Vol. 15, No. 3, Autumn 2026, p. 181-203 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2026.99097.1672 OPEN ACCESS

The Role of Temperature and 500-hPa Geopotential Height Anomalies in Heavy Precipitation Events over Iran

Farahnaz Nakhjiri [1], Jafar Masoompour Samakosh [1]*, Nabi Mirzaei [2]

[1] Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran
[2] Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 02 June 2026

Revised: 29 August 2026

Accepted: 30 August 2026

Available Online:

30 August 2026

Keywords:

Heavy Precipitation

Geopotential Height Anomalies

Temperature Anomalies

Principal Component Analysis (PCA)

Iran

ABSTRACT

In this study, atmospheric circulation anomalies associated with heavy precipitation events in Iran during the 1990–2022 period were investigated through the analysis of 500-hPa geopotential height and temperature fields, using both observational daily precipitation records and gridded datasets. Heavy precipitation days were first identified based on the 95th percentile threshold, after which associated atmospheric patterns were extracted using Principal Component Analysis (PCA). The results indicated that in autumn and winter, heavy precipitation events predominantly occurred over western Iran and the Caspian Sea coasts, while in spring their maximum occurrence was observed over the western and northern regions of the country. Cluster analysis revealed five patterns of negative geopotential height anomalies, including the expansion of the polar vortex, a mid-tropospheric cut-off low accompanied by strong geopotential height and temperature anomalies, a geopotential height anomaly linked to a Mediterranean trough, and the expansion of a European low-pressure system together with its interaction with the Mediterranean trough over the region. From a temporal perspective, the first and second patterns mainly occur in January and February, concurrent with cold-air outbreaks from higher northern latitudes. The mid-tropospheric cut-off low pattern, characterized by a −180 geopotential meter anomaly, represents the most dominant atmospheric pattern associated with heavy precipitation events in Iran, accounting for 157 occurrences and 34% of the total frequency. Accordingly, the most influential thermal pattern governing heavy precipitation in Iran is the polar cold-air outbreak surrounding the mid-tropospheric cut-off low.

* Corresponding author: Jafar Masoompour Samakosh E-mail address: j.masoompour@razi.ac.ir

How to cite this article: Nakhjiri, F., Masoompour Samakosh, J., & Mirzaei, N. (2026). The Role of Temperature and 500-hPa Geopotential Height Anomalies in Heavy Precipitation Events over Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(3), 181-203. https://doi.org/10.22067/geoeh.2026.99097.1672

©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

Climate hazards, particularly heavy precipitation, have increased in frequency and intensity under ongoing climate change and pose significant risks to human societies. In arid and semi-arid regions such as Iran, heavy rainfall frequently triggers flooding and substantial socio-economic damage. These extreme events are largely controlled by large-scale atmospheric circulation anomalies, especially at mid-tropospheric levels. Negative anomalies in geopotential height and temperature at 500 hPa strengthen cyclonic circulation, enhance dynamic ascent, and favour the development of deep troughs or cut-off lows. Identifying the dominant mid-level circulation patterns associated with heavy precipitation is therefore essential for improved understanding, prediction, and water-resource management in Iran. The present study examines the role of 500 hPa geopotential-height and temperature anomalies in the occurrence of heavy precipitation across the country.

Material and Methods

Daily precipitation data from 100 synoptic stations for the period 1990–2022 were obtained from the Iran Meteorological Organization. Geopotential height and temperature fields at 500 hPa were extracted from the ECMWF archive. Heavy-precipitation days were identified, and the corresponding mid-level anomaly fields were calculated relative to the long-term climatology. Principal component analysis (PCA) followed by cluster analysis was applied to the anomaly fields to extract the dominant circulation patterns. The contribution of each pattern to the total variance and its temporal frequency were quantified. Selected representative cases were subjected to detailed synoptic analysis. Statistical relationships between the magnitude of the geopotential-height anomaly and precipitation intensity were also examined. Data processing was performed in MATLAB and Excel; maps were produced with GrADS and Surfer.

Results and Discussion

Spatially, the highest frequencies and intensities of heavy precipitation (>100 mm day^{-1}) occur over the western Caspian Sea basin, the central and northern Zagros, and parts of north-eastern Iran. Temporally, events are concentrated in the cold season, with a clear maximum in March and a minimum in October.

Cluster analysis of the 500 hPa anomaly fields identified five distinct synoptic patterns that together account for the majority of heavy-precipitation events:

- Pattern 1 is characterised by pronounced meridional flow and the deepening of a mid-level trough accompanied by a cut-off low west of Iran. It develops under a blocking high over the northern Caucasus–Russia region. The resulting negative geopotential-height and temperature anomalies intensify the thermal gradient and promote strong ascent, producing heavy rainfall mainly over western and south-western Iran. This pattern is essentially confined to winter.
- Pattern 2 (116 events, ≈25 % of cases) features a strong European blocking ridge that generates a cut-off low (inverted-omega type) over the eastern Mediterranean. The associated intense negative height and temperature anomalies enhance dynamic lifting and moisture transport from southern water bodies. Precipitation is widespread, frequently exceeding 30–50 mm over eastern, southern and north-western Iran. The pattern peaks in December–March and occasionally appears in April.
- Pattern 3 (60 events, ≈16 %) consists of a coupled European–Mediterranean trough system. Deepening of the Atlantic–European low and simultaneous amplification of the Mediterranean trough place most of Iran beneath the trough axis. Broad negative height and temperature anomalies favour extensive moderate-to-heavy rainfall, especially over western Iran. Frequency is highest in April, May and November.

- Pattern 4 is linked to an omega-type blocking over the North Atlantic–Europe. Meridional amplification on the eastern flank of the block extends a deep trough southward to approximately 25° N. Strong cold-air advection over the eastern Mediterranean produces marked negative temperature anomalies and frontogenesis, resulting in widespread heavy precipitation (often >15 mm, locally up to 90 mm) across more than half of the country. The pattern is most frequent in February and April.
- Pattern 5 (157 events, ≈34 % of total variance) is the dominant mode. It is a hybrid blocking configuration that isolates a cut-off low (cold pool) over the eastern Mediterranean. Geopotential-height anomalies reach −180 to −250 gpm and temperature anomalies reach −6 to −12 °C at the centre of the low. Intense cyclonic ascent draws moist air from the Arabian Sea, Oman Sea, Persian Gulf and Red Sea, generating heavy precipitation along the trough axis across large parts of Iran. This pattern occurs throughout the cold season, with a maximum in March, and is observed in a greater number of months than the other patterns.

In all five patterns, heavy precipitation is accompanied by a pronounced negative anomaly of both geopotential height and temperature at 500 hPa over the eastern Mediterranean and western Iran. The common dynamical ingredient is enhanced mid-level ascent associated with the trough or cut-off low.

Conclusion

Heavy precipitation in Iran is primarily driven by large-scale mid-tropospheric circulation anomalies that appear as deep troughs or cut-off lows over the eastern Mediterranean–western Iran sector. The five identified patterns share a common signature of strong negative geopotential-height and temperature anomalies that promote dynamical ascent and moisture convergence. The most frequent and impactful configuration is the mid-level cut-off low (Pattern 5), which alone accounts for approximately one-third of all heavy-precipitation events. Recognition of these recurring anomaly patterns provides a useful synoptic framework for forecasting and risk management of extreme rainfall in Iran.

جلد ۱۵، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵ ، ص ۲۰۳-۱۸۱ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2026.99097.1672 دسترسی آزاد

نقش ناهنجاری‌های دما و ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال در رخداد بارش‌های سنگین ایران

فرحناز نخجیری[۱]، جعفر معصوم‌پور سماکوش[۱]*، نبی میرزایی[۲]

[۱] گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

[۲] گروه آب و هواشناسی، دانشکدهٔ علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۸

کلمات کلیدی:

بارش سنگین

ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل

ناهنجاری دما

تحلیل مؤلفه‌های اصلی

ایران

چکیده

در این پژوهش، ناهنجاری‌های گردش جوی مرتبط با رخدادهای بارش سنگین ایران طی دوره ۲۰۲۲-۱۹۹۰ با تحلیل میدان‌های دما و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و استفاده از داده‌های بارش روزانه مشاهداتی و شبکه‌ای بررسی شد. ابتدا روزهای با بارش سنگین (صدک ۹۵ام) مشخص و سپس با تحلیل مؤلفه اصلی، الگوهای جوی مرتبط شناسایی گردید. نتایج نشان داد در فصل پاییز و زمستان، بارش‌های سنگین در نیمهٔ غربی ایران و سواحل دریای خزر و در فصل بهار نیز بیشینهٔ آن در غرب و شمال کشور رخ داده است. تحلیل خوشه‌ای ۵ الگوی ناهنجاری منفی ارتفاع ژئوپتانسیل شامل گسترش تاوه قطبی، کم‌ارتفاع بریدهٔ تراز میانی با ناهنجاری شدید ارتفاع ژئوپتانسیل و دما، ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل با فرود مدیترانه، و گسترش کم‌فشار اروپایی و ادغام آن با فرود مدیترانه بر منطقه را نشان داد. به لحاظ زمانی، الگوی اول و دوم عموماً در ژانویه و فوریه هم‌زمان با ریزش هوای سرد شمال‌سو رخ می‌دهد. الگوی کم‌ارتفاع بریدهٔ تراز میانی با ناهنجاری ۱۸۰- ژئوپتانسیل متر، مهم‌ترین الگوی غالب جوی رخداد بارش‌های سنگین ایران با ۱۵۷ رخداد و ۳۴٪ فراوانی است. بر این اساس، مهم‌ترین الگوی دمایی مؤثر بر رخداد بارش سنگین ایران، الگوی ریزش سرد قطبی حول کم‌ارتفاع بریدهٔ تراز میانی جو است.

مقدمه

امروزه یکی از مهمترین بحران‌های پر تکرار در سطح جهان، وقایع حدی آب و هوایی است که زندگی انسان‌ها را به طور جدی تحت تأثیر قرار داده است (Kumar, 2023). اخیراً روند مخاطرات آب و هوایی از جمله بارش سنگین، امواج گرمایی، خشکسالی و سرمای فرین به دلیل تغییرات اقلیمی افزایش یافته است (Xiong & Yang, 2024). مطالعهٔ مخاطرات اقلیمی به عنوان پر تکرارترین مخاطرات جهانی و اثرگذار بر تمامی فعالیت‌های بشری و تحمیل خسارات اقتصادی بر آنها، مورد توجه محققان بوده است. علاوه بر این، بسیاری از پدیده‌های اقلیمی مانند دوره‌های خشک و مرطوب، بارش سنگین و موج سرد و گرم با تکرار سیستم‌های هوا مرتبط هستند. بارش‌های سنگین نیز یکی از مهمترین مخاطرات اقلیمی مناطق خشک و نیمه خشک

* نویسندهٔ مسئول: جعفر معصوم پور سماکوش E-mail: j.masoompour@razi.ac.ir

از جمله ایران است که هر ساله منجر به خسارات زیادی می‌شود (Mostafaii, Alijani & Saligheh, 2016). بارش‌های سنگین که به عنوان مخاطره آب و هوایی و عامل رخداد سیلاب شناخته می‌شوند تحت تأثیر الگوی گردشی بزرگ مقیاس رخ می‌دهند (Alijani, 2009). به عبارتی، ناهنجاری‌های جوی به دلیل تغییرات سیستم‌های فشار در سطوح فوقانی جو رخ می‌دهد (Zolfaghari, Masoompour Samakosh, Jalilian & Fathnia, 2013). بارش یکی از منابع مهم تأمین آب و مهمترین مؤلفهٔ ورودی به سیستم‌های هیدرولوژیکی به شمار می‌رود (Masoumpour Samakosh, Jalilian & Yari, 2017) و اساساً در بین عناصر اقلیمی، از اهمیت بیشتری برخوردار است، چرا که تعیین کنندهٔ شرایط اقلیمی بوده و بر حیات و تداوم اکوسیستم‌های طبیعی کرهٔ زمین نیز تأثیر می‌گذارد (Raziei, Azizi, Mohammadi & Khaghkhagh, 2011؛ Hosseinzadeh & Moradi, 2025). به همین دلیل، مطالعهٔ نقش عوامل همدیدی موثر بر رخداد آن، در تشخیص به موقع و کنترل سیلاب و کاهش خسارات ناشی از آن اهمیت دارد (Azizi & Samadi, 2007). به دلیل تبعات زیاد ناشی از رخداد این بارش‌ها، پیش‌بینی دقیق رخداد بارش‌های سنگین و شناخت علل و عوامل رخداد آن‌ها در برنامه‌ریزی‌های کلان محیطی از اهمیت زیادی برخوردار است (Mir Mosavi, 2016؛ Hamidianpour & Khosravi, 2019). به ویژه اینکه در سال‌های اخیر میزان بارش‌های کشور تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی کاهش یافته (Behmanesh, 2015; Ghiasabadi Farahani, 2018)، و بر رخداد بارش‌های سنگین ایران افزوده شده است (Darand, 2016؛ Mirzaei, Alijani, Hejazizadeh, Darand & Nasserzadeh, 2024).

