Journal of Geography and Planning
Online ISSN: 2717-3534 Print ISSN: 2008-8078
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

Analysis of the Role of Cyclones from Various Latitudes on Widespread and Heavy Precipitation in Iran in Recent Decades

Mohammad Darand[1]✉, Soma Zandkarimi[2]

1. Corresponding Author, Professor of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: m.darand@uok.ac.ir
2. PhD of Climatology (Climate Change), Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: somazand69@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 20 November 2025
Revised: 14 February 2026
Accepted: 18 February 2026
Published: 29 July 2026

Keywords:
Cyclone,
Iran,
Widespread Precipitation,
Heavy Precipitation.

ABSTRACT

Objective: One of the manifestations of climate change and global warming is the increasing frequency of heavy precipitation events, which have significant environmental, economic, and social impacts. This study identifies and analyzes the drivers of widespread heavy precipitation events over Iran.

Methods: Daily precipitation data from 159 synoptic stations during the period 1987–2024 were analyzed. Heavy and widespread precipitation events were identified using the 75th percentile threshold and a coverage criterion of at least 50% of Iran's area, resulting in 254 days. Cyclones and their entry pathways were determined for each event using ERA5 reanalysis data and classified into three groups based on their origin latitude: low-latitude cyclones (0°–30°N), mid-latitude cyclones (30°–60°N), and high-latitude cyclones (60°–80°N).

Results: The findings identify low-latitude cyclones (132 cases) as the primary driver of widespread heavy precipitation in Iran, followed by mid-latitude cyclones (85 cases), while high-latitude cyclones (10 cases) play a minimal role, with no significant long-term trend detected in their annual frequency. Spatial analysis reveals distinct precipitation patterns based on cyclone origin: low-latitude systems from the south cause intense rain in western and southwestern Iran, whereas mid-latitude systems from the west and northwest primarily affect the Zagros Mountains' western slopes. The co-occurrence of cyclones from different latitudes is a critical mechanism for triggering torrential rain. Synoptically, these events result from the interaction of cyclones with Iran's mountainous terrain, characterized by deep low-pressure systems, pronounced mid-level troughs, and strong moisture-transporting winds from the Arabian Sea, Persian Gulf, and Mediterranean. The simultaneous presence of cyclones from different latitudes enhances these atmospheric interactions, creating optimal conditions for extensive, heavy, and persistent precipitation.

Conclusions: In summary, the formation of widespread heavy precipitation in Iran is primarily driven by the interaction of surface low-pressure systems, mid-level troughs, regional wind currents, and pressure gradients. The convergence of these atmospheric systems with Iran's topography is the key mechanism behind major precipitation events.

Cite this article: Darand, M., & Zandkarimi, S. (2026). Analysis of the Role of Cyclones from Various Latitudes on Widespread and Heavy Precipitation in Iran in Recent Decades. *Journal of Geography and Planning*, 30(97), 464-481. http//doi.org/10.22034/gp.2026.70322.3481

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/gp.2026.70322.3481

Introduction

Situated within the global arid and semi-arid belt, Iran faces significant climatic challenges characterized by precipitation regime instability, heavy reliance on seasonal rainfall, and uneven spatial distribution of precipitation. Although intense and widespread precipitation events account for a modest proportion of the annual rainfall total, their importance is magnified by their dual role in water resource provision and the generation of destructive floods - constituting a hydrological paradox of equal measures of risk and resource. Research demonstrates that these extreme precipitation phenomena are primarily governed by cyclonic systems originating from diverse sources, including Mediterranean disturbances, Sudanese low-pressure systems, and Persian Gulf cyclones, which interact synergistically with dynamic atmospheric mechanisms and thermodynamic processes. Recent climate transformations have substantially altered the behavioral patterns of these meteorological systems, resulting in marked increases in both the intensity and frequency of extreme precipitation events. This research undertakes a comprehensive analysis of the spatiotemporal distributions and dynamic characteristics of cyclones influencing heavy precipitation events across Iran in recent decades, thereby addressing critical knowledge gaps and advancing the current understanding of extreme precipitation mechanisms in this vulnerable region.

Materials and Methods

This research utilized daily precipitation records from 159 synoptic stations covering the period 1987-2024 to identify 1,035 days meeting the widespread precipitation criterion, defined as rainfall occurrence at a minimum of 50% of stations. Days were classified into three precipitation intensity categories light, moderate, and heavy based on the 25th and 75th percentiles of mean precipitation values, resulting in 259 days being designated as heavy precipitation events. Cyclone identification and tracking were performed using ERA5 reanalysis data at the 1000 hPa level, employing an algorithm based on local minima in geopotential height fields combined with a minimum gradient threshold. Identified cyclones were subsequently categorized according to their geographical origin into low- (0°-30°N), middle- (30°-60°N), and high-latitude (60°- 80°N) systems. Synoptic and dynamic analysis was conducted using 500 hPa level parameters including geopotential height, mean sea level pressure, and wind components to examine atmospheric patterns during both cyclone genesis and precipitation occurrence phases.

Results

Based on the conducted analyses, widespread and heavy precipitation in Iran occurs predominantly during the cold seasons (winter and spring) and is dominated by cyclones originating from low (0°–30°N) and mid-latitudes (30°–60°N). Low-latitude cyclones, with tropical origins such as the Sudan region and the Red Sea, create intense precipitation primarily in the western and southwestern parts of the country by rapidly transporting moisture from sources like the Persian Gulf and the Arabian Sea. Mid-latitude cyclones play a complementary and reinforcing role, concentrating precipitation in the northwest and west. The synergy and merger of these two types of cyclones, combining tropical moisture with stronger dynamics, generate the most powerful and extensive precipitation events in Iran. In contrast, cyclones originating from high latitudes play a very limited role.

Synoptic pattern analysis reveals that these precipitation events are associated with the establishment of deep low-pressure systems over Iran and the Persian Gulf at lower atmospheric levels, and with the presence of strong troughs and southwesterly moisture flows at mid-levels, which create powerful surface convergence and dynamic uplift. Furthermore, the elevated topography of the Zagros and Alborz Mountain ranges plays a key role in concentrating and intensifying precipitation in these regions through the enhancement of orographic lift.

Conclusion

This study clearly demonstrates that cyclonic systems originating from low (0°–30°N) and mid-latitudes (30°–60°N) serve as the primary drivers of heavy and widespread precipitation events in Iran. Low-latitude cyclones, characterized by rapid propagation and unparalleled efficiency in transporting moisture from tropical sources such as the Arabian Sea and the Persian Gulf, act as the main instigators of intense rainfall across the western and southwestern regions of the country. Concurrently, mid-latitude cyclones, which predominantly originate over the Mediterranean region, generate more extensive precipitation coverage, particularly over the northwestern territories and the windward slopes of the Zagros Mountains, due to their stronger dynamic forcing.

The results of this research reveal that the concurrent activation of tropical and Mediterranean cyclones leads to the most powerful and destructive precipitation events across Iran, achieved through the merger of moisture sources and the amplification of atmospheric instability. Within this framework, Iran's topography functions as

an undeniable amplifying factor; the Zagros and Alborz Mountain ranges act as natural barriers, inducing orographic uplift along the path of these systems, thereby concentrating and intensifying precipitation in these areas.

These findings significantly advance our understanding of the mechanisms governing extreme precipitation in Iran and underscore the critical importance of monitoring concurrent activity of precipitation systems with diverse origins within meteorological forecasting models. Such enhanced understanding not only improves the accuracy of weather predictions but also provides decision-makers with a powerful tool for improved water resource management and natural disaster preparedness, particularly for flood hazards.

Keywords: Cyclone, Iran, Widespread Precipitation, Heavy Precipitation.

جغرافیا و برنامه ریزی
شاپا چاپی: ۲۰۰۸-۸۰۷۸ شاپا الکترونیکی: ۲۷۱۷-۳۵۳۴
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

واکاوی نقش سیکلون‌های عرض‌های جغرافیایی مختلف بر بارش‌های فراگیر و سنگین ایران طی دهه‌های اخیر

محمد دارند[۱]✉، سوما زندکریمی[۲]

۱. نویسنده مسئول، استاد اقلیم‌شناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، ایران. رایانامه: m.darand@uok.ac.ir

۲. دکتری آب و هواشناسی (گرایش تغییر اقلیم)، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، ایران. رایانامه: somazand69@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

کلیدواژه‌ها:
سیکلون،
ایران،
بارش فراگیر،
بارش سنگین.

چکیده

یکی از نشانه‌های رخداد تغییر اقلیم و گرمایش جهانی رخنمود بارش‌های سنگین است که پیامدهای ناگوار زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی را به دنبال دارد.

برای شناخت بارش‌های سنگین و فراگیر بر روی گستره ایران از داده‌های روزانه بارش ۱۵۹ ایستگاه سینوپتیک در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. برپایه‌ی آستانه‌ی صدکی ۷۵ام و گستره‌ی دست کم ۵۰ درصد از پهنه‌ی ایران، ۲۵۴ روز همراه با بارش سنگین و فراگیر شناسایی شد. سیکلون‌ها و مسیر ورودی آنها به ایران برای هر کدام با بهره گیری از داده‌های واکاوی ERA5 شناسایی و بر اساس عرض جغرافیایی مبدأ به سه گروه تقسیم‌بندی شدند: سیکلون‌های عرض‌های پایین (۰ تا ۳۰ درجه شمالی)، سیکلون‌های عرض‌های میانی (۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی) و سیکلون‌های عرض‌های بالا (۶۰ تا ۸۰ درجه شمالی).

نتایج پژوهش مشخص کرد که سیکلون‌های منشأ گرفته از عرض‌های پایین (سودان و دریای سرخ) بیشترین تأثیر را در وقوع بارش‌های فراگیر ایران داشته‌اند. سیکلون‌های دریای مدیترانه در مرتبه‌ی دوم اهمیت قرار داشتند، درحالی‌که سیکلون‌های عرض‌های بالا (اقیانوس اطلس شمالی) به مراتب نقش کم رنگ تری در رخنمود بارش‌های سنگین و فراگیر ایران دارند.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تعامل سیستم‌های کم‌فشار سطحی و ناوه‌های تراز میانی، همراه با جریان‌های باد و تضاد فشار منطقه‌ای، مکانیزم اصلی شکل‌گیری بارش‌های فراگیر و سنگین در ایران است. بر اساس یافته‌های حاصل از این پژوهش می توان دریافت که بارش‌های سنگین و فراگیر کشور عمدتاً حاصل فعالیت سیکلون‌های گرمسیری (عرض پایین) و سیکلون‌های عرض میانی هستند. سیکلون‌های عرض پایین، با سرعت انتقال بالا و نقش بی‌بدیل در انتقال رطوبت از منابع گرمسیری مانند دریای عرب و خلیج فارس، محرک اصلی بارش‌های شدید در نیمه غربی و جنوب‌غربی کشور محسوب می‌شوند. در همین حال، سیکلون‌های عرض میانی که عمدتاً از مناطق مدیترانه‌ای نشأت می‌گیرند، با دینامیک قوی‌تر خود، بارش‌های گسترده‌تری را به ویژه در شمال‌غرب و دامنه‌های زاگرس ایجاد می‌کنند. نتایج این پژوهش نشان داد که هنگامی که سیکلون گرمسیری و مدیترانه‌ای همزمان فعال می‌شوند، با ادغام منابع رطوبتی و تشدید ناپایداری‌های جوی، قدرتمندترین و مخرب‌ترین رویدادهای بارشی را در کشور رقم می‌زنند. در این میان، نقش توپوگرافی ایران به عنوان یک فاکتور تقویت‌کننده غیرقابل انکار است؛ رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز با ایجاد صعود اجباری در مسیر این سامانه‌ها، همچون سدی طبیعی عمل کرده و بارش‌ها را در این نواحی متمرکز و تشدید می‌کنند.

استناد: دارند، محمد و زندکریمی، سوما (۱۴۰۵). واکاوی نقش سیکلون‌های عرض‌های جغرافیایی مختلف بر بارش‌های فراگیر و سنگین ایران طی دهه‌های اخیر. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۰ (۹۷)، ۴۶۴-۴۸۱.

http//doi.org/10.22034/gp.2026.70322.3481

ناشر: دانشگاه تبریز.

