نماید (Chaparinia, Hadei, Yaghmaeian, Hadi & Naddafi, 2025). با وجود کاهش کلی بارش‌ها، شدت و فراوانی رخدادهای حدّی (مثلاً صدک‌های ۹۵ و ۹۹) از توجه ویژه‌ای برخوردارند، زیرا در شرایط گرم‌تر، رطوبت بیشتر در جو و دینامیک‌های همرفتی فعال‌تر می‌شوند (Afsari, Nazari-Sharabian, Hosseini & Karakouzian, 2024).

در دهه‌های اخیر، بررسی روندهای زمانی و مکانی بارش‌های فرین در قاره آسیا نشان می‌دهد که الگوهای بارش در بیشتر مناطق دچار تغییرات چشمگیری شده‌اند (Lotfi, Akbari Azirani, Shakiba, Rabbani & Dashtbozorgi, 2024; Hosseini & Nabiuni, 2022; Yosefi, Naji, Karimi & Frotan & Salahi, 2021; Esmaeili Mahmoudabadi, Shamsipour & Mohammadi, 2025; Ahmadabad, Shamsipour & Azizi, 2025) نتایج پژوهش‌ها بیانگر آن است که در شرق و جنوب شرق آسیا، از جمله در چین، هند و ویتنام، شاخص‌های فرین بارش نظیر Rx1day و R95p روندی افزایشی دارند که این امر به افزایش احتمال رخداد سیلاب‌های ناگهانی منجر شده است (Hariadi, 2025; Jiang et al., 2025). در جنوب چین و حوضه گان‌جیانگ نیز شدت و تکرار بارش‌های سنگین در فصل بهار افزایش یافته است، در حالی که در شمال و شمال غرب چین کاهش نسبی مشاهده می‌شود (Guo et al., 2025). در شبه‌قاره هند، مطالعات متعدد حاکی از افزایش فراوانی بارش‌های روزانه سنگین به‌ویژه در سواحل غربی و شرق هند است، اما در نواحی مرکزی و شمال غربی کشور روندی کاهشی گزارش شده است (Kumar & Rao, 2024). همچنین در منطقه جنوب شرق آسیا و مجمع‌الجزایر اندونزی، گرمایش اقلیمی منجر به تسنگین بارش‌های کوتاه‌مدت و سنگین گردیده که اثر مستقیمی بر وقوع رانش زمین و سیلاب‌های ناگهانی داشته است (Hariadi, 2024). در غرب آسیا، از جمله خاورمیانه و فلات ایران، تغییرات بارش‌های فرین الگوی ناهمگنی دارند. به‌طور خاص، در بخش‌هایی از ایران و شبه جزیرهٔ عربستان، کاهش چشمگیری در مجموع بارش‌های سالانه دیده می‌شود، اما سهم بارش‌های فرین از کل بارش در بسیاری از مناطق افزایش یافته است (Rezaei & Ahmadi, 2023; Hagras, 2025). در ترکیه و منطقهٔ مدیترانه شرقی نیز شاخص‌های فرین بارش روند افزایشی خفیفی را نشان می‌دهند، به‌ویژه در مناطق ساحلی و نواحی غربی این کشور (Yildiz & Demir, 2023). در آسیای مرکزی، کشورهایی مانند قزاقستان و ازبکستان شاهد کاهش بارش‌های متوسط اما افزایش اپیزودهای بارش سنگین بوده‌اند که این امر با تغییرات الگوهای همدیدی و جت جنب حاره‌ای مرتبط دانسته شده است (Zilli et al., 2025).

در قارهٔ اروپا، تغییرات بارش‌های فرین در دهه‌های اخیر یکی از شاخص‌ترین نمودهای تغییر اقلیم محسوب می‌شود. مطالعات انجام‌شده در اروپای غربی، مرکزی و شمالی نشان می‌دهد که فراوانی و شدت بارش‌های روزانه سنگین به طور محسوسی افزایش یافته است، به ویژه در کشورهای آلمان، فرانسه، بریتانیا و هلند (Uber, Beckers, Terweh, Helmke & Hoffmann, 2025). در آلمان، تغییر در چرخه فصلی بارش‌های سنگین و افزایش بارش‌های تابستانه، موجب تسنگین خطر سیلاب‌های ناگهانی و رواناب‌های سطحی شده است (Vincent, 2020). در اروپای شمالی، از جمله در اسکاندیناوی، افزایش دمای هوا موجب شده است که بارش‌های برف‌باران و رخدادهای بارش سنگین زمستانی روندی افزایشی داشته باشند (Anderson & Chartrand, 2025). در حالی که در اروپای جنوبی، شامل اسپانیا، ایتالیا و یونان، هرچند تعداد روزهای بارش کاهش یافته، اما شدت رخدادهای فرین افزایش یافته است (Benetó & Khodayar, 2023; André, Chiabrando, Muller, Drobinski & D'andrea, 2025). این الگوی دوگانه نشان می‌دهد

که با وجود کاهش کلی بارش، سهم رخدادهای سنگین از کل بارش سالانه در حال افزایش است. در اروپای شرقی و منطقه بالکان، نتایج پژوهش‌ها بیانگر وجود روندهای مکانی ناهمگون است. در کشورهای لهستان و جمهوری چک افزایش شاخص‌های بارش فرین (مانند R95p وRx5day) گزارش شده است، در حالی که در رومانی و بلغارستان برخی شاخص‌ها روند کاهشی دارند (Omay & Salih, 2025). در بخش‌های کوهستانی آلپ نیز، بارش‌های سنگین با شدت بیشتر و توزیع زمانی نامنظم‌تر مشاهده می‌شود که به افزایش احتمال وقوع بهمن و فرسایش سطحی انجامیده است (Votrubová, 2025). در قاره آفریقا، روندهای بارش‌های فرین از ویژگی ناهمگنی مکانی قابل توجهی برخوردار است و تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و الگوهای جوی منطقه‌ای قرار دارد. در آفریقای جنوبی، شاخص‌های بارش فرین نشان‌دهنده افزایش تعداد روزهای بارش سنگین و شدت رخدادها در دهه‌های اخیر هستند که این امر با افزایش احتمال سیلاب‌های ناگهانی در نواحی شهری و روستایی همراه بوده است (Zeleke et al., 2025). در آفریقای استوایی، به ویژه در کنگو و اوگاندا، مطالعات گزارش می‌دهند که رخدادهای بارش سنگین به‌طور مقطعی افزایش یافته‌اند، هر چند داده‌ها نشان دهندهٔ نوسانات بالا و عدم یکنواختی در روند بلندمدت هستند (Nana, Tanessong, Gudoshava & Vondou, 2025). در غرب آفریقا، از جمله در بورکینا فاسو و نیجر، روندهای بارش‌های فرین نیز ناهمگون است؛ برخی مناطق افزایش شدت و فراوانی را تجربه کرده‌اند، در حالی که سایر نقاط کاهش یا ثبات مشاهده می‌شود (Gadedjisso-Tossou, Patra & Kablan, 2025). در مناطق شمال آفریقا، شامل مراکش و الجزایر، کاهش بارش‌های سالانه مشاهده می‌شود، اما سهم رخدادهای فرین از کل بارش افزایش یافته است (WMO, 2024).

در آمریکای شمالی، روندهای بارش‌های فرین طی دهه‌های اخیر به طور کلی افزایشی بوده و با نوسانات فصلی و منطقه‌ای همراه است. در ایالات متحده، به ویژه در شرق و شمال‌شرق کشور، شاخص‌های فرین مانند Rx1day و Rx5day افزایش قابل توجهی نشان می‌دهند که منجر به افزایش خطر سیلاب‌های ناگهانی و خسارات زیست‌محیطی شده است (Johnson, 2025; Rozante, Rozante & Cavalcanti, 2025). در آمریکای جنوبی، تغییرات بارش‌های فرین الگوی ناهمگنی مکانی بیشتری دارند. در حوضه رودخانه اوروگوای، بخش میانی حوضه افزایش فرین، و در بخش‌های بالا و پایین کاهش مشاهده شده است (Ellwanger, Ziliotto, Kulmann-Leal & Chies, 2025). جنوب‌شرقی برزیل شاهد افزایش شدت و فراوانی رخدادهای بارش سنگین است که با مخاطرات بالادست شهری مرتبط است (Zeleke et al., 2025). بنابراین، حتی در اقلیم‌هایی که شاهد کاهش میانگین بارش هستند نیز، امکان افزایش مخاطره ناشی از بارش‌های ناگهانی و سنگین وجود دارد. با وجود افزایش مطالعات در زمینه بارش‌های حدّی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای، هنوز در بسیاری از مناطق از جمله شمال‌شرق ایران، درک دقیقی از روندهای همزمان شدت، فراوانی و تغییرات مکانی بارش‌های حدّی وجود ندارد. بیشتر مطالعات موجود یا بر میانگین بارش تمرکز داشته‌اند یا تنها یک شاخص حدّی را بررسی کرده‌اند، در حالی که رفتار واقعی بارش‌های حدّی نیازمند تحلیل چندشاخصی و مکانی و زمانی است.