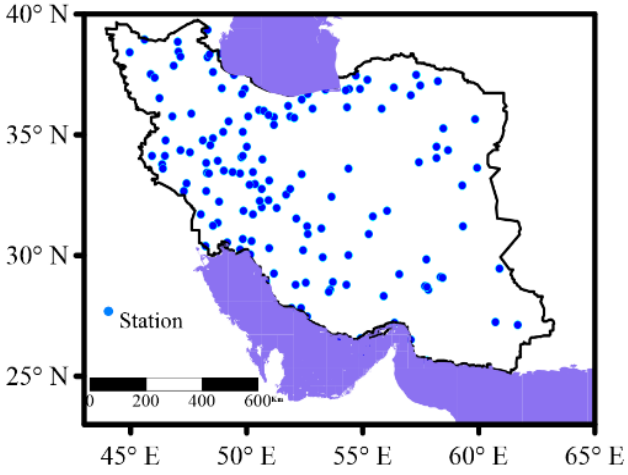
در رخداد بارش‌های فرین، دگرگونی شدید در شرایط جوی رخ می‌دهد که منجر به صعود شدید و کاهش ضخامت جو می‌شود (Rousta et al., 2017). در واقع آشفتگی‌های جوی توسط عوامل گردشی و مراکز فشار جوی کنترل می‌شود، به طوری که تغییرات نابهنجار در رخداد بارش‌های سنگین ناشی از تغییرات الگوهای فشار جوی در یک دورهٔ زمانی است (Mostafaii et al., 2016). به طور کلی ناهنجاری منفی جو بیانگر تقویت کم فشارها و افزایش بارش سنگین است (Toreti et al., 2010). در این راستا لیما و همکاران (Lima et al., 2010) نشان دادند که بسیاری از پدیده‌های محیطی و عناصر جوی مانند باد، فشار، دما و بارش سنگین، متأثر از ناهنجاری الگوهای بزرگ مقیاس جوی نوسان پیدا می‌کنند (Ćwik, McPherson, Richman & Mercer, 2022). این در حالی است که رخداد بسیاری از مخاطرات اقلیمی، ناشی از تغییرات الگوهای جوی در تراز میانی جو است (Nguyen, 2012). تغییرات تاوه قطبی نیز به عنوان یکی از سامانه‌های کلان مقیاس تراز میانی، نقش مهمی در ایجاد این ناهنجاری‌ها دارد (Kashki, 2018). با بررسی روند تاوه قطبی در نیمکره شمالی نشان دادند که سطح این سامانه در اکثر ماه‌های سال دارای روند کاهشی معنادار بوده و این تغییرات می‌تواند منجر به ناهنجاری در الگوهای آب‌وهوایی مناطق مختلف شود. ناهنجاری الگوهای بزرگ مقیاس در تراز میانی جو با رخداد بارش‌های سنگین ارتباط مستقیمی دارد (Zolfaghari, Masoompour Samakosh, Rashidi Naserkhani & Miri, 2013).

مطالعات مختلفی اثر تغییرات الگوی‌های جوی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را در رخداد بارش‌های سنگین مطالعه کرده‌اند (Tomczyk & Bednorz, 2019; Mirzaei, Alijani & Jahedi, 2020; Han, Guo, Zhou & Hao, 2021; Ibebuchi, 2022; Saghafi, Barati, Alijani & Moradi, 2023; Shahi & Rai, 2023; Gao, Schlosser, O'Gorman, Monier & Entekhabi, 2017; Mir Mosavi, 2016; Flaounas, et al., 2016). اقلیم‌شناسی ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در رابطه با تورنادو در آمریکا توسط سویک و همکاران (Ćwik et al., 2022) مطالعه شد که در این رابطه سه الگوی جوی اصلی را در رابطه با ترنادوها شناسایی کردند. به طور کلی بر پایه مطالعات پیشین، در تحلیل شرایط همدیدی مؤثر بر رخداد بارش سنگین، تحلیل شرایط گردشی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال اهمیت بیشتری دارد. به عبارتی لایه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به عنوان تراز میانی جو دارای بیشترین جرم است و با بسیاری از آشفتگی‌های جوی ارتباط دارد (Alijani, 2009)، و برای درک اثر ناهنجاری گردش جو در زمان بارش‌های سنگین ایران نیز، بررسی تغییرات الگوهای جو در تراز میانی جو از اهمیت بیشتری برخوردار است (Mohammadi, Saligheh, Naserzadeh & Akbari, 2020). از جمله لطفی و همکاران، (Lotfi, Akbari Azirani, Shakiba, Rabbani & Dashtbozorgi, 2024) نشان دادند که کم‌فشارهای بریده با ایجاد ناپایداری جوی تأثیر چشمگیری بر رخداد بارش سنگین ایران، به ویژه در ایستگاه‌های شمالی دارند و رابطه مستقیم معناداری بین فراوانی رخداد این سامانه‌ها و بارش سنگین وجود دارد. همچنین با افزایش دما و پیشروی پرفشار جنب‌حاره‌ای، محل تشکیل و مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده به سمت

عرض‌های جغرافیایی شمالی‌تر کشیده شده است. با این حال، ناهنجاری‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در رابطه با رخداد بارش‌های سنگین ایران به صورت یک‌جا بررسی نشده است. از این رو با شناسایی ناهنجاری الگوی گردش بزرگ مقیاس جو می‌توان تغییرات، فراوانی، شدت، و توزیع مکانی بارش‌ها را بررسی و دلایل فیزیکی آن را بیان کرد (Fattahi & Shiravand, 2014). تحلیل بارش‌های سنگین کشور نیازمند تحلیل همدید ناهنجاری‌های الگوهای سطح بالاست (Gayoor, Halabian, Saberi & Poorjazi, 2013)، که مهمترین این الگوها در قالب ناهنجاری‌های ارتفاعی و دمای نمایان می‌گردد. با این توضیح هدف از انجام این مطالعه بررسی نقش ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل و دمایی سطوح میانی جو در رخداد بارش‌های سنگین ایران است.

مواد و روش‌ها

با هدف نقش ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر بارش سنگین ایران، از رویکرد محیطی به گردشی استفاده شده است. در مرحله اول، داده‌های بارش ۱۰۰ ایستگاه سینوپتیک (شکل ۱) برای بازه زمانی سی و سه ساله (۲۰۲۲-۱۹۹۰) از سایت سازمان هواشناسی اخذ شد، سپس تحلیل‌ها با هدف مرتب‌سازی داده‌ها و تحلیل بارش‌های سنگین انجام گرفت. در این پژوهش برای دستیابی به ناهنجاری گردش جو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در زمان بارش‌های سنگین ایران، داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل از تاریخ اول ژانویه ۱۹۹۰ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۲ از سایت مرکز پیش‌بینی میان مدت جوی اروپایی[1] دریافت شد. در مرحله بعد، داده‌ها به صورت ماهانه و سالانه نیز برای هر ایستگاه‌ها مرتب شد تا تحلیل آماری لازم بر روی آن‌ها انجام گیرد. در مرحله سوم، بارش‌های سنگین برای ایستگاه‌های مذکور بر اساس صدک ۹۵ام محاسبه گردید. همزمان با بررسی تغییرات بارش سنگین ایران، میانگین بلندمدت ارتفاع ژئوپتانسیل برای ماه‌های مختلف سال با هدف بررسی آرایش الگوهای جوی بررسی شد. برای تحلیل ناهنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیل و دما در زمان بارش‌های سنگین کشور، ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل و آرایش ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای همراه با بارش سنگین تحلیل گردید سپس با استفاده از روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)[2]، الگوهای مرتبط با آن شناسایی گردید. به عبارتی دیگر با توجه به حجم زیاد آمار مربوط به بارش سنگین، برای شناسایی نقش الگوهای ارتفاعی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از تحلیل خوشه‌ای بهره گرفته شده است. الگوهای دمایی مرتبط با بارش‌های سنگین نیز مشخص و سهم هر الگو از تغییرات کل محاسبه گردید و چند نمونهٔ منتخب نیز به عنوان نمایندهٔ هر الگوی بارش سنگین ارائه گردید. در نهایت ارتباط آماری بین ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل و بارش‌های سنگین بررسی شد. برای استخراج داده‌ها و تحلیل آن از نرم افزارهای متلب، اکسل و برای ترسیم نقشه‌ها از نرم‌افزارهای گردس و سورفر بهره گرفته شده است.



شکل۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه

Fig.1. Geographic location of the studied stations

1- ECMWF
2 -Principal Component Analysis

تحلیل خوشه‌ای

برای گروه‌بندی الگوهای گردش جوی مرتبط با بارش‌های سنگین از روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) استفاده شد. با این روش می‌توان الگوهایی را که از تکرارپذیری بسیار پایینی برخوردارند، حذف و الگوهای پرتکرار را طبقه‌بندی کرد (Richman, 1981). برای گروه‌بندی الگوهای گردشی، در بیشتر موارد از آرایه S تحلیل مؤلفه اصلی برای کاهش عامل‌ها کمک می‌گیرند (Kidson, 2000). با آرایه S بر روی ماتریس همبستگی انجام گرفت و در نهایت با کمک آزمون غربالی، ۲ عامل برای تحلیل‌های بعدی انتخاب شدند. با استفاده از چرخش واریماکس، داده‌های مذکور چرخش داده شد و سپس با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی، روزهای استخراج شده بر اساس نمرهٔ عاملی هر یک از مؤلفه‌ها طبقه‌بندی شد. مراحل انجام کار به شرح زیر عبارتند از:

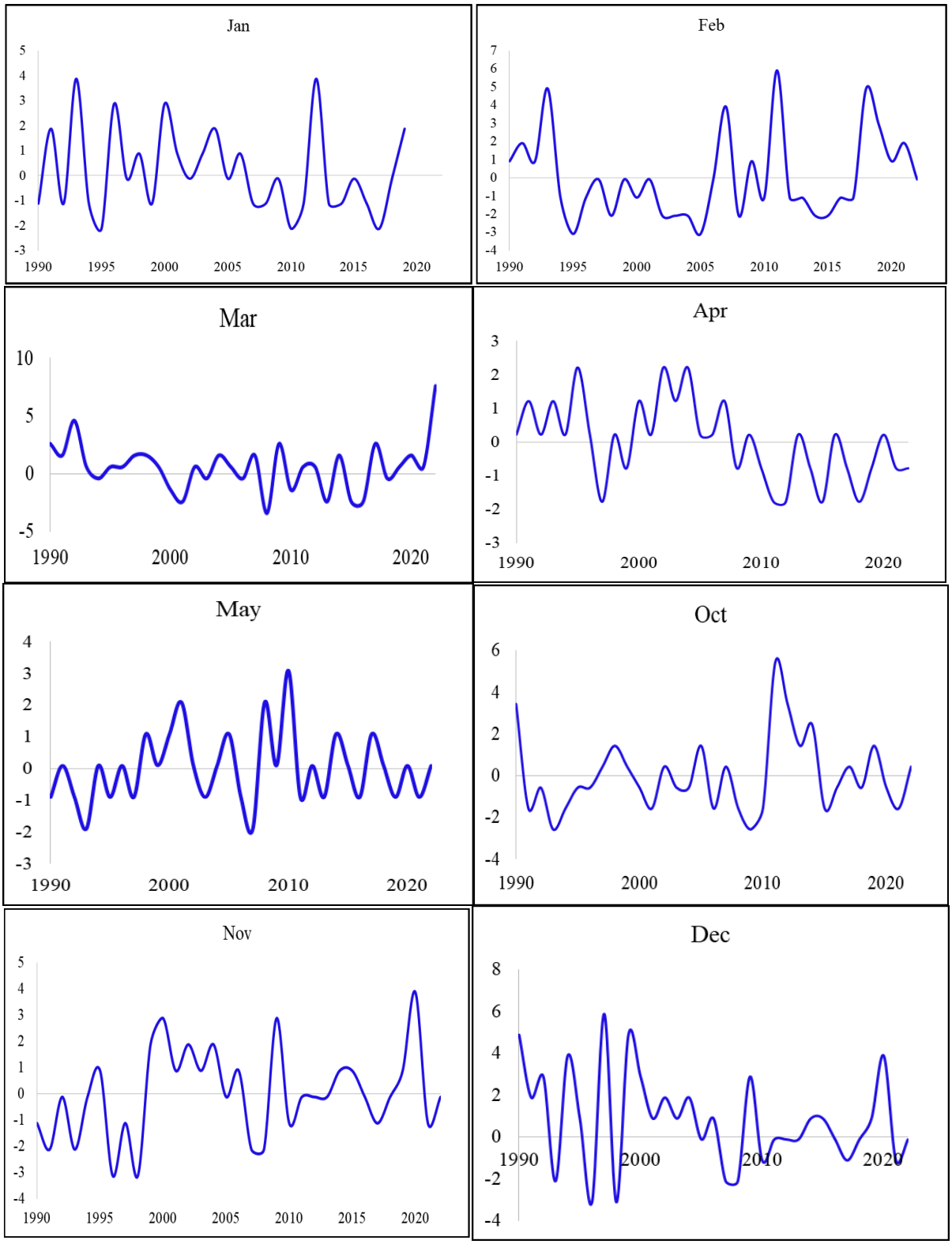
- استخراج داده‌های روزانه ارتفاع ژئوپتانسیل و دما با تفکیک ۲/۵* ۲/۵ درجه مربوط به بارش‌های سنگین
- تشکیل ماتریس N,P، تعداد روزها (N)، و ارتفاع ژئوپتانسیل و دما (P)
- محاسبه نمرهٔ استاندارد متغیرها و تشکیل ماتریس همبستگی
- تعیین عامل‌ها با استفاده از آزمون غربال ۲
- ایجاد ماتریس بارگویه‌ها برای تعیین ارتباط بین عامل‌ها و متغیرهای اولیه
- خوشه‌بندی روزهای همراه با بارش سنگین
- تهیهٔ نقشهٔ ترکیبی برای هر خوشه
- تحلیل و تفسیر الگوهای به دست آمده