© نویسندگان.

مقدمه

ایران به عنوان کشوری واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، با چالش‌های اقلیمی ویژه‌ای رو به رو است که از جمله آن‌ها می‌توان به ناپایداری رژیم بارشی، وابستگی زیاد به بارش‌های فصلی و توزیع نامتوازن فضایی بارش‌ها اشاره کرد. در این میان، رویدادهای بارش شدید و فراگیر، اگرچه سهم کمی در مجموع بارش سالانه دارند، به دلیل نقش دوگانه در تأمین منابع آب و همچنین ایجاد سیلاب‌های مخرب، دارای اهمیت ویژه‌ای هستند (مصطفایی و همکاران، ۱۳۹۴). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که بخش عمده‌ای از این بارش‌های شدید، تحت تأثیر نفوذ سامانه‌های سیکلونی منشأ گرفته از عرض‌های جغرافیایی مختلف است. سیکلونی‌های مؤثر بر ایران دارای خاستگاه‌های متنوعی هستند؛ از جمله سیکلون‌های مدیترانه‌ای، کم‌فشارهای سودانی، سیکلون‌های خلیج فارس و حتی سامانه‌های عرض‌های بالاتر (بیات و همکاران، ۱۳۹۶). این سامانه‌ها در تعامل پیچیده با سازوکارهای دینامیکی جوی مانند ناوه قطبی و عوامل ترمودینامیکی نظیر رودخانه‌های جوی و شار رطوبت از منابع دریایی مانند دریای سرخ و دریای عمان، ساختار بارشی کشور را شکل می‌دهند. این تعاملات اغلب منجر به بارش‌های کوتاه‌مدت اما شدید می‌شوند (خزعلی و همکاران، ۲۰۲۲؛ فتحی و همکاران، ۲۰۲۰؛ طیب طاهر و بزرگمهر، ۱۳۹۳؛ حسینی و مفاخری، ۱۳۹۹). برخی پژوهش‌ها بر تأثیر همزمان پرفشار اروپا و کم‌فشار عراق در هدایت جریان‌های رطوبتی از خلیج فارس و دریای سرخ به داخل کشور اشاره دارند (محمدی و مسعودیان، ۱۳۸۹).

بر اساس مطالعات گذشته مشخص شده است که منابع رطوبتی بارش‌های سنگین و فراگیر تنوع چشمگیری دارند به عنوان مثال پژوهش‌های (پرک و همکاران، ۱۳۹۷؛ بابائیان و همکاران، ۱۴۰۰؛ قائدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ نوری‌آرا و همکاران، ۱۴۰۱؛ بیرانوند و همکاران، ۱۴۰۱؛ ابطحی و همکاران، ۱۴۰۴؛ پژوه و همکاران، ۱۳۹۹) مشخص کرد که رطوبت بارش‌های سنگین ایران عمدتاً از اقیانوس هند و دریای عرب (جنوب)، دریای سرخ (جنوب‌غرب)، خلیج فارس (جنوب)، دریای مدیترانه (غرب و شمال‌غرب)، و تا حدودی دریای عمان و منابع فرامنطقه‌ای تأمین می‌شود و این رطوبت‌ها توسط سامانه‌های کم‌فشار سودانی، مدیترانه‌ای، و ناوه‌های عمیق تراز میانی جو، همراه با جریان‌های سیکلونی و آنتی‌سیکلونی و رودبادهای جبهه قطبی و جنب‌حاره‌ای به داخل کشور منتقل می‌شوند و اغلب در آستانه ورود به ایران، جریان‌های رطوبتی از چند منبع مختلف ادغام شده و پتانسیل بارش‌های شدید و فراگیر را ایجاد می‌کنند. مطالعات زیادی به تحلیل سینوپتیک و دینامیکی بارش‌های سنگین ایران پرداخته‌اند از جمله‌ی آن‌ها پژوهش‌های (لطفی قرانچای و همکاران، ۱۴۰۲؛ دهقان و همکاران، ۱۴۰۲؛ بیرانوند و همکاران، ۱۴۰۱؛ رنجبر و مرادی، ۱۳۹۸؛ پژوه و جعفری، ۱۳۹۹؛ حسینی و مفاخری، ۱۳۹۹؛ بیجندی و همکاران، ۱۴۰۰؛ امیدوار و ترکی، ۱۳۹۱؛ نوری آرا و همکاران، ۱۴۰۱؛ رحیمی و همکاران، ۱۴۰۳) است. در برخی موارد، سامانه‌های شمالی مانند پرفشار سیبری با انتقال هوای سرد به عرض‌های پایین‌تر، زمینه را برای تقویت ناپایداری و برخورد جبهه‌های هوایی فراهم می‌کنند. الگوهای سینوپتیکی مرتبط با این رویدادها نیز متنوع هستند. برای نمونه، توقف سامانه‌های باران‌زا در یک منطقه (امیدوار، ۱۳۹۱)، فعالیت رودبادها در ترازهای خاص (مسعودیان و محمدی ، ۱۳۹۰)، تشکیل جت استریم‌های قوی در ترازهای بالایی جو (لطفی قرانچای و همکاران، ۱۴۰۲) از جمله مکانیسم‌های تشدید بارش شناخته شده‌اند. در جنوب ایران، همگرایی سامانه کم‌فشار سودان با سامانه‌های مدیترانه‌ای (خوزانی و لشگری، ۱۳۸۹) و در غرب کشور، ترکیب کم‌فشار سطحی با ناوه‌های تراز میانی (یار احمدی و مریانجی، ۱۳۹۰) به عنوان الگوهای غالب شناسایی شده‌اند.

پیشینه پژوهش

مطالعات داخلی

در ارتباط با عوامل موثر بر بارش‌های سنگین و فراگیر ایران مطالعاتی زیادی صورت گرفته که از جمله‌ی آنها ژوهش علیزاده و همکاران (۱۳۹۱) گویای تأثیر قابل توجه سیکلون‌ها در ایجاد بارش‌های فراگیر در مناطق مختلف ایران است. علاوه بر این در

پژوهش قاعدی و همکاران (۱۳۹۱) به تاثیر فرود دریای سرخ بر بارش‌های سنگین ایران اشاره شده است. در پژوهشی دیگر جهانبخش و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی رابطه الکوهای گردشی جو بالا با بارش‌های سنگین پرداخته‌اند و بر مبنای نتایج این پژوهش مشخص شده که الگوی پرفشار غرب دریای سیاه شمال دریای مدیترانه و الگوی پرفشار دریای سیاه بیشترین ارتباط را با بارش‌های ابر سنگین منطقه دارند. امیدوار و همکارانش (۱۳۹۴) در پژوهشی به بررسی و تحلیل همدیدی تعدادی از بارش‌های سنگین پرداخته‌اند و تاثیر عوامل فرامحلی بر روی این بارش‌ها را اثبات کرده‌اند. در کاری مشابه خورشید دوست و همکاران (۱۳۹۵) به تحلیل همدیدی سازوکار وقوع بارش‌های سنگین بهاره در شمال غرب ایران پرداخته‌اند. یافته‌ها بیانگر آن است که بارش‌های سنگین شمال غرب ایران در قالب ۴ الگوی همدیدی قابل دسته‌بندی می‌باشند و سامانه‌های چرخندی یکی از عوامل موثر بر روی بارش‌های سنگین فصل بهار است. در پژوهشی دیگر ابطحی و همکاران (۱۴۰۴) به بررسی تاثیر عوامل موثر بر بارش‌های سنگین پرداخته‌اند. بر اساس نایج این پژوهش مشخص شده که دو الگوی کم فشار سودانی و الگوی ترکیبی کم فشار سودان و سیکلون مدیترانه‌ای به ترتیب بیشترین نقش را در ایجاد روخانه‌های جوی منجر با بارش سنگین بر عهده داشته‌اند.

مطالعات خارجی

مطالعات انجام شده در سطح جهان نیز همانند مطالعات ایرانی بر نقش سیکلون‌ها در بارش‌های سنگین اشاره کرده‌اند به عنوان مثال (بنگتسون و همکاران، ۲۰۰۹؛ پفال و وِرنلی، ۲۰۱۲؛ هاوکرافت و همکاران، ۲۰۱۹؛ هاچمن و همکاران، ۲۰۲۲؛ هاچمن و همکاران، ۲۰۲۳؛ یولینگ و شرک، ۲۰۲۴؛ چن و همکاران، ۲۰۲۵) در مطالعات خود بر نقش کلیدی سیکلون‌های عرض‌های پایین و میانه در شکل‌گیری بارش‌های شدید تأکید کرده‌اند.

تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر، الگوهای زمانی و مکانی سامانه‌های موثر بر بارش‌های فراگیر و سنگین را به طور چشمگیری دگرگون کرده است. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که با وجود کاهش تعداد روزهای بارانی، شدت و فراوانی رویدادهای بارش شدید افزایش یافته و به تبع آن، وقوع سیلاب‌های مخرب در سراسر کشور بیشتر شده است (بیات افشاری و دانش‌یزدی، ۲۰۲۳). در جمع‌بندی، می‌توان گفت که مطالعات داخلی و بین‌المللی به‌طور هم‌راستا تأکید دارند که بارش‌های سنگین و گسترده، نه تنها به‌عنوان پدیده‌ای طبیعی بلکه به عنوان یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم، نیازمند توجه علمی، مدیریتی و راهبردی هستند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های بازتحلیل و روش‌های آماری و سینوپتیکی، تلاش خواهد شد تا الگوهای مکانی، زمانی و دینامیکی سیکلون‌هایی که منجر به بارش‌های سنگین و گسترده در ایران طی دهه‌های اخیر شده‌اند، به طور جامع شناسایی و تحلیل شوند. تمرکز این مطالعه بر تحلیل بلندمدت و مقایسه سیکلون‌های با منشأهای مختلف در سطح ملی، گامی مهم در جهت پر کردن خلأهای پژوهشی موجود و ارتقای دانش موجود درباره‌ی عوامل موثر بر بارش‌های حدی در ایران است.

روش پژوهش

در این پژوهش، به‌منظور شناسایی روزهای دارای بارش فراگیر در ایران و طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس شدت بارش، از داده‌های روزانه بارش ۱۵۹ ایستگاه همدیدی سازمان هواشناسی کشور طی بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۴ میلادی استفاده شده است. این داده‌ها که شامل مقادیر بارش روزانه به تفکیک ایستگاه هستند، پس از کنترل کیفیت برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند. آستانه بارش فراگیر به‌گونه‌ای تعریف شد که در آن حداقل ۵۰ درصد ایستگاه‌ها (حدود ۷۸ ایستگاه) دارای بارش ثبت‌شده باشند. در ادامه، برای سنجش شدت بارش در روزهای منتخب، میانگین بارش ایستگاه‌های دارای بارش (مقادیر غیر صفر) در هر روز محاسبه گردید. با استفاده از توزیع آماری این میانگین‌ها، صدک‌های ۲۵ و ۷۵ تعیین شد و بر این اساس، روزهای بارش فراگیر به سه کلاس شدت تقسیم شدند:

- کلاس اول (بارش سبک) :روزهایی با میانگین بارش کمتر از صدک ۲۵؛

- کلاس دوم (بارش متوسط) :روزهایی با میانگین بین صدک‌های ۲۵ تا ۷۵؛
- کلاس سوم (بارش سنگین) :روزهایی با میانگین بارش مساوی یا بیشتر از صدک ۷۵.

بر اساس این معیارها، مجموعاً ۱۰۳۵ روز با ویژگی بارش فراگیر شناسایی شد که در میان آن‌ها، ۲۵۹ روز به‌عنوان روزهای دارای بارش سنگین و فراگیر طبقه‌بندی گردیدند. این روزها به‌عنوان نمونه‌های نهایی برای تحلیل مسیرهای سیکلون‌های مؤثر بر بارش در ایران انتخاب شدند. به‌منظور شناسایی و مسیریابی سیکلون‌های ورودی به ایران در روزهای بارش سنگین، از داده‌های بازتحلیل ERA5 مربوط به ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال استفاده شد. روش شناسایی سیکلون‌ها بر پایه ارزیابی موقعیت کمینه ارتفاع ژئوپتانسیل در شبکه محاسباتی و همسایگان آن طراحی شده است. شرایط لازم برای تعریف یک یاخته به‌عنوان مرکز چرخند عبارتند از:

۱. مقدار ارتفاع ژئوپتانسیل یاخته مورد نظر باید نسبت به یاخته‌های اطراف، کمینه باشد.