بررسی ادبیات موجود نشان می‌دهد که مطالعات انجام‌شده در شمال‌شرق ایران عمدتاً دارای محدودیت‌هایی از جمله استفاده از دوره‌های زمانی کوتاه، تمرکز بر میانگین بارش، و عدم تحلیل همزمان شاخص‌های حدّی در سطوح مختلف صدکی هستند. علاوه بر این، مطالعات اندکی به بررسی توزیع مکانی تغییرات بارش‌های فرین در این منطقه پرداخته‌اند، در حالی که ناهمگنی فضایی این رخدادها می‌تواند نقش مهمی در مدیریت ریسک سیلاب داشته باشد. انتخاب شمال‌شرق ایران به دلیل قرارگیری این منطقه در یکی از حساس‌ترین نواحی اقلیمی کشور، وابستگی شدید به منابع آب سطحی، و تجربه رخدادهای مکرر سیلاب‌های ناگهانی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این منطقه به‌عنوان یکی از نواحی انتقالی بین اقلیم خشک مرکزی و اقلیم‌های مرطوب‌تر شمالی، نسبت به تغییرات اقلیمی حساسیت بالایی دارد.

در نتیجه، هنوز این پرسش اساسی مطرح است که آیا تغییرات مشاهده‌شده در بارش‌های حدّی شمال‌شرق ایران نشان دهندهٔ یک روند پایدار ناشی از تغییر اقلیم است یا صرفاً نوسانات طبیعی اقلیم منطقه‌ای محسوب می‌شود؟

نوآوری این پژوهش در استفاده همزمان از چند شاخص حدّی (از جمله صدک‌های ۹۵ و ۹۹)، تحلیل مکانی– زمانی تغییرات بارش‌های حدّی، و بهره‌گیری از داده‌های به‌روز تا سال ۲۰۲۴ نهفته است که امکان ارزیابی دقیق‌تر روندهای اخیر و تغییرات ریسک اقلیمی را فراهم می‌کند. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل و تعیین اثرات تغییر اقلیم بر شدت، فراوانی و روندهای بلندمدت بارش‌های سنگین و بسیار سنگین در شمال شرق ایران طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۵–۲۰۲۴) است. افزایش شدت و فراوانی بارش‌های حدّی در این منطقه می‌تواند به‌طور مستقیم بر افزایش خطر سیلاب‌های ناگهانی، فرسایش خاک و آسیب به زیرساخت‌های شهری و روستایی اثرگذار باشد، بنابراین تحلیل روندهای آن برای مدیریت ریسک‌های هیدرولوژیکی ضروری است. این مطالعه به دنبال شناسایی الگوهای مکانی و زمانی بارش‌های حدّی و بررسی روندهای بلندمدت آن‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری و آزمون‌های ناپارامتری است تا اطلاعاتی دقیق و کاربردی برای مدیریت مخاطرات هیدرولوژیکی و برنامه‌ریزی منابع آب در منطقه فراهم شود. با توجه به افزایش وقوع بارش‌های سنگین و سیلاب‌های ناگهانی در فلات ایران و به ویژه شمال شرق کشور، شناخت روندهای بلندمدت و تغییرات مکانی این رخدادها برای کاهش آسیب‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی ضروری است. شناسایی مناطق با بیشترین افزایش شدت و فراوانی بارش‌های حدّی می‌تواند به طراحی سازوکارهای مدیریت بحران، بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری و کاهش خسارات ناشی از رواناب‌های سطحی کمک کند.از این رو، این پژوهش به دنبال پاسخ به دو سوال اصلی است: روند بلندمدت شدت و فراوانی بارش‌های سنگین و بسیار سنگین در شمال شرق ایران طی دوره ۳۰ ساله اخیر چگونه بوده است و آیا تغییرات مکانی و زمانی بارش‌های حدّی با شواهد تغییر اقلیم در منطقه همخوانی دارد؟

منطقهٔ مورد مطالعه

برای تحلیل و بررسی بارش‌های روزانه از داده‌های آماری مربوط به پنج ماه سرد سال (نوامبر تا مارس) در دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۵–۲۰۲۴) استفاده شد. این داده‌ها به صورت روزانه و از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردیده‌اند. در این پژوهش، ۱۸ ایستگاه همدید در منطقه مورد مطالعه انتخاب شده‌اند که شامل ایستگاه‌های تربت جام، بجنورد، بشرویه، بیرجند، تربت حیدریه، زابل، زاهدان، سبزوار، سرخس، قوچان، کاشمر، گناباد، مشهد، نهبندان، نیشابور، فردوس، گلمکان، قائن می باشد. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ بیان شده است.

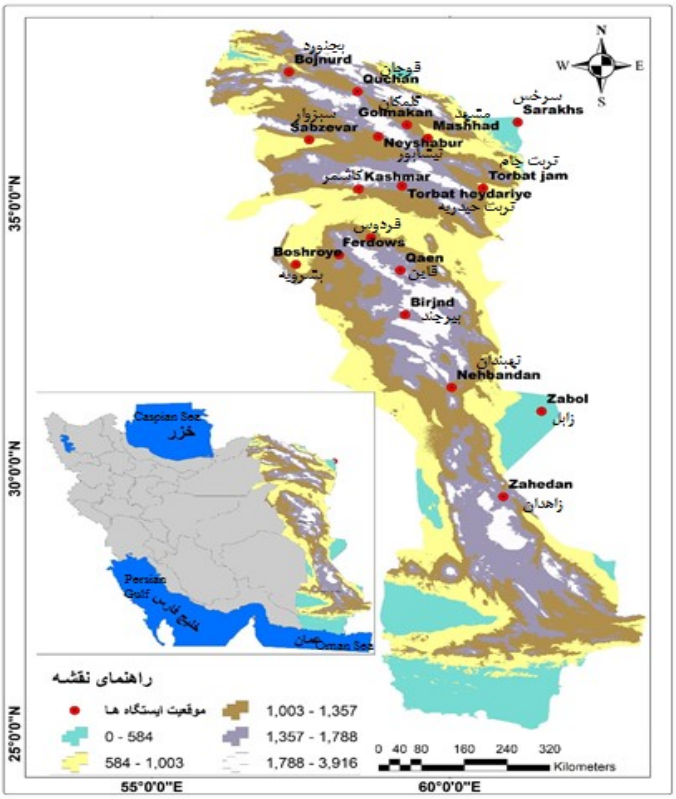
مواد و روش‌ها

در مرحله پیش‌پردازش، کنترل کیفیت داده‌های بارش به‌منظور شناسایی مقادیر غیرواقعی، خطاهای ثبت و ناهماهنگی‌های احتمالی انجام شد. در این راستا، داده‌های پرت و مقادیر مشکوک با بررسی توزیع سری زمانی و مقایسه با آمار ایستگاه‌های مجاور مورد ارزیابی قرار گرفتند. در خصوص داده‌های مفقود، ابتدا درصد کمبود داده در هر ایستگاه محاسبه شد. در مواردی که میزان داده‌های مفقود کمتر از آستانه قابل قبول (معمولاً کمتر از ۵ درصد) بود، از روش‌های درون‌یابی آماری مبتنی بر میانگین یا همبستگی با ایستگاه‌های مجاور برای بازسازی داده‌ها استفاده شد. ایستگاه‌هایی که دارای خلأ داده‌ای گسترده بودند از تحلیل حذف شدند.

فرایند پردازش داده‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Macro در محیط نرم‌افزار Excel انجام گرفت. در گام نخست، بارش‌های روزانه به صورت طبقه‌بندی شده استخراج شدند؛ بدین صورت که بارش‌های کمتر از ۱ میلی‌متر حذف و آستانه ۱ میلی‌متر به عنوان حداقل مقدار مورد بررسی در نظر گرفته شد. پس از مرتب‌سازی داده‌های بارش، تحلیل‌های آماری لازم بر روی آن‌ها انجام گرفت.

به منظور اطمینان از یکنواختی سری‌های زمانی و حذف اثر تغییرات ناشی از جابه‌جایی ایستگاه‌ها، تغییر ابزار اندازه‌گیری یا تغییرات محیطی غیر اقلیمی، همگن‌سازی داده‌ها انجام شد. این مرحله با استفاده از آزمون‌های آماری استاندارد همگن‌سازی سری‌های زمانی انجام گرفت تا اطمینان حاصل شود که تغییرات مشاهده‌شده ناشی از عوامل اقلیمی واقعی هستند، نه خطاهای ایستگاهی.