نتایج و بحث

بررسی ناهنجاری ماهانهٔ بارش‌های ایران در دورهٔ ۲۰۲۲-۱۹۹۰

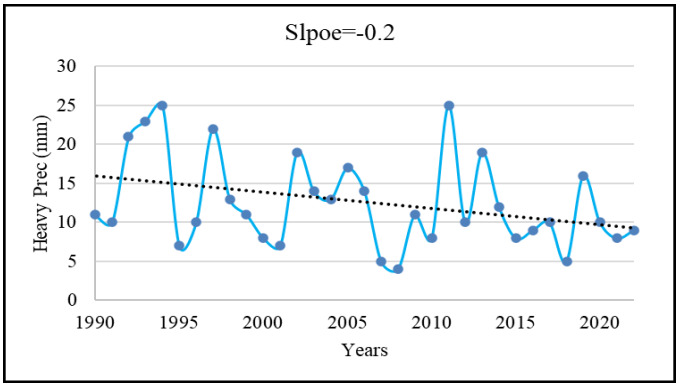
ناهنجاری بارش‌های سنگین برای ماه‌های مختلف نشان می‌دهد که میانگین بارش‌های سنگین در ماه ژانویه بین ۳- تا ۵ میلی‌متر متغیر بوده است. ناهنجاری مثبت بارش طی ۲۰۰۵-۱۹۹۰ مشاهده شده، و از سال ۲۰۰۶ یک ناهنجاری منفی دیده می‌شود که تا سال ۲۰۱۰ تداوم داشته است. در ماه فوریه، ناهنجاری منفی در بازهٔ زمانی ۲۰۰۵-۱۹۹۰، و ناهنجاری مثبت طی ۲۰۰۶-۲۰۱۱، بیانگر تغییرات شدید بارش طی این ماه است، به طوری که منطقهٔ مورد مطالعه تغییرات شدیدی را از لحاظ بارش سنگین تجربه کرده است. کاهش قابل ملاحظه بارش‌های سنگین و ناهنجاری منفی آن طی ماه‌های سرد سال که عمدهٔ بارش‌های اصلی ایران رخ می‌دهد بیانگر کاهشی شدن بارش‌های سنگین است (شکل ۲). در ماه اکتبر و نوامبر، افزایش میانگین بارش قابل مشاهده است، به طوری که در سال‌های اخیر میانگین این بارش‌ها افزایش یافته است. این در حالی است که کاهش قابل ملاحظه‌ای در میانگین بارش‌های سنگین ماه دسامبر دیده می‌شود. این کاهش طی دو دهه اخیر محسوس‌تر می‌باشد، به طور کلی در بین ماه‌های مختلف سال، تنها در ماه نوامبر افزایش مقدار بارش به صورت ملایم دیده می‌شود، اما در سایر ماه‌ها کاهش بارش طی دههٔ اخیر محسوس است (شکل ۲).

روند سری زمانی بارش‌های سنگین ایران طی بازه ۲۰۲۲-۱۹۹۰ نشان می‌دهد که بارش‌های سنگین ایران در اوایل دهه ۹۰ و بازه ۲۰۱۳-۲۰۰۹ دارای مقدار بیشینهٔ خود بوده است (شکل ۳)، به طوری که میانگین بارش‌ها بیشتر از ۲۰ میلی‌متر ثبت شده است. در حالی که در سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸، بارش‌های سنگین، کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند که طی این دوره، مقدار بارش دریافتی به کمتر از ۱۵ میلی‌متر رسیده است. طی دورهٔ مورد مطالعه، میانگین بارش‌های سنگین ایران ۱۲ میلی‌متر بوده، و روند کلی بارش‌های سنگین طی دوره مطالعاتی، ۰/۲- کاهش را نسبت به هر سال نشان می‌دهد (شکل ۳). این کاهش می‌تواند با تغییرات در فراوانی و شدت سیکلون‌های مدیترانه‌ای و الگوهای بزرگ‌مقیاس جوی مرتبط باشد، زیرا تغییر در دینامیک این سامانه‌ها مستقیماً بر رخداد بارش‌های حدی تأثیر می‌گذارد (Givon et al., 2024).



شکل ۲- ناهنجاری ماهانهٔ بارش‌های سنگین ایران طی بازهٔ ۲۰۲۲-۱۹۹۰

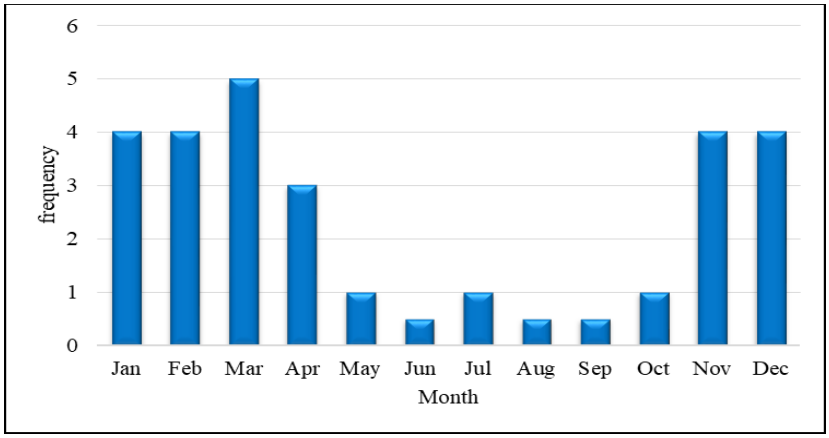
Fig.2. Monthly anomalies of heavy precipitation in Iran during the period 1990–2022



شکل ۳- روند سری زمانی بارش‌های سنگین ایران طی دوره ۲۰۲۲- ۱۹۹۰

Fig.3. Time series trend of heavy precipitation events across Iran during the period 1990–2022

فراوانی میانگین ماهانه تعداد روزهای بارش سنگین کشور نشان می‌دهد که تعداد روزهای با بارش‌های سنگین از ماه نوامبر تا مارس بیشتر از ماه‌های دیگر است. ماه مارس با میانگین ۵ روز، بیشینه و ماه‌های فصل تابستان (جولای تا سپتامبر) کمترین بارش سنگین را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴). دلیل کاهش بارش طی دوره گرم سال احتمالاً به دلیل حاکمیت پرفشار جنب حاره‌ای درکشور است.



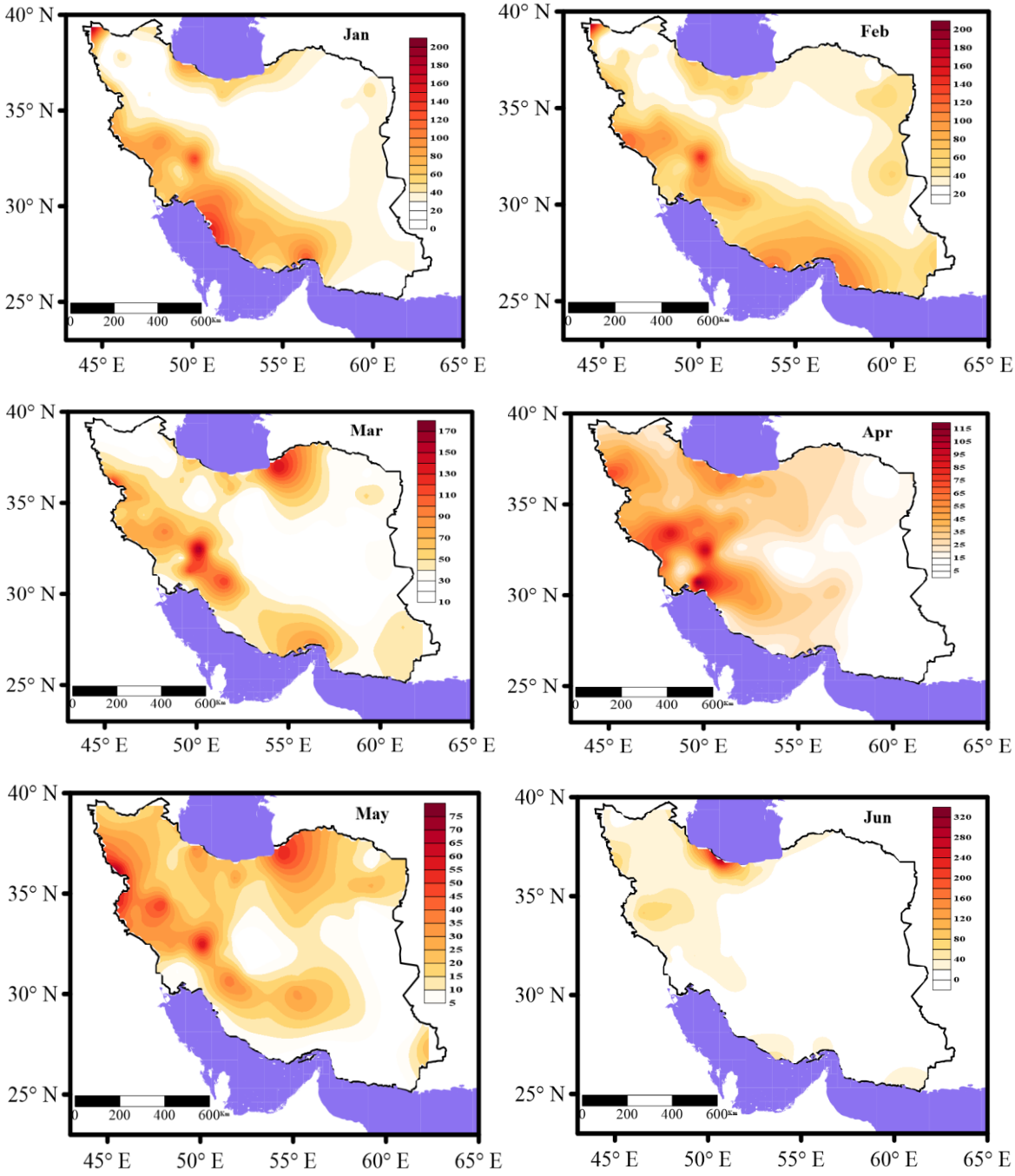
شکل ۴- فراوانی میانگین ماهانه تعداد روزهای بارش سنگین ایران