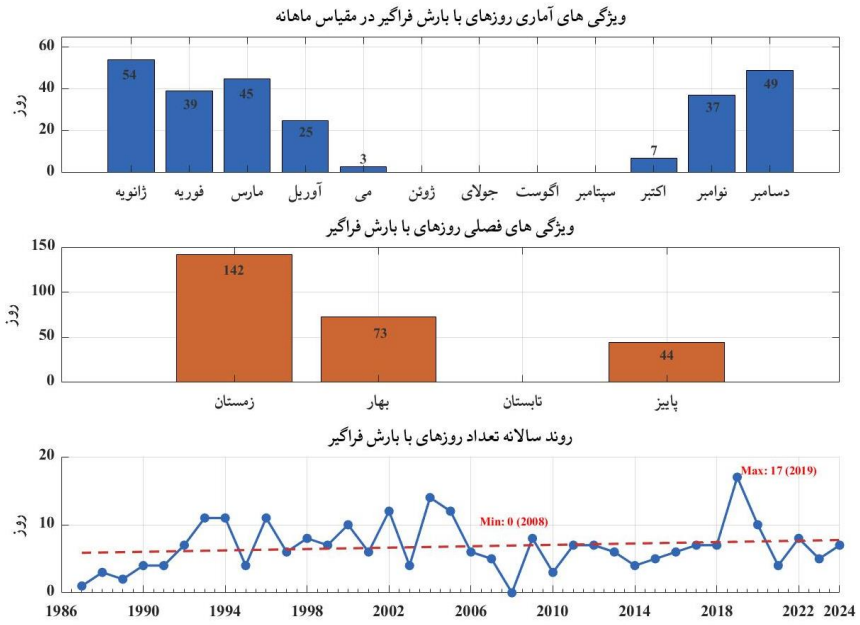
۲. میانگین وزنی شیب ارتفاع ژئوپتانسیل بین یاخته مورد نظر و یاخته‌های همسایه باید دست‌کم برابر با ۱۰۰ ژئوپتانسیل متر بر هزار کیلومتر باشد.

این الگوریتم به‌واسطه تفکیک مکانی (۰/۲۵×۰/۲۵ درجه) و زمانی (ساعتی) بالای داده‌های ERA5، قابلیت استخراج دقیق مشخصات، آماره‌ی، مسیر و طول عمر سیکلون‌ها را دارد و دقت بالایی در تحلیل سینوپتیکی فراهم می‌سازد (عساکره و همکاران، ۱۴۰۱). علاوه بر شناسایی و مسیریابی سیکلون‌ها، در این پژوهش وضعیت جوی در زمان شکل‌گیری سیکلون‌ها و همچنین هنگام وقوع بارش‌های سنگین و فراگیر مورد بررسی قرار گرفت. تمرکز اصلی بر نقش سیکلون‌های ورودی از عرض‌های مختلف جغرافیایی در ایجاد ناپایداری‌های گسترده و بارش در ایران بوده است. به‌منظور تحلیل الگوهای همدید و شرایط دینامیکی جو، از داده‌های بازتحلیلERA5 شامل پارامترهای فشار سطح دریا (MSL)، ارتفاع ژئوپتانسیل و مؤلفه‌های باد مداری (U) و باد نصف‌النهاری (V) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال استفاده شده است. داده‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به دلیل قرارگیری در میانه تروپوسفر، نقش کلیدی در بررسی ساختار موج‌های جوی، محور ناوه‌ها، موقعیت پرارتفاع‌ها و مسیر جت استریم ایفا می‌کنند. تحلیل این داده‌ها امکان شناسایی وضعیت سینوپتیکی حاکم بر منطقه و تعیین نقش سامانه‌های همدید در انتقال رطوبت و صعود دینامیکی هوا را فراهم ساخت. این تحلیل‌ها به تفکیک برای روزهای دارای بارش سنگین و فراگیر و با منشأ سیکلون‌های مختلف (نظیر مدیترانه‌ای، سودانی، دریای سرخ و ...) صورت گرفت تا تفاوت‌ها و شباهت‌های الگوی جوی مؤثر بر بارش‌ها مشخص شود. در این پژوهش پس از شناسایی سیکلون‌های موثر بر روزهای با بارش فراگیر و سنگین ایران سیکلون‌ها بر اساس منشا جغرافیایی آنها تقسیم به سیکلون‌های عرض‌های پایین (۰ تا ۳۰ درجه شمالی)، سیکلون عرض‌های میانه (۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی) و سیکلون عرض‌های بالا (۶۰ تا ۸۰ شمالی) شدند و بر مبنای این تفکیک وضعیت بارش، مسیر سیکلون‌ها و وضعیت جو در زمان شکل‌گیری سیکلون و زمان رخداد بارش مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج

توزیع ماهانه روزهای بارش فراگیر نشان‌دهنده الگوی فصلی مشخصی است که با چرخه‌های اقلیمی منطقه هم‌خوانی دارد. بیشترین تعداد روزهای بارش در ماه‌های ژانویه (۵۴ روز)، دسامبر (۴۹ روز) و مارس (۴۵ روز) مشاهده شد، که بیانگر غلبه سامانه‌های بارشی فعال در فصل سرد و اوایل بهار است که این نتایج با نتایج پژوهش رئیسی و محمودی (۱۴۰۲) همخوانی دارد. افزایش تدریجی روزهای با بارش فراگیر و سنگین در ماه‌های پاییزی، به‌ویژه نوامبر (۳۷ روز)، می‌تواند به بازگشت فعالیت سامانه‌های بارشی و کاهش تسلط سیستم‌های پرفشار نسبت داده شود. این توزیع ماهانه بر اهمیت عوامل فصلی در پویایی بارش‌های فراگیر تأکید دارد. تحلیل فصلی روزهای بارش فراگیر نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌توجه در فعالیت بارشی بین فصول است. فصل زمستان با ۱۴۲ روز بارش، بیشترین سهم را در بارش‌های فراگیر و سنگین دارد، که احتمالاً نتیجه نفوذ مکرر

سامانه‌های کم‌فشار و جبهه‌های سرد در این فصل است. بهار با ۷۳ روز بارش در رتبه دوم قرار دارد، که می‌تواند به فعالیت سامانه‌های انتقالی و ناپایداری‌های جوی در این فصل نسبت داده شود. پاییز با ۴۴ روز بارش، نقش متوسطی ایفا می‌کند و نشان‌دهنده آغاز بازگشت سامانه‌های بارشی پس از دوره خشک تابستان است در دوره سرد سال به دنبال پسروی رودباد جنب-حاره‌ای به طرف جنوب، بادهای غربی به ایران وارد می‌شوند. این پیشروی از اوایل پاییز آغاز می‌شود و تا شروع زمستان، بادهای غربی بر همه جای ایران مستقر شده‌اند. گسترش بادهای غربی با تشدید سرعت آن‌ها همراه است (علیجانی، ۱۳۸۵) و در مقابل، تابستان هیچ روز بارش فراگیری را ثبت نکرده است، در فصل تابستان به دلیل تسلط پر فشار جنب حاره (علیجانی، ۱۳۸۵) به عنوان یک مانع اماکن ورود سامانه‌های تاثیرگذار بر بارش‌های فراگیر ایران وجود ندارد. این توزیع فصلی بارش‌های فراگیر و سنگین ایران، الگوهای اقلیمی منطقه را برجسته می‌کند و بر لزوم تمرکز بر مدیریت منابع آب در فصول پربارش، به‌ویژه زمستان، تأکید دارد. روند سالانه روزهای بارش فراگیر در بازه زمانی ۱۹۸۷–۲۰۲۴ نوسانات قابل‌توجهی را نشان می‌دهد، اما روند کلی که با روش رگرسیون خطی محاسبه شده، بیانگر ثبات نسبی با تغییرات جزئی در تعداد این روزها است. کمینه تعداد روزهای با بارش فراگیر و سنگین در سال ۲۰۰۸ (بدون بارش با آستانه‌های مشخص شده) مشاهده شد که در بررسی تعدادی از پژوهشگران اشاره شده که سال ۲۰۰۸ یکی از شدیدترین خشکسالی ها در سطح کشور رخ داده است (نبی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ کواکبی و همکاران، ۱۳۹۴) و به نظر می‌سد که نبود روزهای بارش‌های فراگیر نیز تحت تاثیر عوامل موثر در خشک‌سالی‌های این سال است. بیشینه تعداد روزهای با بارش فراگیر و سنگین نیز در سال ۲۰۱۹ (۱۷ روز) ثبت شده است و در مطالعات پیشین نیز سال ۲۰۱۹ با توجه به میانگین بارش‌های کشور به عنوان سالی با ویژگی ترسالی معرفی شده (آریا صدر و رحیمی، ۱۴۰۳).

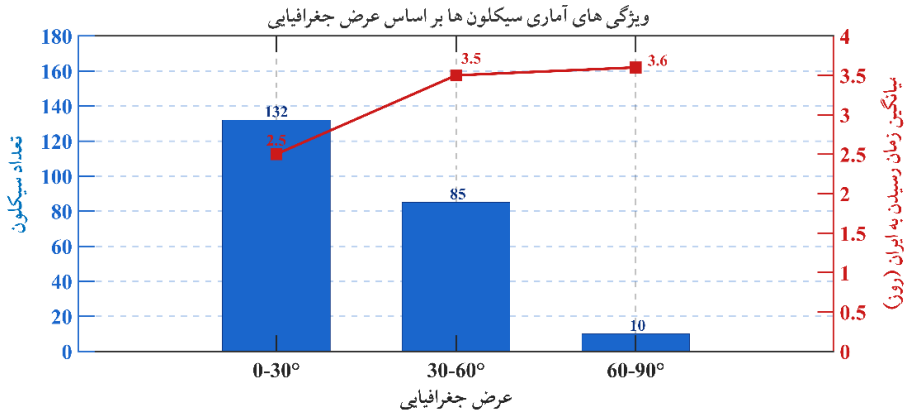


شکل ۱. الگوهای زمانی روزهای با بارش فراگیر در بازه زمانی ۱۹۸۷-۲۰۲٤: توزیع ماهانه، فصلی و روند سالانه

شکل ۲ تعداد سیکلون‌های منشأ گرفته از عرض‌های جغرافیایی مختلف و میانگین زمان رسیدن آن‌ها به ایران را در روزهای بارشی فراگیر طی بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۴ را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی سیکلون‌های مؤثر بر بارش‌های فراگیر و سنگین ایران به عرض‌های ۰ تا ۳۰ درجه شمالی اختصاص دارد؛ به‌طوری که ۱۳۲ سیکلون از این محدوده منشأ گرفته‌اند و با میانگین زمان انتقال ۲/۵ روز، سریع‌ترین زمان رسیدن به کشور را در مقایسه با سایر عرض‌ها دارند. عرض‌های میانی (۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی) با ثبت ۸۵ سیکلون، دومین سهم را به خود اختصاص داده‌اند و به‌طور متوسط ۳/۵ روز

پس از شکل‌گیری به ایران می‌رسند. در مقابل، عرض‌های بالاتر از ۶۰ درجه شمالی با تنها ۱۰ سیکلون، کمترین نقش را در وقوع بارش‌های فراگیر کشور ایفا کرده‌اند و زمان انتقال آن‌ها حدود (۳/۶ روز) است.