پس از تکمیل مراحل کنترل کیفیت، مدیریت داده‌های مفقود و همگن‌سازی، داده‌ها برای انجام تحلیل‌های آماری و آزمون‌های روند آماده‌سازی شدند.



شکل ۱- معرفی منطقهٔ مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه‌های همدید

Fig. 1. Location of the study area and spatial distribution of synoptic stations

در نخستین گام، آزمون روندیابی بارش‌ها به‌وسیله دو آزمون «من-کندال» و «شیب سن» در دو سطح مورد بررسی قرار گرفت. آزمون من کندال یکی از روش‌های ناپارامتری مبتنی بر رتبه است که به منظور بررسی وجود روند در سری‌های زمانی به‌کار می‌رود. این آزمون در ابتدا توسط من (Mann, 1945) و سپس توسط کندال (Kendall & Gibbons, 1962) توسعه و تکامل یافت. تحت فرض صفر این آزمون، فرض می‌شود که داده‌ها مستقل از یکدیگر و دارای توزیع یکسان هستند (Partal & Kahya, 2005). این آزمون به طور گسترده‌ای در تحلیل روند در داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی کاربرد دارد (Salehi, Dehghani, Mortazavi & Singh, 2020). از جمله مزایای مهم آزمون من کندال، می‌توان به عدم نیاز به توزیع آماری خاص برای داده‌ها اشاره کرد؛ به عبارت دیگر، این روش برای داده‌هایی با توزیع نرمال و غیرنرمال قابل استفاده است. همچنین، این آزمون در برابر مقادیر حدی[1] حساسیت کمتری دارد و این ویژگی، آن را به گزینه‌ای مناسب برای تحلیل سری‌های زمانی با نوسانات سنگین یا وجود داده‌های پرت تبدیل می‌سازد. به دلیل قابلیت اطمینان بالا و ساختار ناپارامتریک، آزمون من کندال از سوی سازمان جهانی هواشناسی[2] نیز برای تحلیل روند در داده‌های محیطی و اقلیمی توصیه شده است (Liu, Xie, Fang, Du & Xu, 2022). روش سن، که نخستین بار توسط سن (Sen, 1968) ارائه شد. یکی از روش‌های ناپارامتری پرکاربرد برای تحلیل روند در داده‌های سری زمانی می‌باشد. این روش مشابه

1- Extreme values
2- WMO

آزمون من کندال بوده و از اختلاف مقادیر بین داده‌ها برای ارزیابی جهت و شدت روند استفاده می‌کند. این روش به دلیل مقاومت در برابر داده‌های پرت و عدم نیاز به توزیع نرمال، در مطالعات اقلیمی، هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی کاربرد گسترده‌ای دارد. همچنین، از جمله مزایای آن می‌توان به توانایی تخمین نرخ تغییرات سالانه بدون تأثیرپذیری سنگین از نوسانات کوتاه‌مدت اشاره کرد.

نتایج و بحث

داده‌های جدول ۱، وضعیت بارش‌های سنگین را در ۱۸ ایستگاه منتخب شرق و شمال شرق کشور بر پایه شاخص صدک ۹۵ درصد نشان می‌دهند؛ به این معنا که تنها ۵ درصد از بارش‌های روزانه در هر ایستگاه برابر یا بیشتر از مقدار صدک ۹۵ بوده‌اند. این شاخص به‌طور مؤثری شدت بارش‌های غیرمعمول و نادر را در هر ایستگاه مشخص می‌کند و امکان مقایسه همزمان شدت و فراوانی رخدادهای بارشی را فراهم می‌آورد. مقایسه مقادیر صدک ۹۵ میان ایستگاه‌ها نشان می‌دهد بالاترین آستانه بارش سنگین در قوچان (۱۵/۲۵ میلی‌متر)، پس از آن در کاشمر (۱۴/۸۵ میلی‌متر) و تربت‌حیدریه (۱۴/۶۹ میلی‌متر) ثبت شده است. این مقادیر بیانگر شدت بالاتر بارش‌های سنگین در این مناطق هستند. در مقابل، ایستگاه‌هایی مانند زابل (۹/۱۷ میلی‌متر)، زاهدان (۹/۵۹ میلی‌متر) و بجنورد (۹/۹ میلی‌متر) کمترین مقادیر صدک ۹۵ را دارند که نشان‌دهنده شدت نسبتاً پایین بارش‌های سنگین در جنوب و شمال شرق مناطق خشک‌تر است. این تفاوت‌ها بازتاب‌دهنده تأثیر عوامل اقلیمی و توپوگرافی بر شدت بارش‌ها هستند. در کنار شدت بارش، تعداد روزهای با بارش برابر یا بیشتر از صدک ۹۵ معیار مهمی برای ارزیابی فراوانی رخدادهای سنگین است. بررسی این شاخص نشان می‌دهد که ایستگاه‌های نیشابور (۷۱ روز)، تربت‌حیدریه (۷۰ روز) و گلمکان (۶۲ روز) بیشترین تعداد روزهای همراه با بارش‌های سنگین را تجربه کرده‌اند، در حالی که ایستگاه‌های زابل (۱۶ روز) و نهبندان (۱۷ روز) کمترین فراوانی رخداد را ثبت کرده‌اند. این الگو بیانگر آن است که برخی مناطق، علی‌رغم شدت متوسط یا پایین بارش، به دلیل تکرار بیشتر رخدادهای سنگین، از نظر اقلیمی از پایداری کمتری برخوردارند و احتمال بروز خسارت ناشی از بارش‌های سنگین در آن‌ها قابل توجه است. بررسی همزمان شدت و فراوانی رخدادها نشان می‌دهد که ایستگاه‌هایی مانند قوچان و تربت‌حیدریه هم دارای آستانه بالای بارش سنگین و هم تعداد قابل توجهی روز با بارش سنگین هستند، که این وضعیت بیانگر اقلیم مرطوب‌تر و کوهستانی‌تر این مناطق نسبت به سایر نقاط شرق کشور است. در حالی که نیشابور با وجود تعداد بالای روزهای رخداد، شدت بارش‌های سنگین متوسط است، که نشان‌دهنده اقلیم معتدل‌تر با رخدادهای نسبتاً پراکنده اما مکرر است. وجود ارتفاعات بینالود و هزارمسجد در شمال شرق کشور نقش مهمی در تشدید بارش‌های سنگین دارد. این ناهمواری‌ها با افزایش صعود اجباری توده‌های مرطوب، موجب تقویت بارش‌های اوروگرافیک شده و در نتیجه هم شدت و هم فراوانی رخدادهای حدّی در ایستگاه‌های واقع در دامنه‌های شمالی و کوهپایه‌ای افزایش یافته است.

همچنین، ایستگاه‌هایی مانند مشهد، قائن، تربت جام و بیرجند دارای صدک ۹۵ متوسط (حدود ۱۲–۱۳ میلی‌متر) و تعداد روزهای رخداد نسبتاً بالا (بیش از ۳۹ روز) هستند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده اقلیم نسبتاً ناپایدار با احتمال بروز رخدادهای متوسط تا سنگین بارش در طول سال هستند و بیانگر پراکندگی مکانی و زمانی بارش‌های سنگین در این مناطق است. به‌طور کلی، ترکیب داده‌های شدت و فراوانی رخدادها، الگوی جغرافیایی و اقلیمی بارش‌های سنگین در شرق و شمال شرق کشور را روشن می‌سازد؛ مناطق شمالی و مرتفع‌تر تمایل به ثبت رخدادهای سنگینتر و نسبتاً کمتر اما با شدت بالاتر دارند، در حالی که مناطق جنوب شرقی و خشک‌تر، با وجود شدت کمتر، فراوانی رخدادهای بارشی کمتر و پراکنده‌تری را تجربه می‌کنند. الگوی مشاهده شده در توزیع مکانی بارش‌های سنگین در شرق و شمال شرق ایران می‌تواند با موقعیت جغرافیایی منطقه در مسیر نفوذ سامانه‌های غربی و مدیترانه‌ای مرتبط باشد. ورود این سامانه‌ها به‌ویژه در فصل سرد سال و تعامل آن‌ها با ناهمواری‌های کوهستانی خراسان، شرایط لازم برای تقویت صعود هوا و تشدید بارش‌های همرفتی و جبهه‌ای را فراهم می‌سازد. در مقابل، مناطق جنوبی و جنوب شرقی کشور تحت تأثیر سیستم‌های کم‌بارش جنب‌حاره‌ای قرار دارند که موجب کاهش فراوانی رخدادهای بارشی شدید می‌شود.