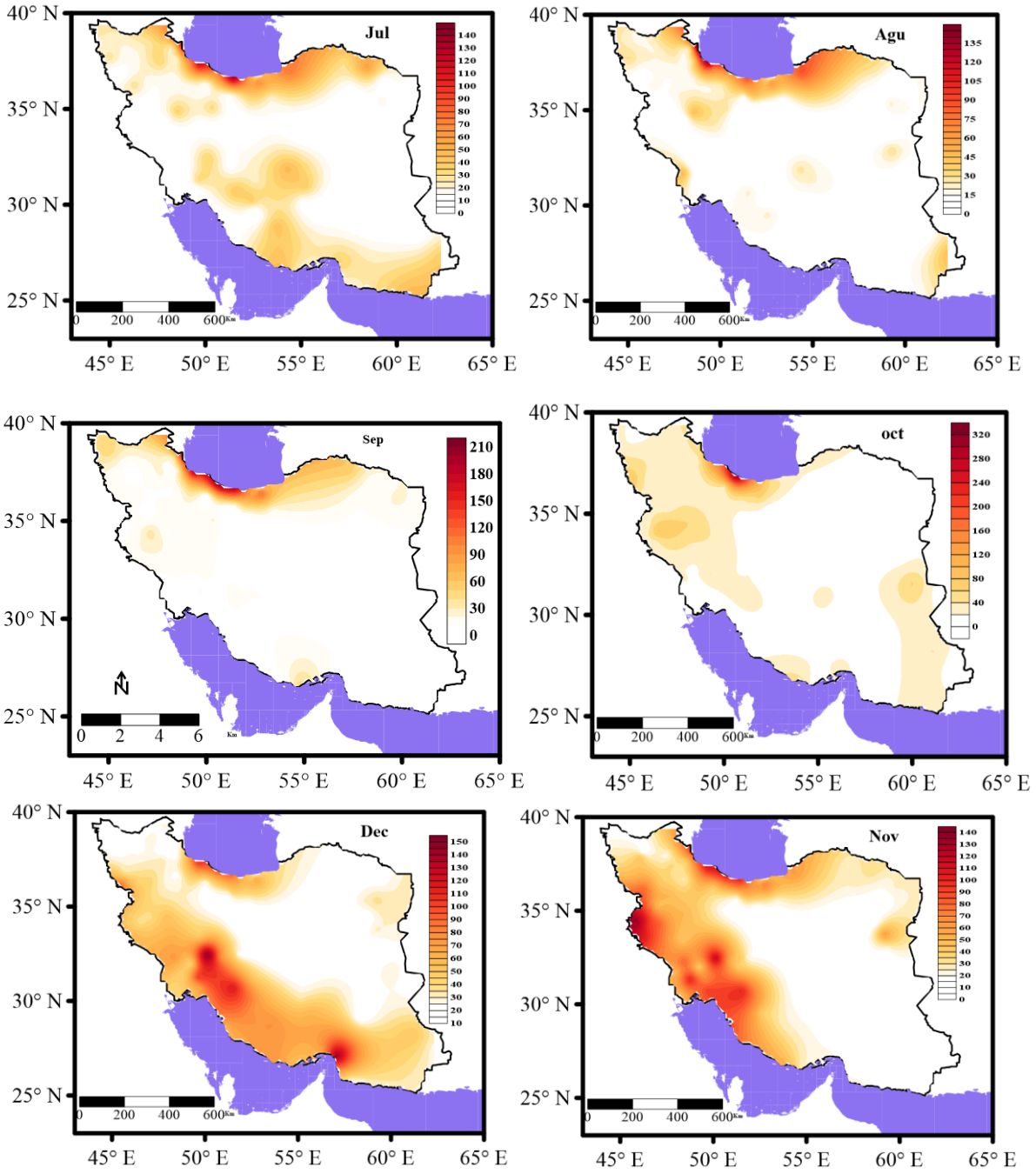
Fig.4. Monthly mean frequency of heavy precipitation days across Iran

توزیع مکانی بیشترین بارش روزانه

پراکنش مکانی حداکثر بارش روزانه ایران برای ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد (شکل ۵) که طی ماه‌های زمستان (ژانویه، فوریه و مارس)، تمرکز بارش‌های سنگین در نیمهٔ غربی، سواحل شمالی کشور و بخش‌های از جنوب غربی کشور است. این الگوی مکانی را می‌توان ناشی از نقش سیکلون‌های برون‌حاره‌ای و بر هم‌کنش آن‌ها با ناهمواری‌های منطقه دانست، به طوری که این سامانه‌ها اصلی‌ترین منبع بارش‌های سنگین در حوضه مدیترانه و خاورمیانه محسوب می‌شوند (Rousseau-Rizzi et al., 2024; El-Sehwagy, Salah, Abdel Wahab, ElTaweel & Perez-Alarcon, 2026). بیشترین بارش زمستانه برروی جنوب غرب، زاگرس مرکزی و سواحل شمالی دریای خزر دیده می‌شود. در این زمان حداکثر بارش روزانه طی یک روز به مقدار ۲۰۰ میلیمتر است که که بیشتر در سواحل جنوبی دریای خزر و جنوب غرب کشور رخ داده است. طی سه ماه آپریل، می و ژوئن، مقادیر استاندارد شده ارتفاع ژئوپتانسیل طی دهه اول (۲۰۰۱-۱۹۹۰) کمتر از دهه‌های دیگر بوده است که بیانگر ناهنجاری منفی بر روی منطقه است. در دهه دوم نیز همین شرایط غالب است، به طوری که تفاوت چشمگیری در سری زمانی ارتفاع ژئوپتانسیل دیده می شود. در دو دهه پایانی (۲۰۲۲-۲۰۱۲؛ ۲۰۱۱-۲۰۰۲) نیز افزایش چشمگیری در سری زمانی ارتفاع ژئوپتانسیل دیده می‌شود.

طی این زمانی مقادیر استاندارد شده بین ۰/۲ تا ۱/۵ متغیر بوده است. نکتهٔ قابل توجه در هر سه ماه این است که افزایش در مقدار ارتفاع ژئوپتانسیل به طور هم‌زمان از سال ۲۰۱۰ آغاز شده است که بیانگر تغییرات شدید در الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل طی دورهٔ مورد مطالعه است. بیشینه مقدار بارش در اکتبر بر روی نوار شمالی دریای خزر و شمال غرب است. در حالی که در ماه نوامبر بر گسترده مکانی بارش‌های سنگین افزوده شده است و مناطق زیادی از غرب و جنوب غرب بارش بیش از ۵۰ میلی‌متر را تجربه کرده‌اند. شرایط مذکور طی ماه دسامبر نیز دیده می شود و مقادیر بارش بیش از ۵۰ میلی متر در سواحل جنوبی دریای خزر و جنوب غرب ایران تمرکز دارد. یافته‌های این بخش با نتایج یافته‌های میرزایی و همکاران (Mirzaei et al., 2024) مطابقت دارد.



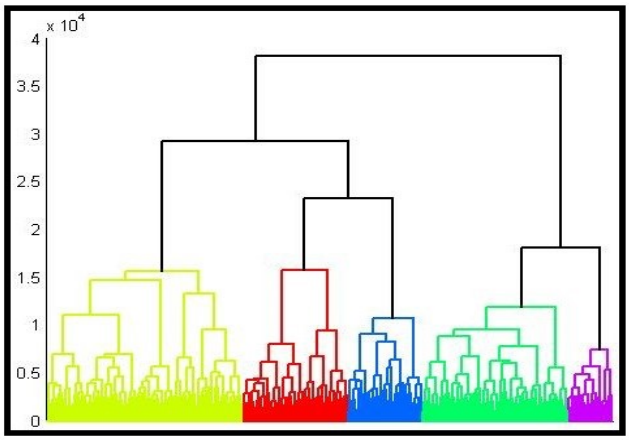


شکل ۵- پراکنش مکانی حداکثر بارش روزانه؛ در گسترهٔ ایران برای ماه‌های مختلف سال

Fig.5. Spatial distribution of maximum daily precipitation across Iran for different months of the year

تحلیل مؤلفهٔ اصلی برای شناسایی الگوهای جوی ایجاد کننده بارش‌های سنگین ایران

در این بخش نتایج تحلیل مؤلفهٔ اصلی بر روی داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در زمان بارش‌های سنگین کشور ارائه شده است. با اجرای تحلیل خوشه‌ای به شیوه ادغام وارد بر روی ماتریس داده‌های ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (برای روزهای با بارش بیش از صدک ۹۵ام)، الگوهای گردشی مؤثر بر رخداد بارش‌های سنگین ایران شناسایی شد که پنج الگوی اصلی، بیشترین همگنی با الگوهای بارش سنگین ایران را توجیه می‌کنند (شکل۶).



شکل ۶- درخت خوشه‌بندی ۵ الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل حاصل از تحلیل خوشه‌ای داده‌های بارش‌های سنگین ایران

Fig.6. Dendrogram of 5 geopotential height patterns from cluster analysis of heavy precipitation data in Iran

جدول ۱- مشخصات الگوهای گردشی مربوط به ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

Table 1- Geopotential height anomaly circulation patterns specification at 500 hPa level

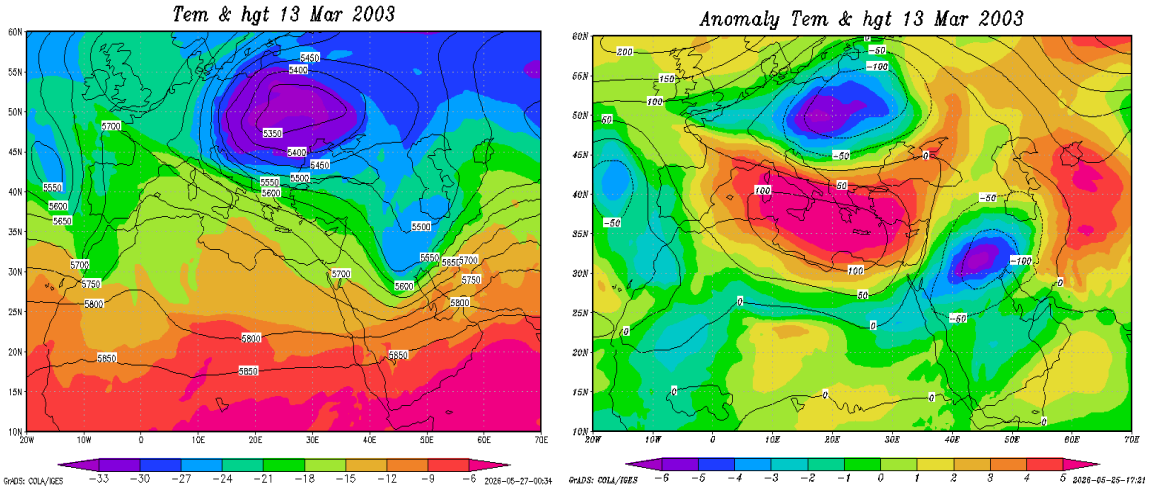
روز نماینده Representative Day	درصد واریانس Explained Variance (%)	ارزش ویژه Eigenvalue	شماره مؤلفه Component Number
13 March 2003	7	36	1
3 February 1993	25	116	2
13 March 1996	16	60	3
13 February 2017	18	84	4
31 March 2009	34	157	5

تحلیل خوشه‌ای بر روی داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکوپاسکال مربوط به ۴۵۰ روز توأم با بارش سنگین انجام گرفت. بر اساس تحلیل مؤلفه اصلی بر روی داده‌های مذکور، ۵ الگوی اصلی در رابطه با بارش‌های سنگین کشور شناسایی شدند (جدول ۱). مؤلفهٔ ۵ با ارزش ویژه ۱۵۷ که ۳۴ درصد واریانس کل را توجیه می‌کند الگوی اصلی محسوب می‌شود. این الگوهای ناهنجاری شامل: ناهنجاری منفی ارتفاع ژئوپتانسیل با گسترش تاوه قطبی بر روی منطقه، شکل‌گیری کم‌ارتفاع بریده تراز میانی با ناهنجاری شدید ارتفاع ژئوپتانسیل و دما به دلیل سامانه بندالی اروپایی، ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل با فرود مدیترانه، گسترش کم فشار اروپایی و ادغام آن با فرود مدیترانه برروی منطقه است. الگوی کم ارتفاع بریده تراز میانی با ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تا ۱۸۰- ژئوپتانسیل متر مهمترین الگوی غالب جوی در رخداد بارش‌های سنگین ایران است که تعداد ۱۵۷ رخداد، معادل ۳۴ درصد واریانس کل را توجیه می‌کند. رخداد زمانی این الگو در فصل زمستان و پاییز بیشتر است.

تحلیل الگوی شماره یک (۱۳ مارس ۲۰۰۳)

الگوی یک معرف جریانات نصف‌النهاری و عمیق شدن ناوهٔ تراز میانی با کم فشار بریده غرب ایران است (شکل ۷). در این روز، منطقهٔ مورد مطالعه به دلیل حاکمیت الگوی بندالی شمال قفقاز و روسیه شرایط ناپایداری را تجربه کرده است. الگوی اول ناشی از ادغام کم ارتفاع تراز میانی با کم فشار شمال قفقاز است که به صورت ناهنجاری منفی سبب تقویت جریان نصف‌النهاری شده است. تقویت نصف‌النهاری جریانات بر روی شرق مدیترانه و شکل‌گیری کم ارتفاع بریده منجر به شکل‌گیری کم ارتفاعی با هسته مرکزی ۵۵۰۰ هکتوپاسکال شده، که محور آن بر روی کشور قرار گرفته و منجر به ریزش هوای سرد به داخل کم ارتفاع شده است. این سازوکار، علاوه بر تشدید گرادیان دمایی، رخداد بارش‌های سنگین را نیز در پی داشته است. این نتایج با مطالعات اخیر همخوانی دارد که نشان می‌دهند نفوذ هوای سرد در تراز میانی جو و تقویت گرادیان دما، یکی از عوامل کلیدی در تشدید صعود و رخداد بارش‌های حدی است (Pfahl & Wernli, 2012; Masoompour Samakosh et al., 2014). در این الگو، تقویت پرفشار جنب حاره‌ای بر روی اقیانوس هند تا جنوب شرق ایران شرایط را برای عمیق‌تر شدن و حرکت کند کم ارتفاع جوی فراهم کرده است.