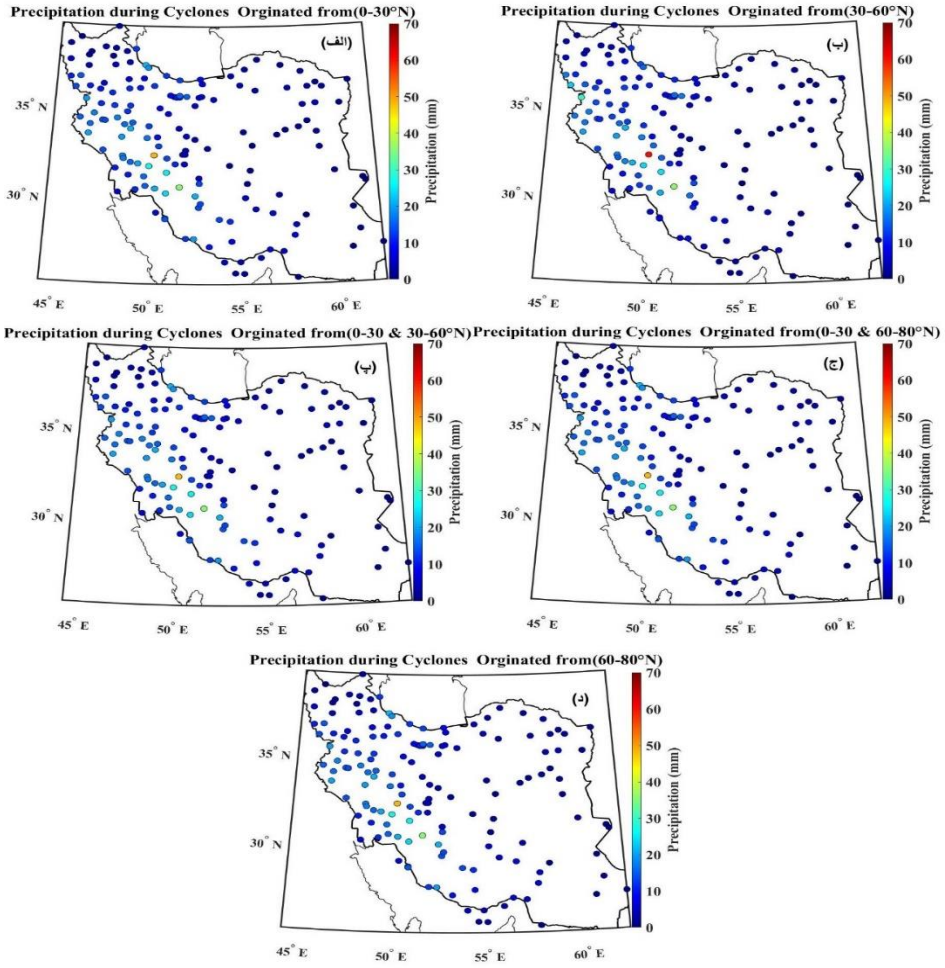
این الگو بیانگر آن است که سامانه‌های بارشی مؤثر بر بارش‌های فراگیر و سنگین ایران عمدتاً از عرض‌های ۰ تا ۳۰ درجه شمالی منشأ می‌گیرند؛ مناطقی که علاوه بر فراوانی بالاتر، از سرعت انتقال سریعتری نسبت به سیکلون‌های شمالی‌تر برخوردارند. لازم به ذکر است که اگرچه سهم سیکلون‌های عرض‌های بالاتر اندک است، اما در برخی موارد، این سامانه‌ها در تعامل با سیکلون‌های عرض‌های پایین‌تر می‌توانند در تقویت و پایداری بارش‌های مؤثر نقش داشته باشند.



شکل ۲. تعداد سیکون‌های عرض‌های جغرافیایی مختلف و میانگین زمان رسیدن این سیکلون‌ها به ایران در روزهای بارشی فراگیر

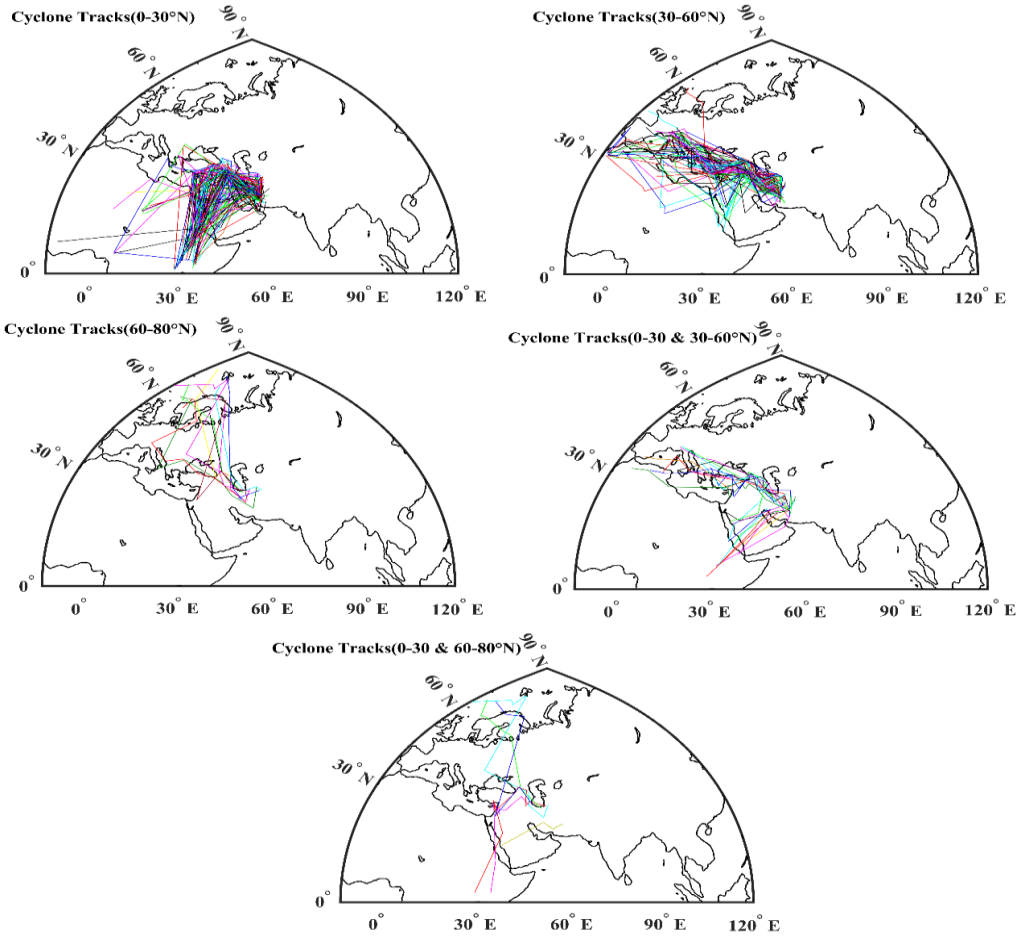
تحلیل نقشه‌های میانگین بارش‌های فراگیر حاصل از تأثیر سیکلون‌های با منشأ عرض‌های جغرافیایی مختلف بر ایران، الگوهای متفاوت و معناداری از توزیع مکانی بارش‌ها را نمایان ساخت. یافته‌های به‌دست‌آمده از بررسی این نقشه‌ها، بر نقش مؤثر توپوگرافی، منبع رطوبت و موقعیت جغرافیایی سیکلون‌ها در شکل‌دهی به شدت و گستره بارش‌ها در کشور تأکید دارد. شکل اول سمت چپ ، الگوی بارشی ناشی از سیکلون‌های عرض پایین (۰—۳۰ درجه شمالی) نشان می‌دهد که بیشترین تمرکز بارش در نیمه غربی و جنوب غربی کشور، به‌ویژه در استان‌های لرستان، چهارمحال و بختیاری و شمال خوزستان رخ می‌دهد. این نواحی هم‌راستا با کوه‌های زاگرس هستند بصورت کلی براساس مطالعات دیگر نیز مشخص شده بود زاگرس و البرز به عنوان سدهای طبیعی، با تغییر مسیر جریان‌های مرطوب، تقویت صعود اجباری، و افزایش زمان توقف سامانه‌ها، بارش‌های سیکلونی را تشدید می‌کنند (مدرس و سرحدی، ۲۰۱۱) و بصورت واضح این موضوع بر روی نقشه بارش ترسیم شده قابل مشاهده است. منابع رطوبتی اصلی این سیکلون‌ها شامل دریای عرب، اقیانوس هند و خلیج فارس هستند که ظرفیت رطوبتی بالایی دارند این پدیده مبنی بر نقش محوری رطوبت گرمسیری در تغذیه بارش‌های شدید جنوب و غرب ایران، همخوانی دارد (مسعودیان، ۱۳۸۷). این سیکلون‌ها، اگرچه بر مناطق شرقی، مرکزی و سواحل خزری تأثیر چندانی ندارند، اما نقشی کلیدی در تغذیه رطوبتی غرب ایران ایفا می‌کنند نقش آنها بر بارش‌های سنگین در بخش‌های از ایران به اثبات رسیده است (رحیمی و همکاران، ۲۰۱۵). بررسی سیکلون‌های عرض میانی (۳۰—۶۰ درجه شمالی)، که عمدتاً شامل سامانه‌های مدیترانه‌ای هستند، نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر آن‌ها نیز به غرب، شمال‌غرب و جنوب غرب کشور محدود است. تنها یک ایستگاه (کوهرنگ) با بارش بسیار بالا در این الگو نمایان شد. این نتیجه نشان می‌دهد که اگرچه سیکلون‌های مدیترانه‌ای یکی از پویاترین سامانه‌های بارشی منطقه به شمار می‌روند، اما گستره تأثیر آن‌ها بر مناطق مرکزی و شرقی ایران در روزهای مورد بررسی بسیار ناچیز بوده است. در پژوهش‌های دیگر نیز مشخص شده که سیکلون‌های مدیترانه‌ای مسئول بخش قابل توجهی از بارش‌های غرب، شمال غرب و بارش‌های زاگرس مرکزی هستند. همچنین، بخش قابل توجهی از بارش‌های سنگین در این مناطق به فعالیت این سامانه‌ها مرتبط است (رضیئی و همکاران، ۲۰۱۲؛ عساکره و خجسته، ۱۴۰۰) که در نقشه‌های بارش ناشی از این سیکلون‌ها مشاهده شد

که در همین مناطق شدت بارش بیشتر از سایر بخش‌ها بوده است. در مقابل، نقشه‌ی ترکیبی حاصل از تأثیر هم‌زمان سیکلون‌های عرض‌های پایین و میانی (۰–۳۰ و ۳۰–۶۰ درجه شمالی) الگوی بارشی متمایزتری را نمایان ساخت. ترکیب این دو منبع سیکلونی، باعث افزایش هم‌زمان شدت و وسعت بارش‌ها، به‌ویژه در دامنه‌های زاگرس شده و نشان می‌دهد که هم‌افزایی بین رطوبت گرمسیری و دینامیک سیکلون‌های میانی، عامل اصلی وقوع بارش‌های سنگین و گسترده در غرب و جنوب‌غرب ایران است. ادغام سیکلون‌های مدیترانه‌ای با سامانه‌های کم‌فشار سودانی و دریای سرخ، یکی از مکانیسم‌های کلیدی در ایجاد بارش‌های سنگین و سیل‌آسا در ایران، به ویژه در مناطق غربی، جنوب غربی است. ادغام این دو سامانه، شار رطوبتی عمیق و پیوسته‌ای ایجاد می‌کند (زرین و داداشی‌رودباری، ۲۰۲۱) که در رخداد بارش‌های سنگین بسیار مهم است. چهارمین نقشه، ترکیب سیکلون‌های عرض پایین و بسیار بالا (۰–۳۰ و ۶۰–۸۰ درجه شمالی) را نشان داد. برخلاف الگوهای رایج بارشی ایران، بیشترین میزان بارش در این الگو در جنوب و جنوب‌غرب کشور متمرکز بود. چنین توزیعی می‌تواند نتیجه‌ی تداخل بین جریانات مرطوب جنوبی (دریای عمان و خلیج فارس) و نفوذ توده‌های هوای سرد قطبی باشد که به تقویت ناپایداری و وقوع بارش‌های شدید در عرض‌های پایین‌تر منجر شده‌اند. در نهایت، بررسی تأثیر سیکلون‌های عرض بالا (۶۰–۸۰ درجه شمالی) نشان داد که در این الگو نیز مانند تمام الگوهای مورد مطالعه در نیمه‌ی غربی کشور و به ویژه در شمال‌غرب غرب و جنوب‌غرب مقدار بارش دریافتی به نسبت سایر مناطق دیگر کشور قابل توجه است.



شکل ۳. میانگین بارش روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک ایران در روزهای با بارش فراگیر، به تفکیک تأثیرپذیری از سیکلون‌های ورودی با منشأ عرض‌های جغرافیایی مختلف.