جدول ۲، اطلاعات مربوط به بارش‌های ابرسنگین در ۱۸ ایستگاه منتخب شرق و شمال شرق کشور را بر پایه صدک ۹۹ درصد نشان می‌دهد؛ به این معنا که تنها ۱ درصد از بارش‌های روزانه در هر ایستگاه برابر یا بیشتر از مقدار صدک ۹۹ بوده‌اند. مقایسه مقادیر صدک ۹۹ میان ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که بیشترین شدت بارش در نهبندان (۳۵/۲۴ میلی‌متر)، پس از آن تربت‌حیدریه (۲۸/۵۱میلی‌متر) و کاشمر (۲۷/۴۵ میلی‌متر) ثبت شده است. این مقادیر نشان‌دهنده وقوع بارش‌های روزانه ابرسنگین در شمال شرق و بخش‌هایی از شرق کشور هستند.

جدول ۱- تعیین صدک بارشی ۹۵ درصد و تعداد روزهای با بارش مساوی و بالای صدک ۹۵ درصد

Table 1- Determining the 95th percentile of precipitation and the number of days with precipitation equal to or above the 95th percentile

ردیف Row	ایستگاه Station	صدک ۹۵ Percentile 95	تعداد روزهای رخ داده The number of occurrence days	ردیف Row	ایستگاه Station	صدک ۹۵ Percentile 95	تعداد روزهای رخ داده The number of accur days
1	نهبندان Nehbandan	23.81	17	10	زابل Zabol	9.17	16
2	تربت جام Torbat Jam	12.20	41	11	بیرجند Birjand	12.4	39
3	قائن Qaen	13.80	41	12	فردوس Ferdows	12.2	32
4	گناباد Gonabad	11.5	34	13	تربت حیدریه Torbat Heydariye	14.69	70
5	کاشمر Kashmar	14.85	34	14	مشهد Mashhad	12.6	43
6	نیشابور Neyshabur	13.3	71	15	سبزوار Sabzevar	12.49	38
7	گلمکان Golmakan	12	62	16	سرخس Sarakhs	13.6	38
8	بشرویه Boshroye	12	29	17	قوچان Quchan	15.25	50
9	زاهدان Zahedan	9.59	40	18	بجنورد Bojnurd	9.9	50

در مقابل، ایستگاه‌هایی مانند زابل (۱۷/۹۱میلی‌متر)، بجنورد (۱۹/۷ میلی‌متر) و گناباد (۱۹/۵ میلی‌متر) شدت بارش‌های ابرسنگین نسبتاً پایین‌تری دارند که بازتاب‌دهندهٔ الگوی اقلیمی خشک‌تر و نیمه‌خشک در این مناطق است. بررسی تعداد روزهای با بارش برابر یا بیشتر از صدک ۹۹ بیانگر فراوانی رخدادهای فرین است. بیشترین تعداد روزها در ایستگاه بجنورد (۲۷ روز)، پس از آن قوچان (۲۵ روز) و مشهد (۲۴ روز) مشاهده می‌شود، در حالی که ایستگاه‌های نهبندان (۵ روز)، بشرویه (۸ روز) و زابل (۷ روز) کمترین فراوانی رخداد را دارند. این الگو نشان می‌دهد که مناطق شمال شرق کشور، علی‌رغم شدت متوسط‌تر بارش‌های نادر، تکرار رخدادها بیشتر است، در حالی که در نهبندان، بارش‌های بسیار سنگین نادر اما سنگین‌تری دارد. بررسی همزمان شدت و فراوانی نشان می‌دهد که ایستگاه‌هایی مانند تربت‌حیدریه و کاشمر هم شدت بالا و هم تعداد قابل توجهی روزهای رخداد دارند، که آن‌ها را به ایستگاه‌هایی با ریسک تجمعی بالاتر تبدیل می‌کند. در مقابل، نهبندان با بالاترین مقدار صدک ۹۹، تنها ۵ روز رخداد ثبت کرده است، که نشان‌دهنده وقوع نادر اما بسیار سنگین بارش‌ها در این منطقه با پتانسیل بالا برای ایجاد سیلاب موضعی و مخرب است. همچنین ایستگاه‌هایی مانند گلمکان، قوچان و نیشابور دارای ترکیب متوازنی از شدت و فراوانی هستند، که با توجه به توپوگرافی کوهپایه‌ای و قرارگیری در مسیر جبهه‌های بارشی، شرایط مساعدی برای شکل‌گیری بارش‌های سنگین فراهم می‌کنند. این تحلیل، تفاوت‌های جغرافیایی و اقلیمی بارش‌های بسیار سنگین در شرق و شمال شرق کشور و الگوی توزیع شدت و فراوانی آن‌ها را به‌طور روشن نشان می‌دهد. افزایش شدت برخی رخدادهای ابرسنگین در مناطق خشک‌تر مانند نهبندان و زابل می‌تواند با افزایش ظرفیت

نگهداری رطوبت در جو گرم‌تر مرتبط باشد. مطابق رابطه کلازیوس–کلاپیرون، با افزایش دما، ظرفیت نگهداری بخار آب در جو افزایش یافته و در صورت وقوع شرایط ناپایدار، امکان تخلیه رطوبت به‌صورت بارش‌های شدید اما کم‌تکرار فراهم می‌شود.

جدول۲- تعیین صدک بارشی ۹۹ درصد و تعداد روزهای با بارش مساوی و بالای صدک ۹۹ درصد

Table 2- Determining the 99th percentile of precipitation and the number of days with precipitation equal to or above the 99th percentile

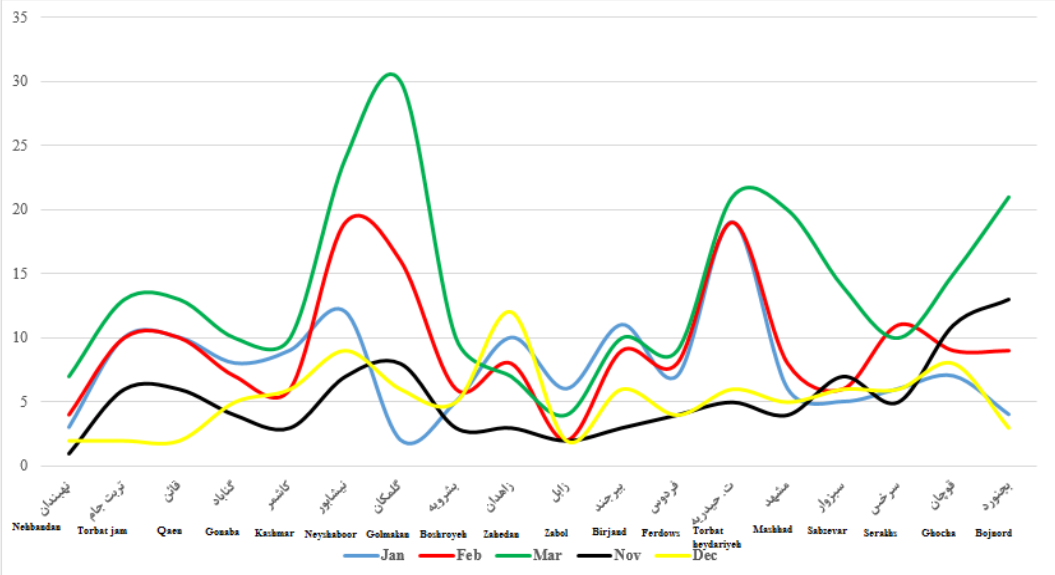
ردیف Row	ایستگاه Station	صدک 99 Percentile 99	تعداد روزهای رخ داده The number of occurrence days	ردیف Row	ایستگاه Station	صدک ۹۹ Percentile 99	تعداد روزهای رخ داده The number of accur days
1	نهبندان Nehbandan	35.24	5	10	زابل Zabol	17.91	7
2	تربت جام Torbat Jam	21.26	12	11	بیرجند Birjand	19.6	16
3	قائن Qaen	25.37	11	12	فردوس Ferdows	24.84	14
4	گناباد Gonabad	19.5	15	13	تربت حیدریه Torbat Heydariye	28.51	18
5	کاشمر Kashmar	27.45	17	14	مشهد Mashhad	22.3	24
6	نیشابور Neyshabur	24.47	22	15	سبزوار Sabzevar	22.75	17
7	گلمکان Golmakan	20.79	23	16	سرخس Sarakhs	24.73	16
8	بشرویه Boshroye	19.4	8	17	قوچان Quchan	25.16	25
9	زاهدان Zahedan	23.69	11	18	بجنورد Bojnurd	19.7	27