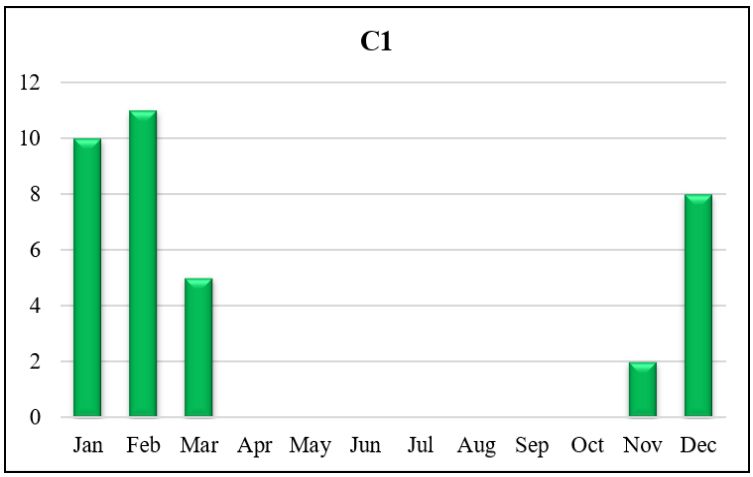
الگوی مذکور با ناهنجاری شدید ارتفاع بر روی شرق مدیترانه تا غرب ایران همراه بوده که بیانگر بیشترین ناپایداری در این منطقه است. تحلیل مؤلفهٔ اصلی ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل، نشان‌دهندهٔ شکل‌گیری کم ارتفاع تراز میانی جو بر روی منطقه است که با پربندهای ۱- ژئوپتانسیل متر بر روی نیمه غربی ایران مشخص است (شکل ۷).



شکل ۷- نقشهٔ ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ناهنجاری مربوط به آن (۱۳ مارس ۲۰۰۳)

Fig.7. Composite map of geopotential height and temperature at the 500 hPa level and its associated anomaly (March 13, 2003)

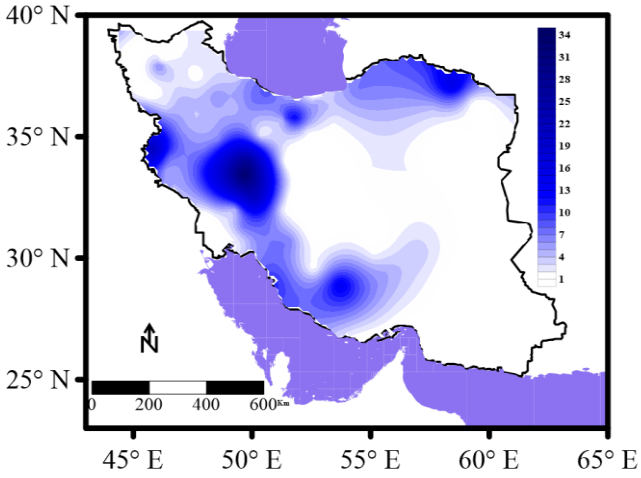
درصد فراوانی روزانه رخداد الگوی اول نشان می‌دهد که بیشینهٔ وقوع این الگو فصل زمستان است (شکل ۸)، و در فصول بهار و تابستان رخدادی دیده نمی‌شود، که می‌تواند به دلیل حاکمیت الگوی پایدار و پرفشار جنب حاره‌ای بر روی ایران باشد.



شکل۸- درصد فراوانی روزانه رخداد الگوهای خوشه اول

Fig.8. Daily frequency percentage of the occurrence of the first cluster patterns

شکل ۹ پراکنش مکانی بارش برای الگوی CP1 را نشان می دهد. الگوی اول به طور میانگین ۱۵ میلی متر بارش را ایجاد کرده است. از لحاظ مکانی، بخش‌هایی از زاگرس غربی و مرکز نیمه جنوبی و شمال‌شرق ایران بارش سنگین را تجربه کرده‌اند. در این زمان تقریباً در ۵۰ درصد مناطق بارش رخ داده است که حدود ۲۵ درصد منطقه بارش سنگین را تجربه کرده‌اند. به طور کلی در زمان شکل‌گیری الگوی اول به دلیل آرایش خاص جریانات و قرارگیری مرکز سامانه بر روی غرب ایران بیشینهٔ بارش در نیمه غربی کشور مشاهده شده است.



شکل ۹- توزیع مکانی بارش‌های سنگین مربوط به الگوی اول (۱۷ فوریه ۱۹۸۸)

Fig.9. Spatial distribution of heavy precipitation associated with the first pattern (February 17, 1988)

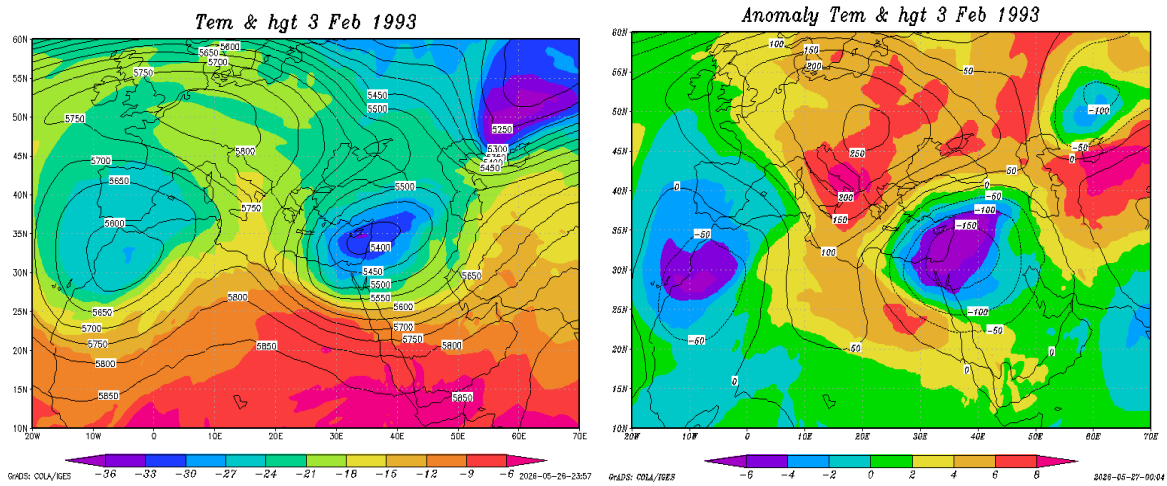
تحلیل الگوی شماره دوم (۳ فوریه ۱۹۹۳)

خوشه دوم، ۱۱۶ رخداد و ۲۵ درصد از کل بارش‌های سنگین را به خود اختصاص داده است (جدول ۱). یکی از خوشه‌های پر بسامد است که به دلیل شکل‌گیری الگوی قوی بندالی، سبب تشدید ناپایداری جوی و بارش سنگین در منطقه شده است. ۳ فوریه ۱۹۹۳ به عنوان نمایندهٔ الگوی دوم نشان دهندهٔ شکل‌گیری الگوی بندالی از نوع کم فشار بریده (امگای معکوس) در تراز میانی جوی است که منجر به کاهش فشار جوی بر روی منطقه شده است. برای شکل‌گیری این الگو تقویت پرفشار برروی اروپا منجر به ریزش جریانات بر روی مدیترانه و تقویت گرادیان فشار گشته است. جابه‌جایی پشته پرفشار جنب‌حاره‌ای به سمت اقیانوس هند علاوه بر اینکه شرایط را برای گسترش شرق‌سوی کم فشار جوی فراهم کرده است، منجر به گسترش جنوب‌سوی آن نیز شده است تا شرایط برای تقویت آن و دسترسی به آب‌های گرم فراهم گردد. شکل‌گیری کم فشار بریده با ناهنجاری منفی ارتفاع ژئوپتانسیل در منتهی‌الیه شرق مدیترانه، با رخداد بارش‌های سنگین ایران همزمان شده است. به طوری که یکی از الگوهای غالب در زمان بارش‌های سنگین ایران، ناهنجاری منفی ارتفاع ژئوپتانسیل در شرق مدیترانه و تقویت ناپایداری به واسطه فرارفت و صعود در منطقه است (شکل ۱۰). این نوع سامانه‌ها که به صورت کم‌فشارهای بریده در شرق مدیترانه شکل می‌گیرند، از مهم‌ترین الگوهای مولد بارش‌های شدید در منطقه محسوب می‌شوند، زیرا با ایجاد صعود دینامیکی قوی و انتقال رطوبت از منابع جنوبی، شرایط را برای رخداد بارش‌های حدی فراهم می‌کنند (Flaounas, Raveh-Rubin, Wernli, Drobinski & Bastin, 2015).

به طور کلی در این الگو، به دلیل تقویت فرود شرق مدیترانه و افزایش صعود در تراز میانی، ناهنجاری منفی دما در شرق مدیترانه در محل تکوین ناوه مدیترانه با کاهش دما در مرکز کم فشار همراه شده است. ناهنجاری منفی قوی، منطقهٔ وسیعی از جنوب دریای سیاه تا مدیترانه و ایران را در برگرفته است که بیانگر به اوج رسیدن ناپایداری در منطقه است (شکل ۱۰).

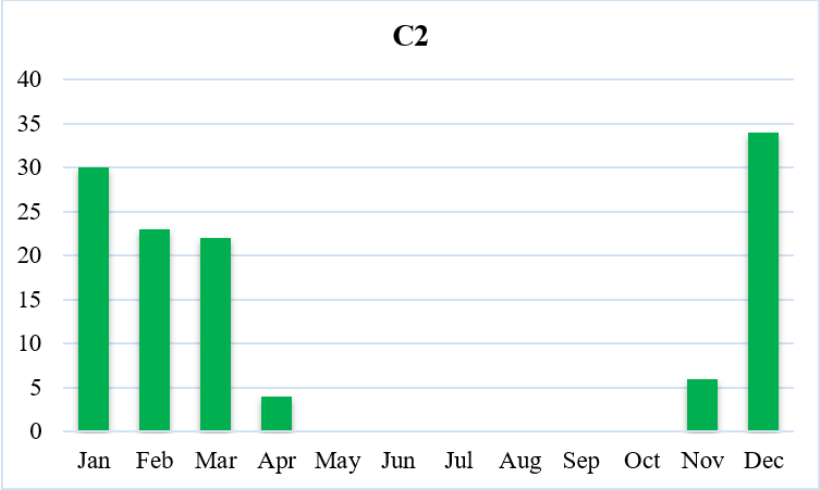
به لحاظ زمانی، الگوی دوم در ماه دسامبر با فراوانی ۳۵ مورد بیشترین رخداد را به خود اختصاص داده است. در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس نیز بیش از ۲۰ مورد از الگوی کم ارتفاع بریده رخ داده است. نکته جالب توجه در مقایسه با الگوی اول، رخداد این الگو در ماه آوریل در منطقه است. به طور کلی فراوانی رخداد الگوی دوم در ماه‌های سرد سال بیشتر از فصول بهار و پاییز است (شکل ۱۱).

پراکنش مکانی بارش برای ۳ فوریه ۱۹۹۳ به عنوان نمونه از الگوی دوم نشان می‌دهد که بارش در بیش از ۷۰ درصد پهنهٔ ایران رخ داده است (شکل ۱۲). تمرکز بارش‌های سنگین بیش از ۳۰ میلی‌متر در نیمه شرقی، جنوبی و بخش‌های از شمال غرب کشور دیده می‌شود. در برخی از مناطق مذکور از جمله بخش‌های از جنوب شرق، جنوب غرب و شمال شرق کشور بارش بیش از ۵۰ میلی متر در یک روز نیز رخ داده است.