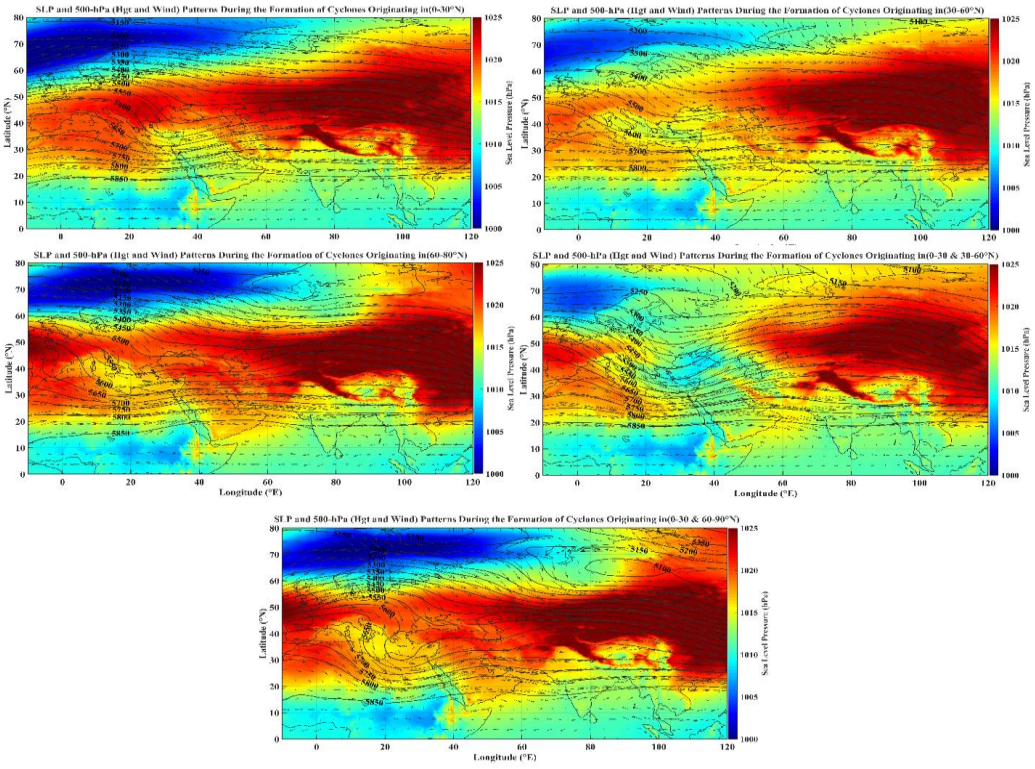
بررسی مسیر سیکلون‌ها در عرض جغرافیایی متفاوت حاکی از آن است که موقعیت مکانی و منشأ سیکلون‌ها می‌تواند به عناون کلیدی در شناسایی شدت،گستره مکانی و الگوی بارش‌های فراگیر و سنگین کشور محسوب شود. مطابق (شکل ۲)، مسیر سامانه‌های کم فشاری که منجر به رخداد بارش‌های فراگیر در ایران شده‌اند، بر اساس عرض جغرافیایی مبدأ به پنج گروه تفکیک شده است. سیکلون‌های گروه اول (عرض جغرافیایی ۰ تا ۳۰ درجه شمالی) عمدتاً از مناطق نیمه‌استوایی و گرمسیری نظیر سودان، دریای سرخ و شمال آفریقا نشأت گرفته و با حرکت به سمت غرب و جنوب‌غرب ایران، از طریق تمرکز رطوبت گرمسیری و تقویت همگرایی جوی، بارش‌های شدیدی را در نیمه غربی و جنوب‌غربی کشور ایجاد می‌نمایند. تراکم بالای مسیرهای ثبت‌شده در این مناطق، گویای نقش کلیدی این سامانه‌ها در انتقال رطوبت و انرژی گرمایی به نواحی مذکور است. سیکلون‌های گروه دوم (عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی) با منشأ مدیترانه، اروپا و اقیانوس اطلس، اغلب از شمال‌غرب و غرب کشور وارد ایران شده‌اند و همانگونه که مشاهد شد در این مناطق بارش‌های با شدت بیشتر را ایجاد کرده‌اند. در مقابل، سیکلون‌های گروه سوم(عرض جغرافیایی ۶۰ تا ۸۰ درجه شمالی) با منشأ شمال اقیانوس اطلس و شمال روسیه، از پراکندگی مکانی بیشتری برخوردار بوده و با توجه به کمبود تعداد آنها در دوره‌ی مورد مطالعه تأثیر محدودی بر بارش ایران دارند، به‌طوری که تنها در موارد محدودی با نفوذ توده‌های هوای سرد قطبی به عرض‌های پایین‌تر، باعث بارش‌های فراگیر و سنگین شده‌اند. بررسی سیکلون‌های همزمان عرض پایین (۰ تا ۳۰ درجه‌ی شمالی) و میانی (۳۰ تا ۶۰ درجه‌ی شمالی) نشان می‌دهد که همزمانی این سامانه‌ها از دو مسیر شمال‌غرب و جنوب‌غرب، با ادغام منابع رطوبتی گرمسیری (دریای سرخ و خلیج فارس) و مدیترانه‌ای، منجر به تشدید ناپایداری جوی و وقوع بارش‌های سیل‌آسا در مناطق همگرایی جریانات می‌شود. مطابق پژوهش عساکره و خجسته (۱۴۰۰)، ادغام سیکلون‌های مدیترانه‌ای با سامانه‌های دریای سرخ و سیاه، با افزایش قابل توجه بارش ایران همراه است. از سوی دیگر، ترکیب سیکلون‌های عرض پایین (۰ تا ۳۰ درجه‌ی شمالی) و سیکلون‌های عرض بالا (۶۰ تا ۸۰ درجه‌ی شمالی) در موارد استثنایی، با تداخل رطوبت گرمسیری و توده‌های هوای سرد قطبی، بارش‌های متمرکزی را در جنوب و جنوب‌غرب کشور ایجاد می‌کند. در مجموع، سیکلون‌های عرض پایین و میانی در کنار نقش توپوگرافی ایران در تقویت صعود اجباری هوای مرطوب، به‌عنوان مکانیسم اصلی شکل‌گیری بارش‌های فراگیر و سنگین ایران شناخته می‌شوند. این در حالی است که سیکلون‌های عرض بالا به‌تنهایی سهم ناچیزی در سیستم‌های بارشی ایران داشته و تنها در شرایط خاص جوی مؤثر واقع می‌شوند.



شکل ٤. نقشه‌های مسیر سیکلون‌های مؤثر بر بارش‌های فراگیر ایران بر اساس عرض جغرافیایی

بر اساس شکل (۵) الگوهای جوی مؤثر بر بارش فراگیر ایران بسته به عرض جغرافیایی منشأ سیکلون‌ها، ویژگی‌های متفاوتی دارند که در نقشه‌های فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بردار باد به وضوح دیده می‌شود. در زمان شکل‌گیری سیکلون‌های عرض‌های ۰ تا ۳۰ درجه شمالی (مناطق گرمسیری و جنب‌حاره‌ای)، یک ناحیه فشار نسبتاً پایین (نمایش با رنگ‌های آبی و سبز) بر فراز سودان، دریای سرخ، جنوب‌غرب ایران، خلیج فارس و شبه‌جزیره عربستان شکل می‌گیرد. این الگوی فشار سطحی پایین، سبب صعود هوا و تقویت ناپایداری می‌شود. خطوط هم‌ارتفاع (پربندهای سیاه) در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، وجود یک ناوه عمیق بر فراز غرب و جنوب‌غرب ایران را نشان می‌دهد که موجب تقویت واگرایی در تراز میانی و صعود گسترده هوا می‌شود؛ این شرایط برای وقوع بارش‌های فراگیر و شدید بسیار حیاتی است. بردارهای باد در سطوح میانی جو نیز جریان همگرایی از عرض‌های پایین به سمت ایران را نشان می‌دهند که انتقال رطوبت فراوان و صعود هوا را تسهیل می‌کند. این سیستم‌ها دارای مکانیزم‌های تشکیل و تغذیه متفاوتی نسبت به سیکلون‌های عرض‌های میانی هستند و معمولاً در مناطق گرم و مرطوب اقیانوسی شکل می‌گیرند و به سمت خشکی حرکت می‌کنند (مفیدی، ۱۳۸۳ ؛ مفیدی و زرین، ۱۳۸۴). در زمان شکل‌گیری سیکلون‌های عرض‌های ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی (مناطق میان‌عرض و مدیترانه‌ای)، یک سیستم پرفشار بسیار قوی (رنگ‌های قرمز تیره) بر فراز سیبری و شرق آسیا مستقر است که فشار آن به ۱۰۲۰ تا ۱۰۲۵ هکتوپاسکال می‌رسد. این پرفشار نقش کلیدی در هدایت سیکلون‌ها به سمت غرب و جنوب‌غرب ایران دارد. همزمان، یک مرکز کم فشار در اطراف مدیترانه، دریای سیاه و غرب آسیا مشاهده می‌شود که محیط مناسبی برای تقویت و حرکت سیکلون‌ها به سمت شرق فراهم می‌کند. خطوط هم‌ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال وجود یک ناوه عمیق و قوی بر فراز غرب آسیا،

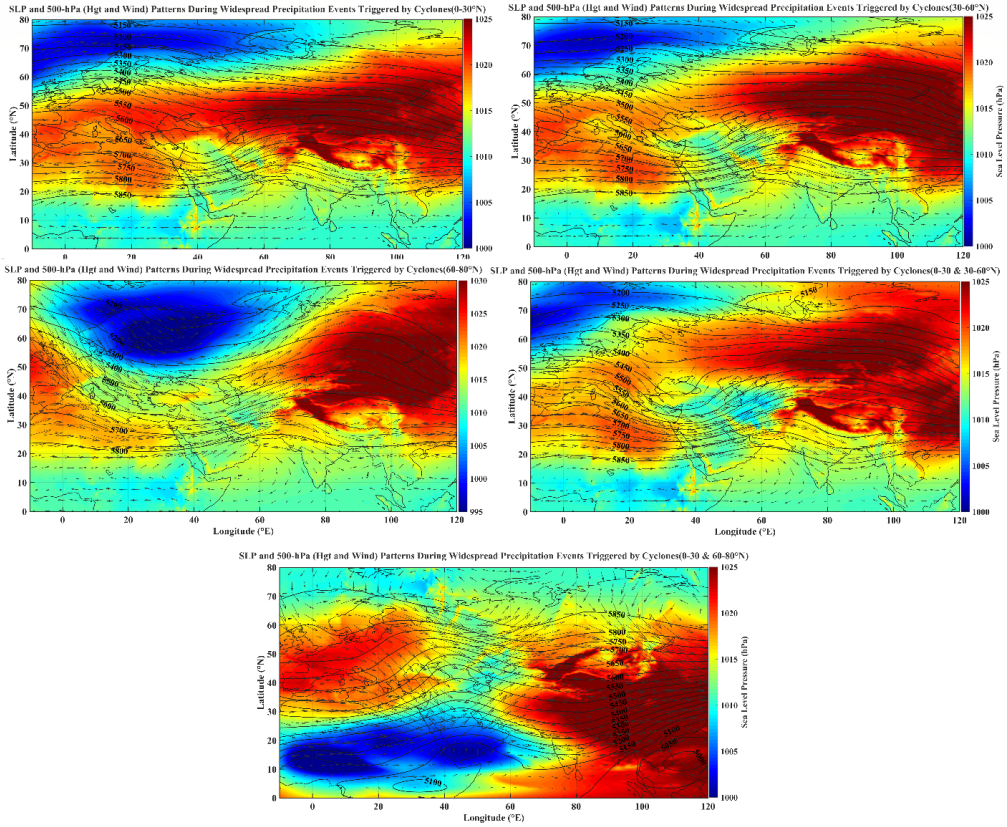
مدیترانه و خاورمیانه را نشان می‌دهد که با مقادیر ۵۴۰۰ تا ۵۶۰۰ ژئوپتانسیل متر موجب واگرایی و صعود قوی هوا می‌شود. جریان جت قوی غربی در این عرض‌ها، سیکلون‌ها را از مدیترانه به سمت ایران و آسیای میانه هدایت می‌کند. این الگو، یک الگوی کلاسیک برای شکل‌گیری و حرکت سیکلون‌های عرض‌های میانی به سمت ایران است. تضاد قوی بین پرفشار سیبری و کم‌فشار غربی، همراه با ناوه عمیق و بادهای غربی، زمینه‌ساز تقویت و انتقال سیکلون‌ها به ایران است (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ جلالی و همکاران، ۱۳۹۸). ویژگی جو در زمان شکل‌گیری سیکلون‌های عرض‌های ۶۰ تا ۸۰ درجه شمالی (مناطق قطبی) نشان می‌دهد، در این عرض‌ها، فشار پایین قطبی، ارتفاع ژئوپتانسیل پایین و جریان جت قوی غالب است. این شرایط عمدتاً در عرض‌های بسیار بالاتر از ایران رخ می‌دهد و تأثیر این سیکلون‌ها بر بارش ایران بسیار محدود است. تنها در موارد نادر که این سیکلون‌ها مسیر غیرعادی داشته باشند، می‌توانند بر بارش ایران اثرگذار باشند. در زمان شکل‌گیری سیکلون‌های همزمان عرض‌های ۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی نیز الگوی فشار خاصی بر روی دریای مدیترانه (به ویژه شرق آن)، دریای سرخ و سودان حاکم است؛ در این مناطق فشار سطح دریا بسیار پایین‌تر از مناطق اطراف است. الگوی باد نیز در هر دو محدوده جغرافیایی به سمت ایران جریان دارد و یک ناوه عمیق بر روی مدیترانه مستقر است. در چنین شرایطی، بر روی مناطق شکل‌گیری این دو نوع سیکلون، یک سیستم کم‌فشار قوی در سطح زمین و ناوه قوی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال حاکم است. این هم‌زمانی و پیوستگی الگوها، موجب افزایش شدت و گستره بارش‌های فراگیر در ایران می‌شود. در زمان شکل‌گیری سیکلون‌های همزمان مناطق جنب حاره و جنب قطبی نیز در مناطق شکل‌گیری سیکلون‌های این دو عرض جغرافیای یک سیستم کم فشار قوی در سطح زمین و یک ناوه‌ی قوی در تراز ۵۰۰ هتکتوپاسکال حاکم است.