جدول ۳ و شکل ۲، وضعیت رخداد بارش‌های سنگین را در ۱۸ ایستگاه منتخب مناطق مورد مطالعه در پنج ماه سرد و مرطوب سال نشان می‌دهند. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که بیشترین رخدادهای بارش سنگین در ماه اسفند ثبت شده است و پس از آن ماه‌های بهمن و دی در رتبه‌های بعدی قرار دارند. به‌طور تقریبی، بیش از ۷۰ درصد کل رخدادهای ثبت‌شده در این پنج ماه، مربوط به دی، بهمن و اسفند است که با اوج‌گیری فعالیت سامانه‌های مدیترانه‌ای و عبور جبهه‌های بارشی غربی و شمال‌غربی از منطقه مطابقت دارد. این تمرکز فصلی اهمیت زیادی برای مدیریت مخاطرات اقلیمی، از جمله سیلاب و رانش زمین، دارد. در بُعد مکانی، بیشترین تعداد رخدادهای بارش سنگین مربوط به ایستگاه‌های نیشابور (۷۱ رخداد)، تربت‌حیدریه (۷۰ رخداد) و گلمکان (۶۲ رخداد) است. این ایستگاه‌ها در مناطق شمالی‌تر و مرتفع‌تر خراسان رضوی واقع شده‌اند و به واسطه موقعیت توپوگرافی و نزدیکی به ارتفاعات بینالود و هزارمسجد، مستعد جذب رطوبت بیشتر و وقوع بارش‌های سنگین هستند.

در مقابل، ایستگاه‌هایی مانند زابل (۱۶ رخداد)، نهبندان (۱۷ رخداد) و بشرویه (۲۹ رخداد)، که در مناطق جنوبی یا شرقی با اقلیم بیابانی و نیمه‌بیابانی قرار دارند، کمترین فراوانی رخداد را ثبت کرده‌اند. این الگو نشان‌دهنده نقش برجسته توپوگرافی، ارتفاع و مسیرهای نفوذ رطوبت در شکل‌گیری بارش‌های سنگین است. بررسی ماهانه رخدادها نشان می‌دهد که برخی ایستگاه‌ها، مانند گلمکان، در اسفندماه به‌تنهایی ۳۰ رخداد ثبت کرده‌اند که بیشترین فراوانی ماهانه در میان تمام ایستگاه‌ها محسوب می‌شود. این ویژگی اهمیت طراحی زیرساخت‌های مقاوم، به‌ویژه در مناطق روستایی و کم‌برخوردار، را دوچندان می‌کند. علاوه بر این، ایستگاه‌های نیشابور و تربت‌حیدریه دارای توزیع یکنواخت رخداد در تمام ماه‌های مورد بررسی هستند، که بیانگر ریسک مداوم و تقریباً فصلی بودن بارش‌های سنگین در این مناطق است. در نقطه مقابل، ایستگاه‌هایی مانند زابل و نهبندان عمدتاً تنها در یک یا دو ماه رخداد قابل‌توجهی داشته‌اند که تأثیر اقلیم خشک و کم‌باران جنوب شرق کشور را تأیید می‌کند.

روند تغییرات بارش در ایستگاه‌های شرق کشور

بررسی روند بارش‌های روزانه در ایستگاه‌های منتخب شرق ایران با استفاده از آزمون من کندال و برآورد شیب سن، تغییرات بارشی طی سه دهه اخیر را نشان می‌دهد (جدول ۴). نتایج تحلیل‌ها بیانگر آن است که در بیشتر ایستگاه‌ها روند بارش‌ها کاهشی بوده و در برخی از آن‌ها این کاهش از نظر آماری معنادار است. با توجه به مقدار P-value ، روندهایی با $P<0.05$ در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار تلقی می‌شوند. بر این اساس، ایستگاه‌های نهبندان ($P=0.02$)، بشرویه ($P=0.01$) و مشهد ($P=0.04$) دارای روند کاهشی معنادار در بارش‌های روزانه هستند. ایستگاه بشرویه با مقدار منفی ۰/۳۷ در آزمون من-کندال و شیب منفی ۰/۰۴، نشان‌دهنده کاهش واضح در فراوانی رخدادهای بارشی است، اگرچه میزان شیب کوچک نشان می‌دهد تغییر در شدت بارش‌های بسیار سنگین محدود بوده است. ایستگاه تربت‌جام نیز با $P=0.03$ روند کاهشی معناداری را نشان می‌دهد، هر چند شیب صفر است، که بیانگر کاهش احتمالی در تکرار رخدادهای بارشی بدون تغییر محسوس در شدت آن‌هاست. در مقابل، ایستگاه‌هایی مانند زاهدان، سرخس و سبزوار فاقد هرگونه روند معنادار هستند ($P>0.4–0.8$)، که نشان‌دهنده نوسانات طبیعی بارش بدون جهت‌گیری مشخص افزایشی یا کاهشی است. همچنین، ایستگاه‌های تربت‌حیدریه، قوچان و بجنورد دارای روند نزولی نزدیک به معناداری ($P\approx0.10–0.16$) هستند، که می‌تواند نشانه کاهش آهسته و محتمل بارش‌های روزانه باشد. هیچ یک از ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار در طول دوره مطالعه نشان نمی‌دهد. این یافته‌ها در کنار تحلیل صدک‌های ۹۵ و ۹۹ درصد نشان می‌دهند که حتی در ایستگاه‌هایی با فراوانی بالای بارش‌های سنگین، مانند نیشابور و قوچان، روند کلی بارش روزانه در بیشتر مناطق شرق کشور رو به کاهش است. یافته‌های این پژوهش با مطالعات انجام‌شده در سایر نقاط ایران و مناطق مشابه نیمه‌خشک همخوانی دارد. برای مثال، افزایش شدت بارش‌های حدّی در حالی‌که روند بارش میانگین کاهشی است، در مطالعات چاپاری‌نیا و همکاران (Chaparinia et al., 2025) و رضایی و احمدی (Rezaei & Ahmadi, 2023) نیز گزارش شده است. این الگو نشان‌دهنده تغییر در توزیع آماری بارش‌ها و افزایش سهم رخدادهای حدّی در شرایط اقلیم گرم‌تر است.



شکل ۲- رخداد بارش‌های سنگین به تفکیک ماهانه در هر یک از ایستگاه‌ها

Fig .2. Heavy rainfall occurrence by month at each station

جدول ۳- رخداد بارش‌های سنگین به تفکیک ماهانه در هر یک از ایستگاه‌ها

Table 3- Heavy rainfall occurrence by month at each station

مجموع Sum	Dec	Nov	Mar	Feb	Jan	ماه Month
17	2	1	7	4	3	نهبندان Nehbandan
41	2	6	13	10	10	تربت جام Torbat Jam
41	2	6	13	10	10	قائن Qaen
34	5	4	10	7	8	گناباد Gonabad
34	6	3	10	6	9	کاشمر Kashmar
71	9	7	24	19	12	نیشابور Neyshabur
62	6	8	30	16	2	گلمکان Golmakan
29	5	3	10	6	5	بشرویه Boshroye
40	12	3	7	8	10	زاهدان Zahedan
16	2	2	4	2	6	زابل Zabol
39	6	3	10	9	11	بیرجند Birjand
32	4	4	9	8	7	فردوس Ferdows
70	6	5	21	19	19	تربت حیدریه Torbat Heydariye
43	5	4	20	8	6	مشهد Mashhad
38	6	7	14	6	5	سبزوار Sabzevar
38	6	5	10	11	6	سرخس Sarakhs
50	8	11	15	9	7	قوچان Quchan
50	3	13	21	9	4	بجنورد Bojnurd

فراوانی رخداد بارش سنگین و ابرسنگین از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴

تحلیل داده‌های سالانه بارش‌های سنگین و ابرسنگین در شرق ایران طی دوره ۱۹۹۵–۲۰۲۴ نشان‌دهندۀ تغییرپذیری قابل‌توجه مکانی و زمانی این رخدادها است (شکل ۳). در سال ۱۹۹۵، ۱۵ ایستگاه با بارش سنگین و ۸ ایستگاه با بارش ابرسنگین به ترتیب با مجموع رخدادهای ۳۹ و ۱۰ ثبت شدند. سال بعد، تعداد ایستگاه‌های بارش سنگین به ۱۸ افزایش یافت، در حالی که بارش ابرسنگین بدون تغییر باقی ماند، که نشان‌دهنده تثبیت رخدادهای سنگین در مناطق محدود است. سال ۱۹۹۷ با افزایش بارش ابرسنگین در ۱۲ ایستگاه و مجموع ۱۵ رخداد، و سال ۱۹۹۸ با رسیدن تعداد ایستگاه‌ها به ۲۰، گواهی بر گسترش بارش‌های بسیار سنگین در برخی مناطق است. در سال ۱۹۹۹ نیز اوج‌گیری بارش ابرسنگین با ۱۳ ایستگاه و مجموع ۱۹ رخداد ادامه یافت. در دهه اول قرن بیست و یکم، به ویژه سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱، کاهش محسوس رخدادها مشاهده شد؛ بارش ابرسنگین در سال ۲۰۰۱ تنها در ۳