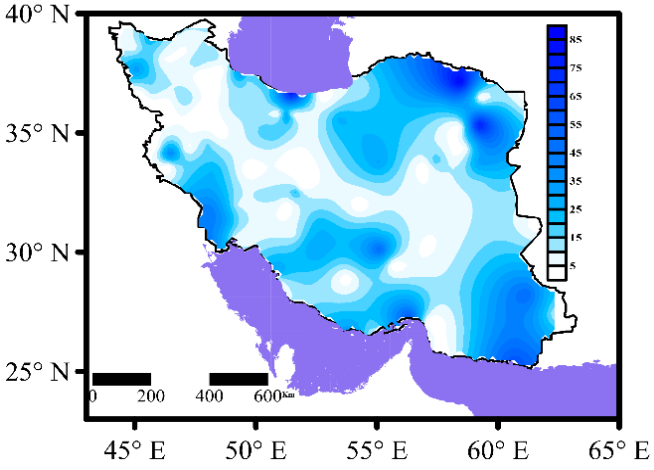
شکل ۱۰- نقشهٔ ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ناهنجاری مربوط به آن (۳ فوریه ۱۹۹۳)

Fig.10. Composite map of geopotential height and temperature at the 500 hPa level and its associated anomaly (February 3, 1993)



شکل ۱۱- درصد فراوانی روزانه رخداد الگوهای خوشه دوم

Fig.11. Daily frequency distribution of second cluster pattern



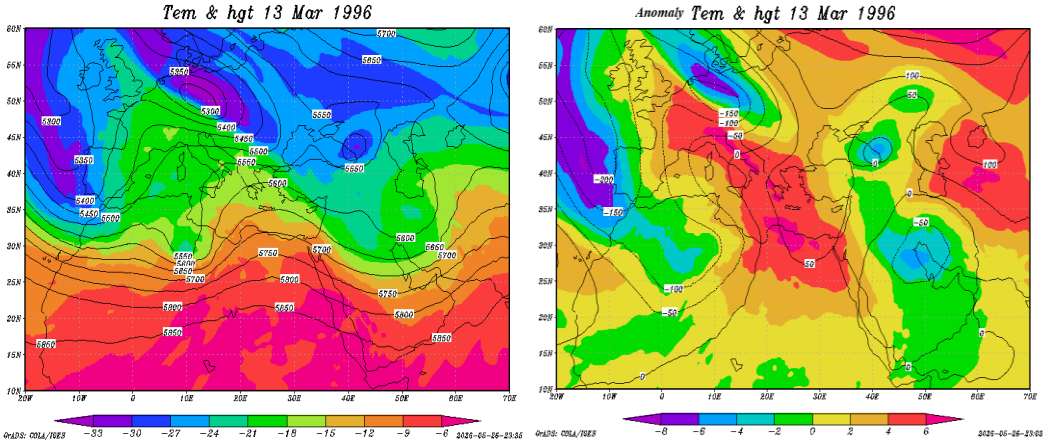
شکل ۱۲- توزیع مکانی بارش‌های سنگین مربوط به الگوی دوم (۳ فوریه ۱۹۹۳)

Fig.12. Spatial distribution of heavy precipitation associated with the second pattern (February 3, 1993)

تحلیل الگوی شماره سوم (۱۳ مارس ۱۹۹۶)

سومین الگوی ایجاد کننده بارش‌های سنگین ایران الگوی فرود غربی و اروپایی است که با ۶۰ مورد، ۱۶ درصد کل رخدادها را شامل شده (جدول ۱) و یکی از الگوهای کم‌بسامد محسوب می‌شود. این الگو که به دلیل تحرکات کم فشار اطلس-اروپا و مدیترانه تکوین می‌یابد، به صورت یک الگوی زوجی از ناوه مدیترانه و ناوه عمیق اروپایی ظاهر می‌گردد (شکل ۱۵. با ساختارهای بزرگ‌مقیاس موج راسبی مرتبط است و منجر به تعمیق ناوه و افزایش ناپایداری دینامیکی می‌شود. در بسیاری از مطالعات به عنوان یکی از عوامل کلیدی در رخداد بارش‌های حدی در عرض‌های میانی شناسایی شده است (Woollings et al., 2023).

این الگو به دلیل تقویت کم فشار واقع در اروپا و پشته برروی غرب مدیترانه تکوین می‌یابد. در گسترش این ناوه، تحرکات ناوه عمیق اروپا، پشته مدیترانه و پشته قوی شمال اقیانوس هند نقش اصلی را ایفا می‌کنند. تحت تأثیر این الگو بیشتر مناطق ایران در راستای محور ناوه مذکور قرار گرفته و بارش دریافت کرده‌اند. ناهنجاری منفی ارتفاع ژئوپتانسیل همزمان با شکل‌گیری این الگو مؤید کاهش شدید ارتفاع برروی گستره ایران است. این شرایط ناشی از گسترش جریانات از سمت شمال اروپا و شمال اطلس بر روی منطقه است به طوری که در این زمان سرتاسر کشور و منطقهٔ مدیترانه ناهنجاری منفی دما را تجربه کرده‌اند. بنابراین در زمان شکل‌گیری این الگو ناهنجاری منفی دما در تراز فوقانی می‌تواند بر تشدید ناپایداری کمک کند (شکل ۱۳).

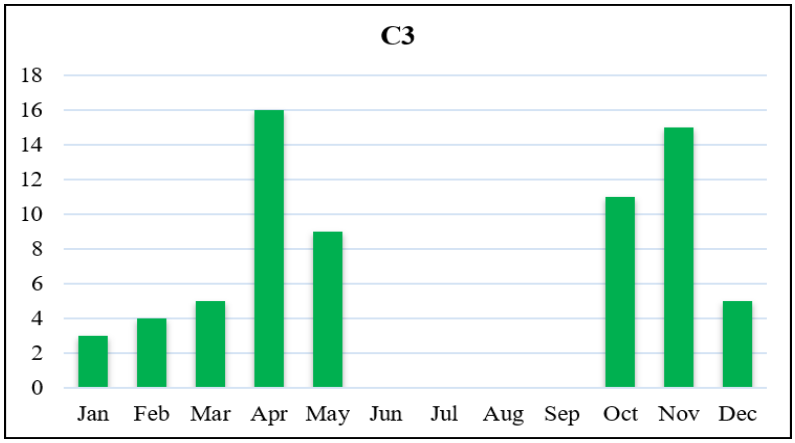


شکل ۱۳- نقشهٔ ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ناهنجاری مربوط به آن (۱۳ مارس ۱۹۹۶)

Fig.13. Composite map of geopotential height and temperature at the 500 hPa level and its associated anomaly (March 13, 1996)

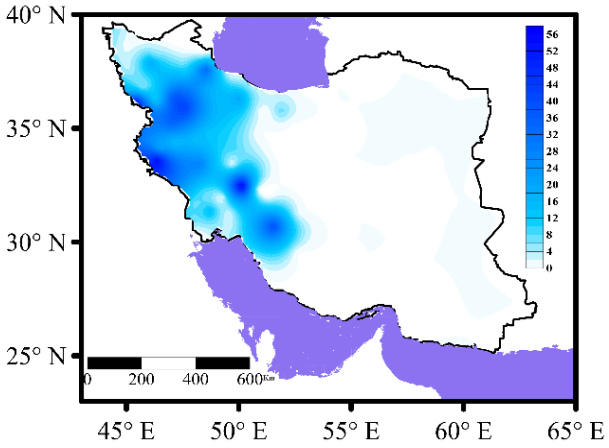
با توجه به اینکه بیشتر بارش‌های ایران در ماه‌های سرد رخ می‌دهد بیشتر الگوهای جوی نیز در ماه‌های سرد سال تکوین می‌یابند. برخلاف الگوهای قبلی که در ماه‌های زمستان متمرکز بود، در این الگو، فراوانی رخداد در ماه‌های آوریل، می و نوامبر بیشتر از ماه‌های دیگر است. بنابراین می‌توان دریافت که این الگو نسبت به الگوهای دیگر از فراوانی کمتری برخودار باشد (شکل۱۴).

شکل ۱۵ پراکنش مکانی بارش را برای روز ۱۳ مارس ۱۹۹۶ به عنوان نماینده الگوی ۳ نشان می‌دهد. در این روز بخش گسترده‌ای از غرب ایران بارش مؤثر و سنگینی را تجربه کرده‌اند. در برخی مناطق این بارش‌ها بیش از ۳۰ میلی‌متر بوده است که بیانگر شدت بالای آن بوده است.



شکل ۱۴- درصد فراوانی روزانه رخداد الگوهای خوشه سوم

Fig.14. Daily frequency percentage of the third cluster pattern



شکل ۱۵- توزیع مکانی بارش‌های سنگین مربوط به الگوی سوم (۱۳ مارس ۱۹۹۶)

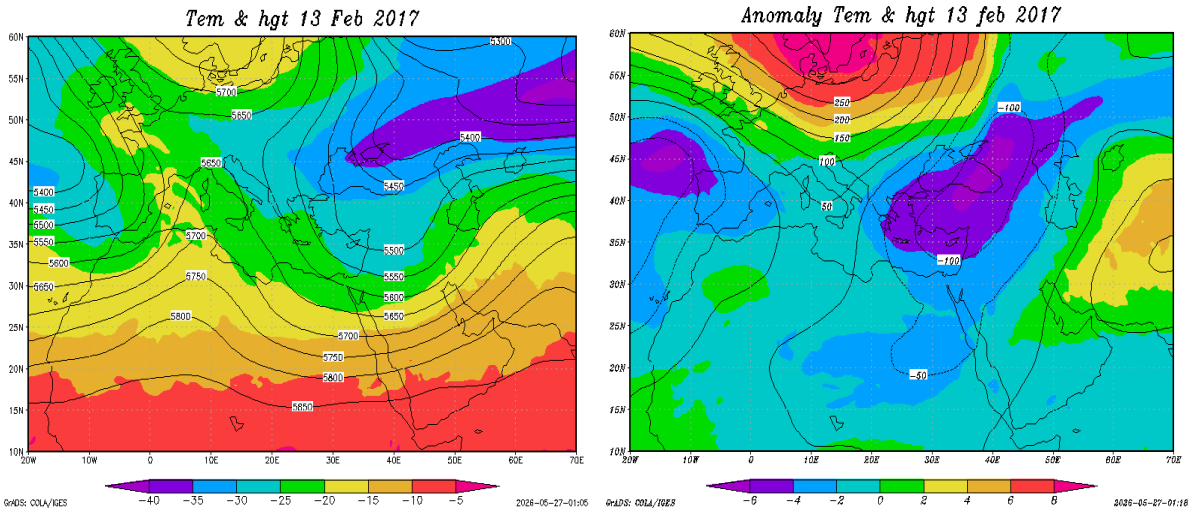
Fig.15. Spatial distribution of heavy precipitation associated with the third pattern (March 13, 1996)

تحلیل الگوی شماره چهارم (۱۳ فوریه ۲۰۱۷)

این الگوی جوی معرف شکل‌گیری سامانه بندالی از نوع امگا بر روی اروپا و اقیانوس اطلس است. قسمت شرقی این بندال به دلیل تقویت نصف‌النهاری جریانات و تقویت زبانه پرفشار برروی شمال اروپا، شرایط را برای تقویت گرادیان فشار و شکل‌گیری کم فشار فراهم کرده است. بندال‌های جوی با ایجاد شرایط ماندگار و تقویت مؤلفه نصف‌النهاری جریان، نقش مهمی در تشدید رخدادهای حدی از جمله بارش‌های سنگین دارند، زیرا باعث پایداری الگوهای گردشی و تقویت فرود و صعودهای مداوم در منطقه می‌شوند (Sousa et al., 2017; Woollings et al., 2018). گسترش جنوب سوی این جریانات منجر به گسترش ناوه تا عرض ۲۵ درجه شمالی شده است. کشیده شدن ناوه به سمت عرض‌های پایین‌تر با همراهی جریانات سرد شمالی بر روی شرق مدیترانه و ناهنجاری منفی شدید در این ناحیه، سبب قرارگیری محور ناوه بر روی ایران شده است. در نقشه ناهنجاری دما نیز ریزش جریانات بسیار سرد برروی مدیترانه و تشدید جبهه‌زایی به واسطه تضاد دمایی برروی منطقه کاملا مشهود است. مجموع این شرایط تقویت بارش‌های سنگین را در ایران به دنبال دارد (شکل ۱۶).

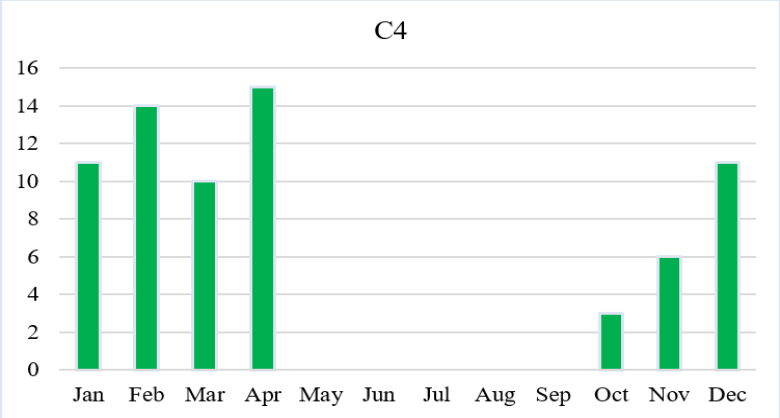
فراوانی رخداد این الگو در ماه آوریل و فوریه نسبت به ماه‌های دیگر بیشتر است (شکل ۱۷). ماه‌های دسامبر، ژانویه و مارس نیز هر کدام ۱۰ درصد از کل رخدادهای الگوی چهارم را به خود اختصاص دادند. همانند سایر الگوها، فراوانی رخداد در ماه‌های دوره گرم سال مشاهده نمی شود و حاکمیت با فصول زمستان و پاییز است.