شکل ۵. نقشه‌های میانگین SLP (پس زمینه رنگی)، ارتفاع ژئوپتانسیل(خطوط کنتور) و باد مداری و نصف النهاری در محدوده مورد مطالعه در روزهای شکل گیری سیکلون‌های عرض‌های جغرافیایی مختلف موثر در بارش‌های فراگیر ایران

بر اساس نقشه‌های ترسیم شده برای وضعیت جو در روزهای بارش فراگیر و سنگین متاثر از سیکلون‌های عرض‌های ۰ تا ۳۰ درجه شمالی مشخص شد که در محدوده جغرافیایی ۰ تا ۳۰ درجه شمالی، یک سیستم کم‌فشار عمیق با فشار کمتر از ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در جنوب ایران و خلیج فارس مستقر است که با ناوه‌ای عمیق در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (ارتفاع حدود ۵۶۰۰ تا

۵۷۰۰ ژئوپتانسیل متر) همراه می‌باشد. جریان باد غالب جنوب‌غربی، رطوبت فراوان را از دریای عرب و خلیج فارس به سمت ایران منتقل می‌کند. این شرایط در کنار گرادیان فشاری شدید میان کم‌فشار مذکور و پرفشارهای اطراف، موجب صعود هوای مرطوب، افزایش ناپایداری دینامیکی و ترمودینامیکی و در نتیجه بارش‌های فراگیر و سنگین می‌شود. در روزهای بارشی متاثر از سیکلون‌های عرض‌های ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی، سیستم کم‌فشار عمیق دیگری با فشار سطحی حدود ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۵ هکتوپاسکال بر منطقه ایران حاکم است که با ناوه‌ای قوی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (۵۵۰۰ تا ۵۶۰۰ ژئوپتانسیل متر) همراه بوده و جریان باد از جنوب‌غرب و غرب، رطوبت را از منابعی مانند دریای مدیترانه، خلیج فارس و دریای عمان به داخل کشور هدایت می‌کند. این الگو نیز با ایجاد صعود هوای مرطوب و ناپایداری جو، شرایط بارش‌های سنگین و فراگیر را فراهم می‌آورد. در عرض‌های بالاتر (۶۰ تا ۸۰ درجه شمالی)، یک کم فشار قوی با فشار سطحی حدود ۹۹۵ هکتوپاسکال در شمال‌غرب منطقه همراه با گردش پادساعتگرد بادها و سیستم پرفشار قوی در شرق (حدود ۱۰۲۵ هکتوپاسکال) مشاهده می‌شود که تضاد فشاری میان این دو سیستم موجب تقویت جریان‌های قوی و انتقال رطوبت به سمت ایران شده و با ناپایداری جو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، بارش‌های سنگین را سبب می‌گردد. در زمان رخداد بارش‌های فراگیر ناشی از سیکلون‌های همزمان عرض‌های ۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی، ناوه‌ای فعال و عمیق در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در غرب و شمال‌غرب ایران با محور متمایل به جنوب‌شرقی، نفوذ جریانات سرد و ناپایدار عرض‌های میانی را تسهیل می‌کند. همزمان، در جنوب کشور یک سیستم کم فشار ضعیف‌تر اما مؤثر از نواحی حاره‌ای، به ویژه دریای عرب، با انتقال رطوبت به لایه‌های میانی جو، نقش کلیدی در تغذیه رطوبتی سامانه ایفا می‌کند. مرکز کم‌فشار سطحی با فشار حدود ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در جنوب‌غرب و مرکز ایران، همگرایی شدید بادهای سطحی از جنوب با جریان‌های پرفشار شمال‌شرقی را ایجاد کرده که همراه با واگرایی در تراز میانی، شرایط دینامیکی لازم برای صعود گسترده هوا و تشدید ناپایداری عمودی را فراهم می‌آورد. ترکیب این دو سیستم در سطوح پایین و میانی جو، همراه با منابع رطوبتی متعدد و تضاد فشاری قوی، موجب توسعه سامانه‌های بارشی فراگیر، سنگین و پایدار در بخش‌های وسیعی از ایران، به ویژه نواحی جنوبی، مرکزی و شمالی می‌شود. این الگوی سینوپتیکی ترکیبی، با همگرایی و واگرایی همزمان در سطوح مختلف جو، انتقال رطوبت از منابع گرمسیری و عرض‌های میانی، و تشدید ناپایداری‌های دینامیکی و ترمودینامیکی، شرایط ایده‌آل برای بارش‌های شدید و گسترده را فراهم می‌کند. وضعیت جو در زمان بارش‌های سنگین و فراگیر ایران ناشی از سیکلون‌های همزمان عرض‌های ۰ تا ۳۰ شمالی و ۶۰ تا ۸۰ شمالی نشان می‌دهد که وجود مرکز کم‌فشار سطحی عمیق حدود ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در مرکز کشور همراه با تقویت بادهای غربی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، همگرایی شدید سطحی و تغذیه رطوبتی دوگانه از منابع شمالی و جنوبی را فراهم می‌کند. این الگوی ترکیبی سیکلون‌های حاره‌ای و قطبی، شرایط ایده‌آل برای بارش‌های سراسری، سنگین و پایدار در بخش‌های وسیعی از ایران به‌ویژه نواحی جنوبی را ایجاد می‌نماید. در مجموع، حضور سیستم‌های کم‌فشار عمیق در سطوح پایین و ناوه‌های قوی در تراز میانی، همراه با جریان باد و عبور آن از روی پهنه‌های آبی اطراف و تضاد با پرفشارهای مجاور، شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی مساعدی برای صعود هوای مرطوب و بارش‌های سنگین و فراگیر در ایران ایجاد می‌کنند.



شکل ٦. نقشه‌های میانگین SLP (پس زمینه رنگی)، ارتفاع ژئوپتانسیل (خطوط کنتور) و باد مداری و نصف النهاری در محدوده مورد مطالعه در روزهای رخداد بارش فراگیر متاثر از سیکلون‌های عرض‌های جغرافیایی مختلف

بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش واکاوی نقش سیکلون ها بر رخنمود بارش‌های سنگین و فراگیر ایران طی بازه زمانی ۲۰۲۴–۱۹۸۷ بود که یافته‌ها نشان داد سیکلون‌های عرض پایین (۰—۳۰ شمالی) با بسامد ۱۳۲ مورد و با میانگین زمان انتقال ۲/۵ روز، اصلی‌ترین دلیل رخداد بارش‌های سنگین فراگیر هستند و بعد از آن سیکلون‌های عرض‌های ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی با بسامد ۸۵ سیکلون و با میانگین زمان ۳/۵ روز، در رتبه دوم قرار دارند. سیکلون‌های عرض‌های بالاتر از ۶۰ درجه شمالی با تنها ۱۰ سیکلون کمترین نقش را در بارش‌های فراگیر و سنگین ایران ایفا می‌کنند و این موضوع تاییدی بر نتایج پژوهش‌های (بنگستون و همکاران، ۲۰۰۹؛ هاوکرافت و همکاران، ۲۰۱۹؛ پفال و وِرنلی، ۲۰۱۲؛ هاچمن و همکاران، ۲۰۲۲؛ هاچمن و همکاران، ۲۰۲۳؛ خورشید دوست و همکاران، ۱۳۹۵) است که در مطالعات خود بر نقش کلیدی سیکلون‌های عرض‌های پایین و میانه در شکل‌گیری بارش‌های شدید خاورمیانه تأکید کرده بودند. بررسی روند سالانه‌ی تعداد روزها با فراگیر و سنگین در ایران در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۴ نشان داد که با وجود تغییرات قابل توجه در بعضی سال‌ها، روند کلی این روزها فاقد معنی‌داری آماری بوده است. تحلیل نقشه‌های میانگین روزهای با بارش‌های فراگیر و سنگین و مسیر سیکلون‌های هر طبقه نشان داد که با توجه به منشا سیکلون‌ها، الگوی مکانی بارش در سطح ایران متفاوت است به این صورت که سیکلون‌های عرض پایین (۰ تا ۳۰ درجه شمالی) که عمدتاً از مناطق گرمسیری مانند سودان و دریای سرخ منشأ گرفته و در بیشتر موارد از غرب وجنوب‌غرب وارد ایران شده‌اند تحت تاثیر این موضوع در بخش‌های غربی و جنوب‌غربی کشور بارش‌های ناشی از این سیکلون‌ها شدیدتر از مناطق دیگر بوده است، در حالی که سیکلون‌های عرض میانی (۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی) با منشاء مدیترانه و اروپا اغلب از غرب و شمال‌غرب وارد کشور می‌شوند و بارش‌های با شدت بالاتر در در نواحی غربی و شمال‌غرب و همچنین دامنه‌های غربی زاگرس ایجاد کرده‌اند. سیکلون‌های عرض بالا (۶۰ تا ۸۰ درجه شمالی) سهم کمی در بارش‌های کشور دارند و تنها در شرایط خاص با نفوذ توده‌های