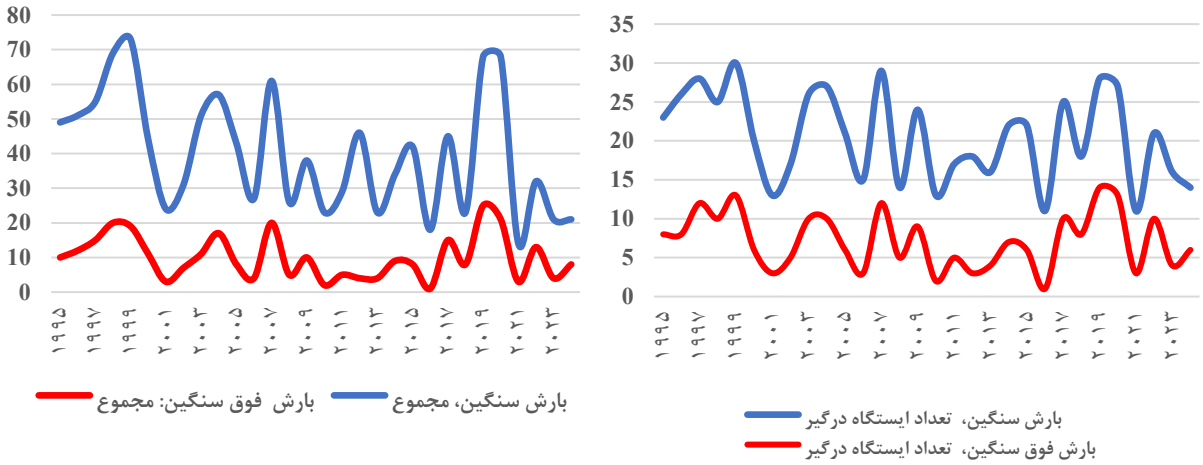
ایستگاه ثبت شد که بیانگر یکی از خشک‌ترین دوره‌ها از نظر وقوع رخدادهای سنگین است. این کاهش پس از سال ۲۰۰۲ با افزایش تدریجی و رسیدن به ۱۰ ایستگاه در سال ۲۰۰۴ جبران شد. سال ۲۰۰۷ نقطه بازگشت مهمی را نشان می‌دهد، با ۱۲ ایستگاه بارش ابرسنگین و مجموع رخدادها ۲۰، مشابه اوج‌های پرتلاطم اواخر دهه ۹۰. دهه پایانی دوره بررسی (۲۰۱۵–۲۰۲۴) با نوسانات قابل‌توجه همراه است. سال ۲۰۱۷ جهش قابل توجهی در هر دو شاخص نشان داد و سال ۲۰۱۹ به اوج تاریخی رسید، با ۱۴ ایستگاه بارش ابرسنگین و مجموع رخدادها ۲۵، بیشترین مقدار کل دوره. در مقابل، سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ کمترین مقادیر را ثبت کردند، که نمایانگر کاهش سنگین فعالیت سامانه‌های بارشی و خشکی نسبی منطقه است. در کل جدول مذکور نشان می‌دهد که بارش‌های ابرسنگین گرچه پراکندگی سالانه دارند، اما در برخی سال‌ها مانند ۱۹۹۹، ۲۰۰۷، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ اوج می‌گیرند، و سال‌هایی مانند ۲۰۰۱، ۲۰۱۰، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ کاهش سنگین دارند.

جدول ۴- نتایج آزمون من-کندال و شیب سن در ۳۰ سال اخیر

Table 4- Mann-Kendall test results and Sens slope in the last 30 years

ردیف Row	ایستگاه Station	من-کندال Mann-Kendall	شیب سن Sen's slope	P-Value	تفسیر روند Trend interpretation
1	نهبندان Nehbandan	-0.55	-0.15	0.02	روند کاهشی معنادار (۹۵ درصد) Statistically significant decreasing trend at the 95% confidence level.
2	تربت جام Torbat Jam	-0.67	0	0.03	روند کاهشی معنادار (۹۵ درصد) Statistically significant decreasing trend at the 95% confidence level.
3	قائن Qaen	-0.12	0	0.53	بدون روند معنادار No statistically significant trend
4	گناباد Gonabad	0.09	0	0.51	بدون روند معنادار No statistically significant trend
5	کاشمر Kashmar	-0.14	0	0.30	روند نزولی غیرمعنادار Non-significant decreasing trend
6	نیشابور Neyshabur	-0.08	0	0.54	بدون روند معنادار No statistically significant trend
7	گلمکان Golmakan	-0.19	-0.06	0.42	روند نزولی غیرمعنادار Non-significant decreasing trend
8	بشرویه Boshroye	-0.37	-0.04	0.01	روند کاهشی معنادار (۹۵ درصد) Statistically significant decreasing trend at the 95% confidence level.
9	زاهدان Zahedan	0.02	0	0.87	بدون روند معنادار No statistically significant trend
10	زابل Zabol	-0.10	0	0.47	بدون روند معنادار No statistically significant trend
11	بیرجند Birjand	-0.14	0	0.31	روند نزولی غیرمعنادار Non-significant decreasing trend
12	فردوس Ferdows	-0.08	0	0.56	بدون روند معنادار No statistically significant trend
13	تربت حیدریه Torbat Heydariye	-0.22	-0.06	0.10	روند کاهشی نزدیک به معناداری A decreasing trend close to statistical significance
14	مشهد Mashhad	-0.29	0	0.04	روند کاهشی معنادار (۹۵ درصد) Statistically significant decreasing trend at the 95% confidence level.
15	سبزوار Sabzevar	0.02	0	0.90	بدون روند معنادار No statistically significant trend
16	سرخس Sarakhs	0.03	0.8	0.43	بدون روند معنادار No statistically significant trend

17	قوچان Quchan	-0.23	-0.03	0.10	روند کاهشی نزدیک به معناداری A decreasing trend close to statistical significance
18	بجنورد Bojnurd	-0.20	0	0.16	روند کاهشی غیرمعنادار Non-significant decreasing trend



شکل ۳- فراوانی رخداد بارش ایستگاه‌ها در هر دو طبقه بارش(سنگین و فوق سنگین)

Fig. 3. Frequency of precipitation events at stations in both precipitation classes (heavy and very heavy)

رخدادهای بارشی سنگین و ابرسنگین در شرق و شمال شرق کشور

بررسی داده‌های بارشی مربوط به صدک‌های ۹۵ و ۹۹ درصد در ۱۸ ایستگاه واقع در شرق ایران (استان‌های خراسان شمالی، رضوی، جنوبی، سیستان‌وبلوچستان) نشان می‌دهد که شدت و فراوانی بارش‌های سنگین در این مناطق، الگوهای متنوعی دارد. این الگوها می‌توانند برای تحلیل مخاطرات سیلابی، طراحی سامانه‌های هشدار و مدیریت منابع آب اهمیت داشته باشند. مقادیر صدک ۹۵ درصد، بیانگر آستانه‌ای است که تنها ۵ درصد از رخدادهای بارشی از آن فراتر می‌روند؛ در حالی که صدک ۹۹ درصد نشان‌دهنده‌ی بارش‌های بسیار نادر اما سنگین است که تنها در ۱ درصد رخدادها ثبت می‌شود. در این تحلیل، از این دو شاخص برای سنجش هم‌زمان شدت و فراوانی بارش‌های غیرمعمول استفاده شده است. درصد بالای تکرار بارش‌هایی با مقدار بیشتر یا مساوی صدک ۹۵ و ۹۹ درصد در برخی ایستگاه‌ها مانند نیشابور، تربت‌حیدریه، قوچان و بجنورد، نشان‌دهنده‌ی استقرار این مناطق در پهنه‌هایی با ریسک بالای رخدادهای سنگین بارشی است. به طور خاص، ایستگاه نیشابور با ۷۱ روز رخداد در صدک ۹۵ و ۲۲ روز در صدک ۹۹، و قوچان با ۵۰ و ۲۵ روز، از این نظر در رتبه‌های نخست قرار دارند. تربت‌حیدریه نیز با ۷۰ روز در صدک ۹۵ و ۱۸ روز در صدک ۹۹، شرایط مشابهی دارد. در مقابل، ایستگاه‌هایی مانند نهبندان، زابل و زاهدان با وجود مقادیر بالای صدک، تعداد روزهای رخداد کمی دارند. به عنوان مثال، در ایستگاه نهبندان، مقدار صدک ۹۵ برابر با ۲۳.۸۱ و صدک ۹۹ برابر با ۳۵/۲۴ میلی‌متر است، اما تنها ۱۷ روز در صدک ۹۵ و ۵ روز در صدک ۹۹ ثبت شده‌اند. این وضعیت نشان می‌دهد که در چنین مناطق خشک و بیابانی، اگرچه وقوع بارش‌های سنگین نادر است، اما در صورت وقوع، احتمال وقوع سیلاب ناگهانی و پرخطر وجود دارد. ایستگاه‌هایی مانند مشهد، سبزوار، گلمکان، بیرجند و فردوس در محدوده‌ای بینابینی قرار دارند. این ایستگاه‌ها هم شدت متوسط تا بالای بارش را تجربه می‌کنند و هم فراوانی نسبتاً زیادی از رخدادهای ناهنجار دارند که آن‌ها را مستعد بروز سیلاب‌های شهری، فرسایش خاک و چالش‌های زیرساختی می‌کند.