بارش تجمعی روز ۱۳ فوریه ۲۰۱۷ به عنوان نمونه منتخب از الگوی چهارم مرتبط با بارش‌های سنگین ایران، نشان‌دهندهٔ گستردگی بارش‌ها در سطح کشور است به طوری که بیش از ۵۰ درصد کشور، بارش را تجربه کرده‌اند (شکل ۱۸). مقدار بارش به غیر از بخش‌های مرکزی بیش از ۱۵ میلی متر بوده است که نشان‌دهندهٔ شدت بالای بارش برای الگوی جوی ایجاد کننده آن است. حداکثر بارش ثبت شده در سطح کشور برای الگوی چهارم حدود ۹۰ میلی متر بوده است.



شکل ۱۶– نقشهٔ ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ناهنجاری مربوط به آن (۱۳ فوریه ۲۰۱۷)

Fig.16. Composite map of geopotential height and temperature at the 500 hPa level and its associated anomaly (February 13, 2017)



شکل ۱۷– درصد فراوانی روزانه رخداد الگوهای خوشه چهارم

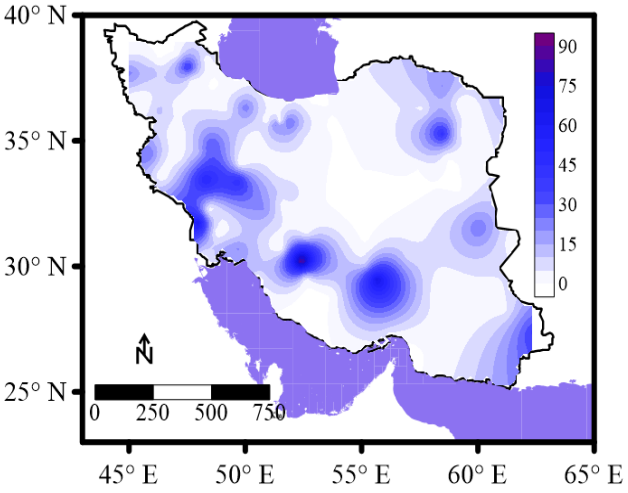
Fig.17. Daily frequency percentage of the fourth cluster pattern

تحلیل الگوی شماره پنجم (۳۱ مارس ۲۰۰۹)

الگوی پنجم الگوی نادر بندالی از نوع ترکیبی زوجی – امگایی است که زمینه را برای تقویت جریانات نصف‌النهاری فراهم می‌کند. این الگو با فراوانی ۱۵۷ مورد، بیش از ۳۴ درصد کل پراکنش داده‌ها را شامل می‌شود و الگوی غالب مؤثر بر رخداد بارش‌های سنگین ایران است (جدول ۱). این یافته با مطالعات اخیر همخوانی دارد که نشان می‌دهند بخش عمده‌ای از رخدادهای بارش حدی در منطقه مدیترانه و خاورمیانه در ارتباط مستقیم با سیکلون‌ها و کم‌فشارهای تراز میانی جو رخ می‌دهد، به طوری که این سامانه‌ها با ایجاد صعود دینامیکی قوی و سازماندهی جریانات رطوبتی، نقش اصلی را در وقوع بارش‌های شدید ایفا می‌کنند (Portal, Raveh-Rubin, Catto, Givon & Martius, 2024; Zhong et al., 2024; Esfandiari & Shakiba, 2024).

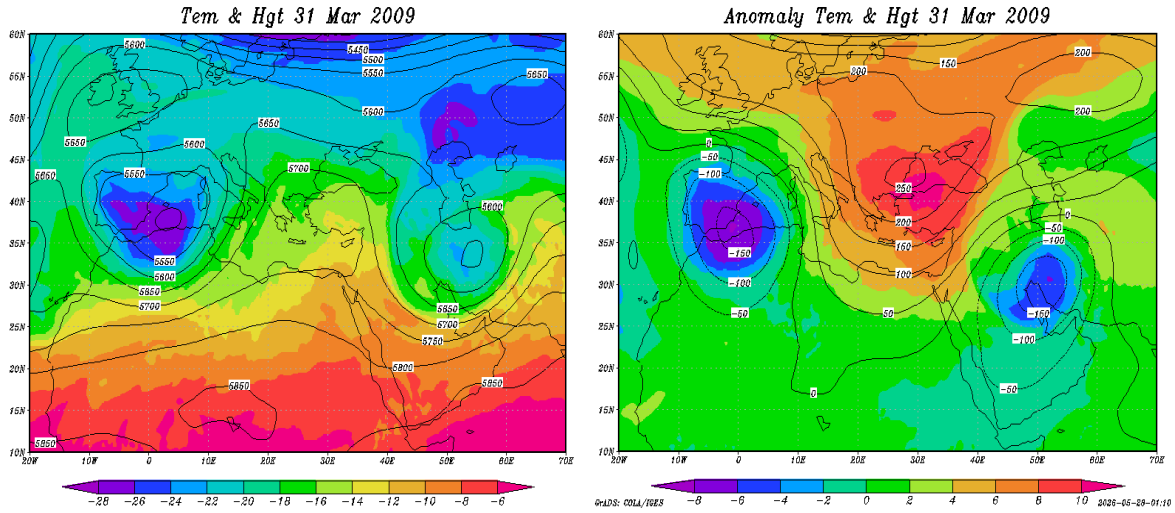
این الگوی جوی ناشی از عمیق شدن ناوه مدیترانه و گسترش جریانات شمالی و ریزش هوای سرد به درون ناوه است که نتیجهٔ آن جدا شدن کم‌فشار از جریان اصلی و تکوین یافتن کم‌فشار بریده شده (سردچال) در شرق مدیترانه است.

در این شرایط به دلیل صعود شدید و گردش سیکلونی، جریانات گرم مرطوب از سمت دریای عرب، عمان، خلیج فارس و دریای سرخ به سمت ایران جریان می یابند. ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل نشان‌دهندهٔ ۲۵۰- ژئوپتانسیل متر کمتر از حالت نرمال است که بیانگر قوی بودن کم فشار و ناپایداری شدید در منطقه است (شکل ۱۹). با تقویت صعود در تراز میانی جو، بخش زیادی از کشور ناهنجاری منفی دمایی را تجربه کرده است بطوریکه ناهنجاری دما در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بین ۶- تا ۱۲- درجه در مرکز کم ارتفاع مشاهده می‌شود. این الگو، یک ساختار ویژه برای رخداد بارش‌های سنگین ایران است که در این شرایط، بخش‌های زیادی از کشور در راستای محور کم‌ارتفاع قرار گرفته و بارش‌های سنگین را تجربه می‌کنند (شکل ۱۹).



شکل ۱۸- توزیع مکانی بارش‌های سنگین مربوط به الگوی چهارم (۱۳ فوریه ۲۰۱۷)

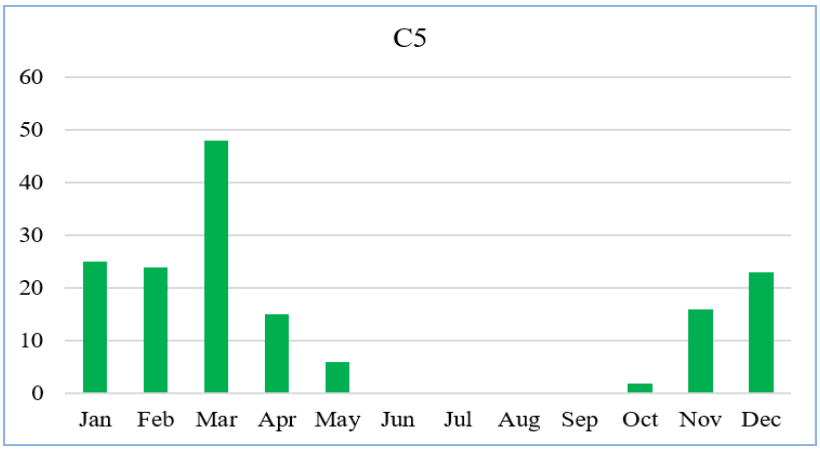
Fig.18. Spatial distribution of heavy precipitation associated with the fourth pattern (February 13, 2017)



شکل ۱۹- نقشهٔ ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ناهنجاری مربوط به آن (۳۱ مارس ۲۰۰۹)

Fig.19. Composite map of geopotential height and temperature at the 500 hPa level and its associated anomaly (March 31, 2009)

بیشترین فراوانی وقوع بارش سنگین در این الگو مختص ماه مارس است و ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس نیز با ۲۰ درصد در رتبهٔ بعدی قرار دارند. در ماه‌های آوریل و نوامبر نیز حداکثر ۱۲ درصد از کل رخدادها از الگوی پنجم را به خود اختصاص داده است. این الگو نسبت به الگوهای دیگر در ماه‌های بیشتری از سال رخ می‌دهد (شکل ۲۰).



شکل ۲۰- درصد فراوانی روزانه رخداد الگوهای خوشه پنجم

Fig.20. Daily frequency percentage of the fifth cluster pattern

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش ناهنجاری‌های دما و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در رخداد بارش‌های سنگین ایران طی دوره ۱۹۹۰–۲۰۲۲ انجام شد. نتایج نشان داد که رخداد بارش‌های سنگین با ناهنجاری‌های منفی دما و ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز میانی جو مرتبط بوده که بیانگر استقرار سامانه‌های کم‌فشار و تشدید صعود در جو است. در این شرایط، کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل و تقویت سرمایش تراز میانی، منجر به افزایش ناپایداری و فراهم شدن شرایط مناسب برای رخداد بارش‌های حدی می‌گردد.

تحلیل خوشه‌ای نشان داد که پنج الگوی غالب در ارتباط با بارش‌های سنگین ایران وجود دارد که در میان آن‌ها، الگوی کم‌فشار بریده (سردچال) تراز میانی همراه با ناهنجاری شدید منفی ارتفاع ژئوپتانسیل و دما، به عنوان مهم‌ترین الگوی غالب شناسایی شد. این الگو عمدتاً در ارتباط با ریزش هوای سرد از عرض‌های میانه به سمت شرق مدیترانه و ایران شکل گرفته و با تقویت گردش سیکلونی و تأمین رطوبت از منابع جنوبی، نقش کلیدی در تشدید و تداوم بارش‌های سنگین ایفا می‌کند. در تمامی الگوهای مورد بررسی، ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی بر روی شرق مدیترانه و نیمهٔ غربی ایران با رخداد بارش‌های سنگین کشور همراه بوده است. بنابراین، عامل اصلی رخداد این بارش‌ها را می‌توان ناهنجاری‌های دمایی و ارتفاعی تراز میانی جو بر روی مدیترانه و اندرکنش آن با الگوهای فشاری اروپا و اقیانوس هند دانست.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رخداد بارش‌های سنگین ایران به طور مستقیم با الگوهای گردش جو در تراز میانی و به‌ویژه رفتار ناوه‌های مدیترانه‌ای و کم‌فشارهای بریده مرتبط است؛ موضوعی که در مطالعات اخیر نیز به عنوان یکی از سازوکارهای اصلی بارش‌های حدی در منطقه مدیترانه و خاورمیانه گزارش شده است (Flaounas et al., 2016; Zittis et al., 2022). این یافته‌ها بیانگر آن است که بارش‌های حدی کشور بخشی از یک سامانه دینامیکی بزرگ‌مقیاس در حوزه مدیترانه–اوراسیا هستند که تغییرات آن می‌تواند به‌طور معناداری بر شدت و فراوانی بارش‌های سنگین ایران تأثیرگذار باشد. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بارش‌های سنگین ایران به‌شدت وابسته به تغییرات گردش جوی در مقیاس بزرگ‌مقیاس، به‌ویژه در ناحیه مدیترانه و اندرکنش آن با سامانه‌های پرفشار اروپا و اقیانوس هند است. از این‌رو، پایش و پیش‌بینی الگوهای کم‌فشار بریده و ناوه‌های مدیترانه‌ای در تراز میانی جو می‌تواند نقش مؤثری در بهبود پیش‌بینی بارش‌های حدی و کاهش مخاطراتی نظیر سیلاب در کشور داشته باشد.