هوای سرد قطبی مؤثر هستند و این سیکلون‌ها نیز در بخش‌های خاصی از کشور از جمله در شمال‌غرب و غرب کشور منجر به بارش‌های با شدت بیشتر نسبت به سایر مناطق شده بودند. نتایج نشان داد که هم‌زمانی سیکلون عرض‌های پایین با سیکلون‌های عرض‌های میانه و بالا نیز نقش مهمی در وقوع بارش‌های سنگین و سیل‌آسا ایفا کرده و الگوهای بارشی متفاوتی را در سطح کشور ایجاد کرده‌اند. بصورت کلی سیکلون‌ها پس از ورود به ایران در برخود با ارتفاعات نیمه‌ی غربی ایران بارش‌های شدیدی را ایجاد کرده‌اند و این موضوع اهمیت توپوگرافی، منابع رطوبتی و تعامل سامانه‌های مختلف در شکل‌گیری الگوهای بارشی فراگیر ایران را روش می‌کند. الگوهای جوی مؤثر بر بارش‌های فراگیر ایران بسته به عرض جغرافیایی که سیکلون‌ها در آن شکل گرفته‌اند دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند؛ سیکلون‌های عرض پایین (۰—۳۰ درجه شمالی) با سیستم کم‌فشار عمیق سطح دریا و ناوه عمیق در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، همراه با جریان باد جنوب‌غربی که از دریای عرب و خلیج فارس عبور می‌کند، موجب صعود گسترده هوا و بارش‌های شدید در ایران می‌شوند. سیکلون‌های عرض میانی (۳۰—۶۰ درجه شمالی) نیز با حضور سیستم کم‌فشار قوی و ناوه عمیق در تراز میانی، تحت هدایت پرفشار سیبری و جریان جت غربی، رطوبت را از منابع مدیترانه‌ای و همچنین عرض‌های جغرافیای پایین به ایران منتقل کرده و منجر به بارش‌های فراگیر و سنگین در ایران شده‌اند. در عرض‌های بالا (۶۰—۸۰ درجه شمالی)، سیستم‌های فشار پایین قطبی و پرفشار شرق آسیا به دلیل تفاوت فشار شدید منجر به ایجاد جریان‌های قوی به سمت ایران شده‌اند این سیکلون‌ها دارای نقش محدود اما گاه مؤثری در بارش‌های ایران هستند. همزمانی شکل‌گیری سیکلون‌های عرض پایین و میانی یا عرض پایین و بالا، با ایجاد ناوه‌های فعال و سیستم‌های کم‌فشار سطحی قوی، همگرایی و واگرایی در سطوح مختلف جو و تغذیه رطوبتی دوگانه از منابع گرمسیری و عرض‌های میانی، شرایط ایده‌آل برای بارش‌های گسترده، سنگین و پایدار در ایران فراهم می‌آورند. به طور کلی، تعامل سیستم‌های کم‌فشار سطحی و ناوه‌های تراز میانی همراه با جریان‌های باد و تضاد فشارهای منطقه‌ای، مکانیزم اصلی شکل‌گیری بارش‌های فراگیر و سنگین در کشور است.

منابع

جهانبخش، سعید؛ جعفری‌شندی، فاطمه و حسین‌علی پورگزی، فرشته (۱۳۹۱). بررسی رابطه الگوهای گردشی جو بالا با بارش‌های ابر سنگین (مطالعه موردی استان آذربایجان شرقی). *جغرافیا و برنامه ریزی*، ۱۶(۴۲)، ۱۳۸-۱۱۳.

امیدوار، کمال؛ محمودآبادی، مهدی و صفرپور، فرشاد (۱۳۹۴). بررسی و تحلیل همدیدی بارش‌های سنگین بهمن‌ماه ۱۳۸۹ در مناطق جنوبی و مرکزی ایران (با تأکید بر استان کرمان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۹(۵۱)، ۳۹-۲۱.

ابطحی، وحیده؛ جهانبخش، سعید؛ رستم زاده، هاشم و لشکری، حسن (۱۴۰۴). الگوهای همدیدی رودخانه‌های جوی منجر در بارش‌های سنگین غرب و شمال غرب ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۹(۹۱)، ۱۰۳-۱۲۹.

امیدوار، کمال؛ ترکی، مسلم (۱۳۹۱). شناسایی الگوهای ریزش بارش‌های سنگین در استان چهارمحال و بختیاری. *آمایش فضا و ژئوماتیک*، ۱۶(۴)، ۱۳۵-۱۷۰.

بابائیان، ایمان؛ کریمیان، مریم و مدیریان، راهله (۱۴۰۰). پیکربندی بهینه مدل اقلیمی *RegCM4.7* برای پیش‌بینی هفتگی بارش سه رخداد حدی مارس و آوریل ۲۰۱۹. *هواشناسی کشاورزی*، ۹(۲)، ۴۸-۶۰.

بیات، علی؛ سلیقه، محمد و اکبری، مهری (۱۳۹۶). اقلیم شناسی سیکلون های باران زای زمستانه ایران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۴(۲)، ۱-۱۸.

بیجندی، مجید؛ دریا باری، سید جمال‌الدین، رنجبر سعادت‌آبادی، عباس و اربابی سبزواری، آزاده. (۱۴۰۱). بررسی رخداد بارش‌های فرین شمال شرق ایران طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۱، *نشریه هواشناسی و علوم جو*. ۴(۴)، ۲۸۴-۳۰۷.

بیرانوند، ابراهیم؛ گندمکار، امیر؛ عباسی، علیرضا و خداقلی، مرتضی (۱۴۰۱). تحلیل آماری–سینوپتیکی بارش‌های سنگین منجر به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در حوضه آبریز درود بروجرد. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۲)، ۱۶۹–۱۶۸.

پرک، فاطمه، خاکی، علی و روشنی، احمد (۱۳۹۷). واکاوی اقلیم شناختی ساز و کار الگوهای واگرایی شار رطوبتی در بارش‌های سنگین منجر به سیل در جنوب غرب ایران با تاکید بر سیلاب های فروردین ماه ۱۳۹۸. *نشریه هواشناسی و علوم جوّ*، ۱(۴)، ۳۹۳–۳۸۰.

پرنده خوزانی، اکرم و لشکری، حسین (۱۳۸۹). بررسی سینوپتیک سیستمهای سیل زا در جنوب ایران. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۶(۲)، ۶۶–۷۳.

پژوه، فرشاد و جعفری، فرزانه (۱۳۹۹). واکاوی همدید بارش‌های سیل آسا و مخاطره‌آمیز غرب و جنوب غرب ایران در دهه اول فروردین ۱۳۹۸. *اطلاعات جغرافیایی*، ۲۹(۱۱۴)، ۱۶۵–۱۸۴.

جلالی، مسعود؛ دوستکامیان، مهدی و شیری کریم وندی، امین (۱۳۹۸). بررسی و تحلیل همدیدی دینامیکی سازکارهای بارش فراگیر زمستانه ایران. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۹(۵۵)، ۵۵–۳۷.

حسینی، سیداسعد، مفاخری، امید (۱۳۹۹). تحلیل اقلیم دفاعی– نظامی مناطق بیابانی و سواحل مکران با تأکید بر تحلیل همدیدی بارش‌های سنگین. *فصلنامه آماد و فناوری دفاعی* . ۳ (۲)، ۹۷–۱۲۲.

خورشیددوست، علی محمد؛ مفیدی، عباس؛ رسولی، علی اکبر و آزرم، کامل (۱۳۹۵). تحلیل همدیدی سازوکار وقوع بارش‌های سنگین بهاره در شمال غرب ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۵(۸)، ۵۳–۸۲.

دهقان، شهیده؛ گندمکار، امیر و عباسی، علیرضا (۱۴۰۲). تحلیل الگوهای همدید دو رخداد سنگین‌ترین بارش‌های حوضه سد زاینده رود. *نشریه جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۱۲(۴۸)، ۱۱۶–۱۲۵.

رحیمی، دانا؛ خوشحال دستجردی، جواد و رحیمی، داریوش (۱۴۰۳). تحلیل همدید شدیدترین سیلاب حوضه کرخه (سیلاب ۱۲ فروردین ۱۳۹۸). *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۴ (۷۴)، ۱۹۳–۱۷۶.

رنجبر، عباس و مرادی، محمد (۱۳۹۸). بررسی موردی بارش‌های سیل آسا در ماه مارس ۲۰۱۹. *نشریه نیوار*، ۴۳(۱۰۴)، ۷۱–۸۶.

رئیسی، واحد و محمودی، پیمان (۱۴۰۲). بررسی ساختار سه بعدی چرخندهای موجد بارش‌های فراگیر غرب و شمال غرب ایران با منشا دریای مدیترانه در دوره سرد سال. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۴(۵۴)، ۱۷۳–۱۴۹.

طیب طاهر، رضا و بزرگمهر، کیا (۱۳۹۳). تحلیل سینوپتیکی رخداد بارش شدید ۹ فروردین ۱۳۷۶ در استان خوزستان و پهنه بندی آن با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. *اولین کنفرانس بین المللی یافته‌های نوین در علوم کشاورزی*، منابع طبیعی و محیط زیست، تهران.

عساکره، حسین و خجسته، آتوسا (۱۴۰۰). فراوانی ورود چرخندهای مدیترانه‌ای به ایران و اثر آن‌ها بر بارش‌های فراگیر. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۰(۲۷)، ۱۵۹–۱۷۶.

عساکره، حسین؛ دارند، محمد و زندکریمی، سوما (۱۴۰۱). بررسی رابطه تغییر تراز فشار وردایست با سیکلون‌های توأم با بارش‌های فراگیر ایران. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۸(۱)، ۷۵–۹۲.

علیجانی، بهلول ۱۳۸۵. *آب و هوای ایران*. انتشارات پیام نور، تهران.

علیزاده، تیمور؛ عزیزی، قاسم و روستا، ایمان (۱۳۹۱). واکاوی الگوهای گردشی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال جو هنگام رخداد بارش‌های فراگیر و غیرفراگیر در ایران. *آمایش فضا و ژئوماتیک*، ۱۶(۴)، ۱–۲۴.

قائدی، سهراب؛ موحدی، سعید و مسعودیان، سید ابولفضل (۱۳۹۱). رابطه‌ی فرود دریای سرخ با بارش‌های سنگین ایران. جغرافیا و پایداری محیط، ۲(۱)، ۱–۱۸.

کواکبی، غزاله؛ موسوی بایگی، محمد؛ مساعدی، ابوالفضل و جباری نوقابی، مهدی (۱۳۹۴). تعیین عوامل موثر بر وقوع خشکسالی با تحلیل داده‌های پانلی (مطالعه موردی استان خراسان رضوی). *آب و خاک*، ۲۸(۶)، ۱۲۹۸–۱۳۱۰.

لطفی قرانچای، شهرام؛ اکبری ازیرانی، طیبه؛ شکیبا، علی؛ رضاربانی، فاطمه و دشت بزرگی، آمنه (۱۴۰۲). تحلیل سینوپتیک اثر کم‌فشارهای بریده در بارش سنگین ایران. *جغرافیای و مخاطرات محیطی*، ۱۲(۴)، ۲۰۵–۲۳۲.

محمدی، بختیار و مسعودیان، سیدابوالفضل (۱۳۸۹). تحلیل همدید بارش‌های سنگین ایران مطالعه موردی: آبان ماه ۱۳۷۳. *جغرافیا و توسعه*، ۸(۱۹)، ۴۷–۷۰.

مسعودیان، ابوالفضل و محمدی، بختیار (۱۳۸۹). تحلیل فراوانی رودبادهای مرتبط بارخداد بارشهای ابرسنگین ایران. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۷(۲)، ۸۱–۹۱.

مصطفائی، حسن؛ علیجانی، بهلول و سلیقه، محمد (۱۳۹۴). تحلیل سینوپتیکی بارش‌های شدید و فراگیر در ایران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۲(۴)، ۶۵–۷۶.

مفیدی، عباس (۱۳۸۳). اقلیم‌شناسی سینوپتیکی بارش‌های سیل زا با منشا منطقه دریای سرخ در خاورمیانه. *تحقیقات جغرافیایی*، ۱۹(۴)، ۷۱–۹۳.

مفیدی، عباس و زرین، آذر (۱۳۸۴). بررسی سینوپتیکی تاثیر سامانه‌های کم فشار سودانی در وقوع بارش‌های سیل‌زا در ایران. *تحقیقات جغرافیای*، ۲(۷۷).

نبی‌زاده بلخکانلو، عادل؛ حجازی‌زاده، زهرا و ضیائیان فیروزآبادی، پرویز (۱۳۹۷). ارزیابی وضعیت دمایی پوشش گیاهی *(VTCI)* برای پایش خشکسالی در حوضه آبریزسیمینه رود دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر ماهواره *MODIS* . *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۸(۵۰).

نوری‌آرا، رسول؛ دریاباری، سیدجمال الدین؛ علیجانی، بهلول و برنا، رضا (۱۴۰۱). تحلیل سینوپتیکی بارش‌های سیل آسای فروردین ۱۳۹۸ ایران (مطالعه موردی استان لرستان). *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۳(۵۲)، ۲۱–۳۶.