در نهایت، تحلیل مقایسه‌ای ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که بخش شمالی و کوهستانی‌تر مناطق مورد مطالعه (نظیر نیشابور، قوچان، بجنورد) به دلیل تأثیر پذیرفتن بیشتر از جبهه‌های غربی، دارای شدت و فراوانی بالاتر رخدادهای ناهنجار بارشی هستند، در حالی که بخش‌های جنوبی و شرقی (نهبندان، زابل، زاهدان) در معرض مخاطرات ناشی از بارش‌های ناگهانی و متمرکز قرار دارند. به‌طور کلی، الگوی فضایی و زمانی بارش‌های حدّی در شرق و شمال شرق ایران حاصل برهم‌کنش پیچیده بین عوامل دینامیکی (سامانه‌های غربی)، عوامل محلی (توپوگرافی) و عوامل ترمودینامیکی (افزایش دما و رطوبت جو) است که در مجموع منجر به ناهمگنی شدید در توزیع شدت و فراوانی رخدادهای بارشی شده است.

نتیجه‌گیری

تحلیل صدک‌های ۹۵ و ۹۹ بر روی داده‌های ۱۸ ایستگاه شرق و شمال شرق ایران نشان داد که بارش‌های سنگین و ابرسنگین در این منطقه از الگوی مکانی و زمانی ناهمگنی قابل توجهی برخوردار است. مقادیر صدک ۹۵ در قوچان، کاشمر و تربت‌حیدریه به ترتیب ۱۵،۲۵، ۱۴،۸۵ و ۱۴،۶۹ میلی‌متر بود و بیشترین تعداد روزهای رخداد بارش سنگین در نیشابور، تربت‌حیدریه و گلمکان با ۷۱، ۷۰ و ۶۲ روز مشاهده شد. در مقابل، ایستگاه‌های زابل، نهبندان و بجنورد با مقادیر صدک ۹۵ پایین‌تر (۹/۱۷ تا ۹/۹ میلی‌متر) و تعداد رخداد کمتر (۱۶–۱۷ روز) مواجه بودند، که نشان می‌دهد شدت بارش‌های سنگین و فراوانی آن‌ها در مناطق خشک‌تر و جنوبی کمتر است.

در صدک ۹۹ نیز الگوی مشابهی نشان داد؛ بیشترین شدت بارش‌های ابرسنگین در نهبندان (۳۵/۲۴ میلی‌متر)، تربت‌حیدریه (۲۸/۵۱ میلی‌متر) و کاشمر (۲۷/۴۵میلی‌متر) ثبت شد، اما تعداد روزهای رخداد در نهبندان تنها ۵ روز بود، در حالی که قوچان و مشهد با شدت کمتر اما ۲۵ و ۲۴ روز رخداد مواجه بودند. این نتایج نشان می‌دهد که مناطق خشک و نیمه‌خشک بارش‌های نادر اما بسیار سنگین دارند، در حالی که مناطق شمالی‌تر، بارش سنگین مکرر ولی با شدت متوسط تا بالا را تجربه می‌کنند. نوآوری اصلی این پژوهش در تحلیل همزمان دو شاخص حدّی صدک ۹۵ و ۹۹ در مقیاس مکانی- زمانی برای شرق و شمال شرق ایران طی دوره بلندمدت ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که عمدتاً بر میانگین بارش یا یک شاخص منفرد تمرکز داشته‌اند، این مطالعه با ترکیب شدت و فراوانی رخدادهای حدّی، امکان ارزیابی دقیق‌تر الگوی ریسک اقلیمی را فراهم می‌کند.

تحلیل فصلی نشان داد که بیش از ۷۰ درصد کل رخدادهای بارش سنگین در ماه‌های دی تا اسفند ثبت شده است. به عنوان نمونه، گلمکان تنها در اسفندماه ۳۰ رخداد ثبت کرد که بالاترین فراوانی ماهانه در میان تمام ایستگاه‌ها بود، در حالی که زابل و نهبندان عمدتاً در یک یا دو ماه رخداد قابل توجه داشتند. این الگو با فعالیت سامانه‌های مدیترانه‌ای و عبور جبهه‌های غربی و شمال‌غربی مطابقت دارد و اهمیت توپوگرافی و ارتفاع را در شکل‌گیری بارش‌های سنگین نشان می‌دهد. تحلیل روند بلندمدت با استفاده از آزمون من-کندال و شیب سن نشان داد که بارش‌های روزانه در بیشتر ایستگاه‌ها کاهشی است؛ به ویژه نهبندان (P=0.02)، بشرویه (P=0.01) و مشهد (P=0.04) کاهش معنادار آماری داشتند. شیب کاهش در بشرویه ۰/۰۴- میلی‌متر بر روز و در تربت‌جام نزدیک صفر بود، که نشان می‌دهد تغییر در شدت وقایع ابرسنگین محدود است ولی فراوانی رخدادها کاهش یافته است. هیچ ایستگاهی روند افزایشی معنادار در بارش‌های روزانه نشان نداد. این یافته‌ها با مطالعه رازی قلاوند و همکاران(Razi Ghalavand, Farajzadeh & Ghavidel Rahimi, 2025)، همخوانی دارد، که کاهش متوسط بارش لزوماً با کاهش ریسک رخدادهای سنگین هم‌زمان نیست. مقایسه با مطالعات پیشین نیز نشان می‌دهد که یافته‌های این پژوهش با نتایج فتاحی و همکاران (Fattahi et al., 2025)، همسو است، چرا که آن مطالعه بیان کرده است شدت و فراوانی بارش‌های سنگین در شرق و جنوب‌شرق ایران نسبت به شمال و غرب کشور پایین‌تر بوده و روند کاهش در برخی شاخص‌ها مشهود است. همچنین یافته‌های حاضر با نتایج پژوهش جمالی و همکاران (Jamali, Gohari, Motamedi & Haghighi, 2022) مطابقت دارد که نشان می‌دهد حتی با کاهش میانگین بارش، شدت و فراوانی رخدادهای سنگین در برخی مناطق می‌تواند بالا باقی بماند. مهم‌ترین دستاورد علمی این تحقیق نشان دادن این واقعیت است که کاهش میانگین بارش لزوماً به معنای کاهش خطر بارش‌های حدّی نیست، بلکه در بسیاری از ایستگاه‌ها، کاهش فراوانی

بارش همزمان با تداوم یا افزایش شدت رخدادهای نادر مشاهده می‌شود. این یافته بیانگر تغییر در توزیع آماری بارش‌ها و افزایش نقش رخدادهای حدّی در ساختار اقلیمی منطقه است.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ساختار بارش در شرق و شمال شرق ایران در حال حرکت به سمت رژیمی با ناهمگنی بیشتر و تمرکز بالاتر بر رخدادهای حدّی است. این تغییر، بیانگر افزایش اهمیت مخاطرات اقلیمی در مقیاس محلی و منطقه‌ای بوده و ضرورت بازنگری در رویکردهای مدیریت منابع آب و کاهش ریسک سیلاب را برجسته می‌سازد. در چنین شرایطی، تمرکز صرف بر تغییرات میانگین بارش برای ارزیابی وضعیت اقلیمی کافی نیست و لازم است شاخص‌های حدّی و تحلیل‌های مکانی زمانی در برنامه‌ریزی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی به طور جدی لحاظ شوند.