References

Alijani, B. (2009). *Synoptic climatology*. Tehran: Samt. [In Persian]

Azizi, Q., & Samadi, Z. (2007). Analysis of the synoptic pattern of the flood of October 19, 2003 in the provinces of Gilan and Mazandaran. *Geographical Research, 39*(8), 55-74. [In Persian]

Behmanesh, J., Azad Talatappeh, N., Montaseri, M., Rezayi, H., & Khalili, K. (2015). Climate change impact on reference evapotranspiration, precipitation deficit and vapor pressure deficit in Urmia. *Water and Soil Science, 25*(2), 79–91. [In Persian] https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_3894_0.html

Ćwik, P., McPherson, R. A., Richman, M. B., & Mercer, A. E. (2022). Climatology of 500-hPa geopotential height anomalies associated with May tornado outbreaks in the United States. *International Journal of Climatology, 43*(2), 1–21. https://doi.org/10.1002/joc.7841

Darand, M. (2016). Trend of changes in extreme precipitations frequency over Iran. *Geography and Environmental Planning, 27*(1), 29–42. https://doi.org/10.22108/gep.2016.20791

El-Sehwagy, A. S., Salah, Z., Abdel Wahab, M. M., ElTaweel, M. H., & Perez-Alarcon, A. (2026). Investigation of Mediterranean cyclones and their contribution to heavy precipitation over North Africa using ERA5 reanalysis data. *Engineering Proceedings, 124*(1), 56. https://doi.org/10.3390/engproc2026124056

Esfandiari, N., & Shakiba, A. (2024). The extraordinary atmospheric rivers analysis over the Middle East: Large-scale drivers, structure, effective sources, and precipitation characterization. *Dynamics of Atmospheres and Oceans, 105*, 101430. https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2023.101430

Fattahi, E., & Shiravand, H. (2014). Classification of atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall in west of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 1*(1), 97–107. [In Persian] https://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2317-en.html

Flaounas, E., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Claud, C., Delanoë, J., Flamant, C., ... & Wernli, H. (2016). Processes leading to heavy precipitation associated with two Mediterranean cyclones observed during the HyMeX SOP1. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142*, 275–286. https://dx.doi.org/10.1002/qj.2618

Flaounas, E., Raveh-Rubin, S., Wernli, H., Drobinski, P., & Bastin, S. (2015). The dynamical structure of intense Mediterranean cyclones. *Climate Dynamics, 44*(9), 2411–2427. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2330-2

Gao, X., Schlosser, C. A., O'Gorman, P. A., Monier, E., & Entekhabi, D. (2017). Twenty-first-century changes in US regional heavy precipitation frequency based on resolved atmospheric patterns. *Journal of Climate, 30*(7), 2501–2521. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0544.1

Gayoor, H. A., Halabian, A. H., Saberi, B., & Hossain Ali Poorjazi, F. (2013). Investigating the relation between heavy precipitation and circulation patterns of the upper atmosphere (case study: Southern Khorasan Province). *Journal of Natural Environmental Hazards, 1*(2), 11–27. [In Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2013.2453

Ghiasabadi Farahani, F., Khoshakhlagh, F., Shamsipour, A., Azizi, G., & Fattahi, E. (2018). Analysis of inter-decade changes in trends and spatial patterns of annual and seasonal precipitation: Case study of west of Iran. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 18*(48), 59–78. https://doi.org/10.29252/jgs.18.48.59

Givon, Y., Hess, O., Flaounas, E., Catto, J. L., Sprenger, M., & Raveh-Rubin, S. (2024). Process-based classification of Mediterranean cyclones using potential vorticity. *Weather and Climate Dynamics, 5*(1), 133–162. https://doi.org/10.5194/wcd-5-133-2024

Hamidianpour, M., & Khosravi, M. (2019). *Global warming footprint in the 2019 spring rainfall in western Iran.* Sixth Regional Conference on Climate Change, Tehran. [In Persian] https://civilica.com/doc/1002746

Han, T., Guo, X., Zhou, B., & Hao, X. (2021). Recent changes in heavy precipitation events in northern central China and associated atmospheric circulation. Asia-Pacific *Journal of Atmospheric Sciences, 57*(2), 301–310. https://doi.org/10.1007/s13143-020-00195-1

Hosseinzadeh, M. M., & Moradi, S. (2025). The social resilience of rural communities in the western region of Lake Zaribar in response to flooding (Marivan, Kurdistan). *Journal of Environmental Studies, 51*(2), 211–230. [In Persian] https://jes.ut.ac.ir/article_103756.html

Ibebuchi, C. C. (2022). Patterns of atmospheric circulation in Western Europe linked to heavy rainfall in Germany: Preliminary analysis into the 2021 heavy rainfall episode. *Theoretical and Applied Climatology, 148*(1), 269–283. https://doi.org/10.1007/s00704-022-03945-5

Kashki, A. (2018). Analysis of the Polar Vortex Trend in the Northern Hemisphere under Climate Change Conditions. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *6*(3), 181-197. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v6i3.62149

Kidson, J. W. (2000). An analysis of New Zealand synoptic types and their use in defining weather regimes. *International Journal of Climatology*, *20*(3), 299–316. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(20000315)20:3%3C299::AID-JOC474%3E3.0.CO;2-B

Kumar, S., Chatterjee, U., David Raj, A., & Sooryamol, K. R. (2023). Global Warming and Climate Crisis/Extreme Events. In: Chatterjee, U., Shaw, R., Kumar, S., Raj, A.D., & Das, S. (eds). *Climate Crisis: Adaptive Approaches and Sustainability*. Sustainable Development Goals Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44397-8_1

Lima, K. C., Satyamurty, P., & Fernández, J. P. R. (2010). Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, *101*(1-2), 121-135. https://doi.org/10.1007/s00704-009-0207-9

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

Masoompour Samakosh, J., Soltani, M., Hanafi, A., Azizi, GH., Mirzaei, E., Ranjbar SaadatAbadi, A., & Yousefi, Y. (2014). The omega blocking condition and extreme rainfall in Northwestern Iran during 25 - 28 October 2008. *Journal of the Earth and Space Physics*, *40*(3), 55-74. [In Persian]

Masoumpour Samakosh, J., Jalilian, A., & Yari, E. (2017) The Analysis of Seasonal Precipitation Time Series in Iran. *Physical Geography Research*, *49*(3), 457-475. [In Persian] https://10.22059/jphgr.2017.214709.1006926

MirMosavi, H., Doustkamian, M., & Setode, F. (2016). Analyzing spatial autocorrelation patterns of heavy and super heavy showers of Iran. *Geography and Environmental Planning, 27*(3), 67–86. [In Persian] https://gep.ui.ac.ir/article_22075_en.html

Mirzaei, N., Alijani, B., Hejazizadeh, Z., Darand, M., & Nasserzadeh, M. H. (2024). The effect of mid-latitude atmospheric circulation changes on the position of the Mediterranean trough and the occurrence of super heavy precipitation in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics, 50*(2), 521–540. [In Persian] https://jesphys.ut.ac.ir/article_95515.html

Mirzaei,N., Alijani, B., Jahedi, A. (2020). A Synoptic analysis comprehensive and heavy rainfall in Iran: case study16-31 st 2019. *Climate Change and Climate Disaster*, *1*(2), 85-140. [In Persian] https://cccd.znu.ac.ir/article_44665.html

Mohammadi, R., Saligheh, M., Naserzadeh, M. H., & Akbari, M. (2020). Synoptic and dynamical analysis of the cyclonic occurrence of heavy rains during the cold period of western Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science, 3*(3), 224–241. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jmas.2021.272997.1123

Mostafaii, H., Alijani, B., & Saligheh, M. (2016). Synoptic analysis of widespread heavy rains in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 2*(4), 65–76. [In Persian] https://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2533-en.html

Nguyen, L. T., & DeGaetano, A. T. (2012). A climatology of 500-hPa closed lows and associated precipitation in the northeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51*(1), 3–15. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-10-05028.1

Pfahl, S., & Wernli, H. (2012). Quantifying the relevance of cyclones for precipitation extremes. *Journal of Climate, 25*(19), 6770–6780. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00705.1

Portal, A., Raveh-Rubin, S., Catto, J. L., Givon, Y., & Martius, O. (2024). Linking compound weather extremes to Mediterranean cyclones, fronts, and airstreams. *Weather and Climate Dynamics, 5*(3), 1043–1060. https://doi.org/10.5194/wcd-5-1043-2024

Raziei, T., Azizi, G., Mohammadi, H., & Khaghkhagh, F. (2011). 500 hPa wintertime daily circulation types over Iran and the Middle East. *Physical Geography Research, 42*(4), 17–34. [In Persian] https://jphgr.ut.ac.ir/article_22200.html

Richman, M. B. (1981). Obliquely rotated principal components: An improved meteorological map typing technique. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *20*(10), 1145-1159. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<1145:ORPCAI>2.0.CO;2

Rousseau-Rizzi, R., Raveh-Rubin, S., Catto, J. L., Portal, A., Givon, Y., & Martius, O. (2024). A storm-relative climatology of compound hazards in Mediterranean cyclones. *Weather and Climate Dynamics, 5*(3), 1079–1101. https://doi.org/10.5194/wcd-5-1079-2024

Rousta, I., Doostkamian, M., Taherian, A. M., Haghighi, E., Ghafarian Malamiri, H. R., & Olafsson, H. (2017). Investigation of the spatio-temporal variations in atmosphere thickness pattern of Iran and the Middle East with special focus on precipitation in Iran. *Climate, 5*(4), 82. https://doi.org/10.3390/cli5040082

Saghafi, M., Barati, G., Alijani, B., & Moradi, M. (2023). Zoning and analysis of pervasive rainfall in rainy areas of Iran in the statistical period of 30 years. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 23*(71), 103. [In Persian] https://doi.org/10.61186/jgs.23.71.103

Shahi, N. K., & Rai, S. (2023). An increase in widespread extreme precipitation events during the northeast monsoon season over south peninsular India. *Scientific Reports, 13*(1), 22757. https://doi.org/10.1038/s41598-023-50324-9

Sousa, P. M., Trigo, R. M., Barriopedro, D., Soares, P. M., Ramos, A. M., & Liberato, M. L. (2017). Responses of European precipitation distributions and regimes to different blocking locations. *Climate Dynamics, 48*(3), 1141–1160. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3132-5

Tomczyk, A. M., & Bednorz, E. (2019). Heat waves in Central Europe and tropospheric anomalies of temperature and geopotential heights. *International Journal of Climatology*, *39*(11), 4189-4205. https://doi.org/10.1002/joc.6067

Toreti, A., Xoplaki, E., Maraun, D., Kuglitsch, F. G., Wanner, H., & Luterbacher, J. (2010). Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *10*(5), 1037-1050. https://doi.org/10.5194/nhess-10-1037-2010

Woollings, T., Barriopedro, D., Methven, J., Son, S. W., Martius, O., Harvey, B., ... & Seneviratne, S. (2018). Blocking and its response to climate change. *Current Climate Change Reports, 4*(3), 287–300. https://doi.org/10.1007/s40641-018-0108-z

Woollings, T., Li, C., Drouard, M., Dunn-Sigouin, E., Elmestekawy, K. A., Hell, M., ... & Spengler, T. (2023). The role of Rossby waves in polar weather and climate. *Weather and Climate Dynamics, 4*(1), 61–80. https://doi.org/10.5194/wcd-4-61-2023

Xiong, J., & Yang, Y. (2024). Climate change and hydrological extremes. *Current Climate Change Reports, 11*(1), 1. https://doi.org/10.1007/s40641-024-00198-4

Zhong, Y., Guillet, S., Corona, C., Favillier, A., Ballesteros Canovas, J. A., Huneau, F., ... & Stoffel, M. (2024). Mediterranean cyclones are a substantial cause of damaging floods in Corsica. *Communications Earth & Environment, 5*(1), 711. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01836-3

Zittis, G., Almazroui, M., Alpert, P., Ciais, P., Cramer, W., Dahdal, Y., ... & Lelieveld, J. (2022). Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Reviews of Geophysics, 60*(3), e2021RG000762. https://doi.org/10.1029/2021RG000762

Zolfaghari, H., Masoompour Samakosh, J., Jalilian, A., & Fathnia, A. (2013). Studying and determining of synoptic patterns of climatic seasons in the west of Iran. *Physical Geography Research, 45*(1), 53–70. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2013.30435

Zolfaghari, H., Masoompour Samakosh, J., Rashidi Naserkhani, E., & Miri, M. (2013). The impact of atmospheric blocking systems on the occurrence and continuation of dry periods in the west and northwest of Iran, *Arid Regions Geographic Studies*, *3*(9), 101-119. [In Persian] https://jargs.hsu.ac.ir/article_161318.html?