References

Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024). Projected climate change impacts on the number of dry and very heavy precipitation days by century's end: a case study of iran's metropolises. *Water*, *16*(16), 2226. https://doi.org/10.3390/w16162226

Anderson, S., & Chartrand, S. (2025). On the mean precipitation characteristics of North American heatwaves. *Environmental Research: Water*, *1*(3), 035001.https://doi.org/10.1088/3033-4942/adf6cf

André, J., Chiabrando, N., Muller, C., Drobinski, P., & D'andrea, F. (2025). Occurrence and intensity: the future of precipitation in Europe and the Mediterranean. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-xxxxx

Benetó, P., & Khodayar, S. (2023). On the need for improved knowledge on the regional-to-local precipitation variability in eastern Spain under climate change. *Atmospheric Research*, *290*, 106795. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106795

Chaparinia, F., Hadei, M., Yaghmaeian, K., Hadi, M., & Naddafi, K. (2025). Evaluation of climate indices related to water resources in Iran over the past 3 decades. *Scientific Reports*, *15*(1), 11846. https://doi.org/10.1038/s41598-025-95370-7

Dixit, A., Goswami, A., Jain, S., & Das, P. (2024). Assessing snow cover patterns in the Indus-Ganga-Brahmaputra River Basins of the Hindu Kush Himalayas using snow persistence and snow line as metrics. *Environmental Challenges, 14*, 100834. https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100834

Ellwanger, J. H., Ziliotto, M., Kulmann-Leal, B., & Chies, J. A. B. (2025). Environmental challenges in Southern Brazil: Impacts of pollution and extreme weather events on biodiversity and human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *22*(2), 305. https://doi.org/10.3390/ijerph22020305

Esmaeili Mahmoudabadi, A., Shamsipour, A., & Mohammadi, H. (2025). Determining the temporal and spatial trend and the change point of precipitation and maximum temperature in Tehran. *Physical Geography Research*, *57*(4), 1-22. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2025.399196.1007896

Fattahi, E., Kamali, S., Asadi Oskouei, E., & Habibi, M. (2025). Investigating the spatiotemporal variation in extreme precipitation indices in Iran from 1990 to 2020. *Water*, *17*(8), 1227. https://doi.org/10.3390/w17081227

Frotan, M., & Salahi, B. (2021). Synoptic analysis of heavy rainfall on March 19, 2017 in Minoodasht city. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *9*(4), 163-180. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.67780.1003

Gadedjisso-Tossou, A., Patra, S., & Kablan, A. K. M. (2025). Innovative trend analysis (ITA) for the identification of hidden rainfall trends in Togo (1961–2018). *Theoretical and Applied Climatology*, *156*(10), 503. https://doi.org/10.1007/s00704-025-xxxxx

Guo, C., Guo, H., Meng, X., Cao, Y., Wang, W., & Maeyer, P. D. (2025). Spatiotemporal Characteristics of Extreme Precipitation Events in Central Asia: Insights from an Event-Based Analysis. *Hydrology*, *12*(10), 247. https://doi.org/10.3390/hydrology12100247

Hagras, A. (2025). Physical Characteristics of the Southeast Sinai, Egypt. In: Hydrological Modelling and Assessment in Arid Region Using Remote Sensing and GIS: A Case Study in Southeast Sinai, Egypt. Springer Hydrogeology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04235-4_2

Hariadi, M. H. (2025). *A high resolution modelling perspective on food security and streamflow over Southeast Asia* (Doctoral dissertation). Wageningen University and Research. https://doi.org/10.18174/681034

Hosseini, S. M., & Nabiuni, S. (2022). Frequency Analysis of Dangerous Extreme Rainy Days in IRAN. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(1), 141-162. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.71591.1091

Jamali, M., Gohari, A., Motamedi, A., & Haghighi, A. T. (2022). Spatiotemporal changes in air temperature and precipitation extremes over Iran. *Water*, *14*(21), 3465. https://doi.org/10.3390/w14213465

Jiang, X., Shen, J., Fu, X., Zhong, Q., Luo, F., Guo, L., & Wang, H. (2025). Comparative analysis of runoff simulations using multiple hydrological models in the Ganjiang River Basin. *Hydrology Research*, *56*(9), 854-877. https://doi.org/10.2166/hr.2025.XXX

Johnson, E. (2025). *Assessing Changes of Historical Extreme Precipitation in the Eastern United States From 1951-2023*. (Master's thesis). Indiana University.

Kendall, M. G., & Gibbons, J. D. (1962). Rank correlation methods.

Kumar, P., & Rao, A. (2024). *Trends in daily extreme precipitation events across the Indian subcontinent.* Climate Dynamics.

Liu, S., Xie, Y., Fang, H., Du, H., & Xu, P. (2022). Trend test for hydrological and climatic time series considering the interaction of trend and autocorrelations. *Water*, *14*(19), 3006. https://doi.org/10.3390/w14193006

Lotfi, S., Akbari Azirani, T., Shakiba, A., Rabbani, F., & Dashtbozorgi, A. (2024). Synoptic Analysis of the Impact of Cut-Off Lows in Heavy Rains in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(4), 205-232. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79894.1314

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259. https://doi.org/10.2307/1907187

Nana, H. N., Tanessong, R. S., Gudoshava, M., & Vondou, D. A. (2025). Assessing the ability of the ECMWF seasonal prediction model to forecast extreme September-to-November rainfall events over Equatorial Africa. *EGUsphere*, *2025*, 1-33. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-xxxx

Omay, P. O., & Salih, A. A. (2025). Climate data for understanding rainfall extremes in developing countries. In *Climate Change and Rainfall Extremes in Africa* (pp. 51-70). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28867-8.00003-4

Partal, T., & Kahya, E. (2005). *Trend analysis in Turkish precipitation data using Mann–Kendall and Sen's slope. Hydrological Processes, 19*, 403–417. https://doi.org/10.1002/hyp.2064

Razi Ghalavand, M., Farajzadeh, M., & Ghavidel Rahimi, Y. (2025). Modeling Return Levels of Non-Stationary Rainfall Extremes Due to Climate Change. *Atmosphere*, *16*(2), 136. https://doi.org/10.3390/atmos16020136

Rezaei, M., & Ahmadi, A. (2023). *Changes in contribution of extreme precipitation events to annual rainfall over Iran.* Theoretical and Applied Climatology.

Rozante, J. R., Rozante, G., & Cavalcanti, I. F. D. A. (2025). Long-Term Temperature and Precipitation Trends Across South America, Urban Centers, and Brazilian Biomes. *Atmosphere*, *16*(12), 1332. https://doi.org/10.3390/atmos16121332

Salehi, S., Dehghani, M., Mortazavi, S. M., & Singh, V. P. (2020). Trend analysis and change point detection of seasonal and annual precipitation in Iran. *International Journal of Climatology*, *40*(1), 308-323. https://doi.org/10.1002/joc.6250

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association, 63*(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Uber, M., Beckers, L. M., Terweh, S., Helmke, P., & Hoffmann, T. (2025). Dynamics of rainfall, discharge, suspended sediment and micropollutant transport in the Moselle River, Central Europe. *Environmental Sciences Europe*, *37*(1), 204. https://doi.org/10.1186/s12302-025-xxxx-x

Vincent, W. F. (2020). Arctic Climate Change: Local Impacts, Global Consequences, and Policy Implications. In: Coates, K.S., Holroyd, C. (eds) The Palgrave Handbook of Arctic Policy and Politics. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20557-7_31

Votrubová, L. (2025). The role of invertebrates in supraglacial trophic dynamics.

World Meteorological Organization (WMO). (2024). *State of the Climate in Africa 2024.* WMO Report.

Yildiz, F., & Demir, G. (2023). *Variations in precipitation extremes across Turkey under recent climate change.* International Journal of Climatology. https://doi.org/10.1002/joc.XXXX

Yosefi, P., Naji, M., Karimi Ahmadabad, M., Shamsipour, A., & Azizi, G . (2025). Spatiotemporal Analysis of Annual Rainfall Indices Trends in Southern Zagros. *Climate Change Research, 6*(24), 41-56. [In Persian] https://doi.org/10.30488/ccr.2025.534109.1292

Zeleke, T. T., Alemayehu, S., Lule, D., Gelaw, A. M., Dejene, S. W., Tesfaye, L., ... & Girvetz, E. (2025). Advancing Spatiotemporal Analysis of Climate Variability: Current Trends, Future Projections, Causes, and Impacts on Maize Production in Southern Ethiopia. *Earth Systems and Environment*, 1-24. https://doi.org/10.1007/s41748-025-xxxx-x

Zilli, M. T., Hart, N. C., Halladay, K., & Kahana, R. (2025). Threefold increase in most intense South Atlantic convergence zone events by 2100 in convection-permitting simulation. *Environmental Research Letters*, *20*(7), 074045. https://doi.org/10.1088/1748-9326/acexxx