یاراحمدی، داریوش و مریانجی، زهرا (۱۳۹۰). تحلیل الگوی دینامیکی و همدیدی بارش‌های سنگین در جنوب غرب خزر و غرب ایران (مطالعه موردی: بارش مورخه ۱۴/۸/۸۳). *پژوهشهای جغرافیای طبیعی*، ۷۶ ، ۱۰۵–۱۲۰.

Abtahi, V., jahanbakhsh, S., rostamzadeh, H. and lashkari, H. (2025). Synoptic patterns of atmospheric rivers leading to heavy rains in the west and northwest of Iran. *Journal of Geography and Planning*, 29(91), 129-103. doi: 10.22034/gp.2024.57342.3165. (in persian).

Alijani, B. (1995), *Climate of Iran*. Payam-e-Noor Publication, Payam-e-Noor. (in persian).

Alizadeh, T., Azizi, G., & Rousta, I. (2012). Analysis of circulation patterns at the 500 hPa level during widespread and non-widespread precipitation events in Iran. *Spatial Planning and Geomatics*, 16(4), 1–24. doi: 10.22059/jphgr.2025.403917.1007903 (in persian).

Asakereh, H. and Khojasteh, A. (2021). Frequency of entrance Mediterranean Cyclones to Iran and Their Impact on Widespread precipitation. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(27), 159-176. doi: 10.22111/jneh.2020.33171.1632. (in persian).

Asakereh, H., Darand, M. and Zandkarimi, S. (2022). Investigating the Relationship between Change of Tropopause Pressure's level (TPL) and Cyclones Associated with Widespread Precipitation

(WP) in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(1), 75-92. doi: 10.22059/jesphys.2021.-319692.1007300. (in persian).

Babaeian,I. , Karimian,M. and Modirian,R. (2021). Optimum configuration of RegCM4. 7 model in prediction of weekly cumulative precipitation during three extreme precipitation events of March-April 2019. *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(2), 48-60. doi: 10.22125/agmj.2021.287482.-1115. (in persian)

Balkhanloo, A. N., Hejazizadeh, Z., & Zeaiean Firoozabadi, P. (2018). Assessment of Vegetation Temperature Status (VTCI) for monitoring drought in the watershed of Lake Urmia by using MODIS satellite imagery. *Journal of Geographical Science*, 18(50), 129–139. https://doi.org/10.-29252/jgs.18.50.129. (in persian).

Bayat, A., Saligheh, M., & Akbari, M. (2017). Climatology of Mediterranean winter season rain producing cyclones in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 4(2), 1-18. http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2712-en.html (in persian)

Bayat-Afshary, N., & Danesh-Yazdi, M. (2023). Are the magnitude and frequency of floods increasing in Iran due to climate change? Implications from a 50-year analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 68(15), 2243-2261. https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2259904

Beiranvand, I., Gabdomkar, A., Abbasi, A. and Khodagholi, M. (2022). Statistical-Synoptic Analysis of April 2019 Heavy Rainfall in Doroud-Boroujerd Basin. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(32), 169-188. doi: 10.22111/jneh.2022.38564.1806. (in persian).

Bengtsson, L., Hodges, K. I., & Keenlyside, N. 2009. Will extratropical storms intensify in a warmer climate?. *Journal of Climate*, 22(9), 2276-2301. https://doi.org/10.1175/2008JCLI2678.1

Bijandi,M. , Daryabari,S. J. , Ranjbar Saadat Abadi,A. and Arbabisabzevari,A. (2022). Invegtigation of extreme precipitation events over northeastern Iran during the period 2001-2020. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 4(4), 284-307. doi: 10.22034/jmas.2022.347475.1176. (in persian).

Chen, H., Han, L., Tang, Y., Chen, J., Lei, C., & Li, X. (2025). Impacts of tropical cyclones on extreme precipitation and flooding in a humid subtropical inland basin of China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, 102096. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102096

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

Ghaedi, S., Movahedi, S., & Masoodian, A. (2012). The Relation between the Red Sea Trough and Heavy Precipitation in Iran. *Geography and Environmental Sustainability*, 2(1), 1-18. (in persian).

Hawcroft, M., Walsh, E., Hodges, K., & Zappa, G. 2018. Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical cyclones. *Environmental research letters*, 13(12), 124006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaed59

Hochman, A., Marra, F., Messori, G., Pinto, J. G., Raveh-Rubin, S., Yosef, Y., & Zittis, G. (2022). Extreme weather and societal impacts in the eastern Mediterranean. *Earth System Dynamics*, 13(2), 749-777. https://doi.org/10.5194/esd-13-749-2022

Hochman, A., Plotnik, T., Marra, F., Shehter, E. R., Raveh-Rubin, S., & Magaritz-Ronen, L. (2023). The sources of extreme precipitation predictability; the case of the 'Wet'Red Sea Trough. *Weather and climate extremes*, 40, 100564. https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100564

Hosseini, S. A., & Mafakheri, O. (2020). Analysis of the defense-military climate of desert regions and Makran coasts with emphasis on synoptic analysis of heavy rainfalls. *Defense Preparedness and Technology Quarterly*, 3(2), 97-122. doi:10.29252/jgs.19.55.37 (in persian).

Jahanbakhsh, S., Jafary shandy, F. and Hosseinalipourgazy, F. (2013). The Relationship between Circulation Patterns and Super Heavy Rain over Azerbaijan Region. *Journal of Geography and Planning*, 16(42), 113-138. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_32.html?lang=en (in persian).

Jalali, M., Doustkamian, M., & Shiri Karim Vandi, A. (2019). The studying and synoptic analysis of mechanical in mechanism of widespread winter precipitation of Iran. *Journal of Geographical Science*, 19(55), 37-55. doi:10.29252/jgs.19.55.37. (in persian).

Jamshidi Khezeli, T., Ranjbar Saadat Abadi, A., Nasr-Esfahany, M. A., Tajbakhsh Mosalman, S., & Mohebalhojeh, A. R. (2022). Autumn and Winter Extreme Precipitation Events and their Relationship with ENSO, NAO and MJO Phases over the West of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(4), 201-218. https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.316961.1007280

Kavakebi, G., Mousavi Baygi, M., Mosaedi, A. and Jabbari Nooghabi, M. (2016). Determining of most Effective Factors on drought Useing of Panel Data Analyse (Khorasan Razavi Province). *Water and Soil*, 28(6), 1298-1310. doi: 10.22067/jsw.v0i0.31841. (in persian).

khorshiddoust, A. M., mofidi, A., rasouli, A. A. and Azarm, K. (2016). A Synoptic analysis for the occurrence of springtime heavy rainfall in the Northwest of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 5(8), 53-82. doi: 10.22111/jneh.2016.2783. (in persian).

Lotfi, S., Akbari Azirani, T., Shakiba, A., Rabbani, F. and 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. doi: 10.22067/geoeh.2023.79894.1314. (in persian).

Masoodian,S. A. and Mohammadi,B. (2011). Analysis of Jet Stream Frequencies Associated with Super Heavy Rainfalls of Iran. *Iran-Water Resources Research*, 7(2), 80-91. https://www.iwrr.ir/-article_16185.html?lang=en (in persian).

Modarres, R., & da Silva, V. D. P. R. (2007). Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of arid environments*, 70(2), 344-355. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.12.024

Mofidi, A. (2004). Synoptic climatology of flood-producing rainfalls with Red Sea origin in the Middle East. *Geographical Researches*, 19(4), 71–93. (in persian).

Mofidi, A., & Zarrin, A. (2005). Synoptic analysis of the impact of Sudanese low-pressure systems on the occurrence of flood-producing rainfalls in Iran. *Geographical Researches*, 2(77). (in persian).

mohamadei, B. and masodeian, A. (2010). Dr. B. Mohammadi Dr. S. A. Massodiyan Department of Geography Department of Geography Kordestan University Isfahan University Synoptic Analysis of Heavy Precipitation Events in Iran. *Geography and Development*, 8(19), 47-70. doi: 10.22111/gdij.2010.1108. (in persian).

Moradi,M. and Ranjbar,A. (2019). Case Study of Flood Rainfall in March 2019. *Nivar*, 43(104-105), 78-94. doi: 10.30467/nivar.2019.90510. (in persian).

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. http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2533-fa.html. (in persian).

nooriara,R. , daryabari,S. J., aligani,B. and borna,R. (2023). Synoptic analysis of Iran 2019 torrential rains (Case study: Lorestan). *Journal of Climate Research*, *1401*(52), 21-36. https://clima.irimo.ir/-article_164620_en.html (in persian).

Omidvar, K., & Torabi, M. (2012). Identification of heavy rainfall patterns in Chaharmahal and Bakhtiari province. *Spatial Planning and Geomatics*,16(4), 135-170. https://hsmsp.modares.ac.ir/-article_14325.html (in persian)

Omidvar, K., Mahmodabadi, M. and Safarpour, F. (2015). A Synoptic Analysis of Heavy Rains February 2011 in Southern and Central Regions of Iran (with emphasis on Kerman Province).

Journal of Geography and Planning, 19(51), 21-39. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_3434.-html?lang=en (in persian).

Parak, F., Khaki, A. and Roshani,A. (2019). Climatological study of moisture flux divergence patterns in heavy rainfall leading to floods in southwestern Iran with emphasis on April 2019 floods. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 1(4), 380-393. https://www.ims-jmas.net/-article_113847_en.html (in persian).

Parandeh Khozani,A. and Lashkari,H. (2010). Synoptic Analysis of Flood Generating Systems in the Southern Part of Iran. *Iran-Water Resources Research*, 6(2), 66-73. https://www.iwrr.ir/article_-15827.html?lang=en (in persian).

Pazhooh,F. and Jafari,F. (2020). Synoptic analysis of heavy and hazardous precipitations in western and south western Iran during the first ten days of April 2019. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(114), 165-184. doi: 10.22131/sepehr.2020.44600. (in persian).

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

rahimi D, khoshhal dastjerdi J, rahimi D. (2024). Synoptic analysis of the most severe flood in Karkheh basin (Flood 1 April 2019). *jgs*. 24(74), 176-193. doi:10.61186/jgs.24.74.16. (in persian).

Rahimi, D., Khoshhal Dastjerdi, J., & Rahimi, D. (2024). Synoptic analysis of the most severe flood in Karkheh basin (Flood 1 April 2019). *Journal of Geography and Regional Development*, 24 (74), 176–193. https://doi.org/10.61186/jgs.24.74.16. (in persian).

Rahimi, Y. G., Abbasi, E., & Farajzadeh, M. (2015). Analysis of the effect of Tropical Cyclone Phet on the occurrence of heavy rainfall and floods in Chabahar, Iran. *Weather*, 70(12), 348-352. https://doi.org/ 10.1002/wea.2582

Raisi,V. and Mahmoudi,P. (2023). Investigating Three-Dimensional Structure of Cyclones Causing Pervasive Precipitation in Western and Northwestern Iran with Origin in the Mediterranean Sea in the Cold Spells of the Year. *Journal of Climate Research*, 1402(54), 149-173. https://clima.irimo.-ir/article_178897.html?lang=en (in persian).

Raziei, T., Mofidi, A., Santos, J. A., & Bordi, I. (2012). Spatial patterns and regimes of daily precipitation in Iran in relation to large-scale atmospheric circulation. *International Journal of* Climatology, 32(8), 1226 .https://doi.org/10.1002/joc.2347

Shahideh Dehghan, Amir Gandomkar, Alireza Abbasi, (2024). Analysis of Synoptic Patterns of the Two Heaviest Rainfall Events in Zayandeh Rood Dam Basin, *Journal of Geography and Environmental Studies*, 12(48), 116-125. magiran.com/p2689950. (in persian).

Tayeb Taher, R., & Bozorgmehr, K. (2014). *Synoptic analysis of the severe precipitation event on April 9, 1997 in Khuzestan province and its zoning using geographic information system*. The First International Conference on New Findings in Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment, Tehran. (in persian).

Uehling, J., & Schreck III, C. J. (2024). Observed changes in extreme precipitation associated with us tropical cyclones. *Journal of Climate*, 37(14), 3661-3674. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0327.1

Yarahmadi, D. and Mryanji, Z. (2011). The Analysis of Dynamic and Synoptic Patterns of Heavy Rainfall in the South West of Caspian Sea and West of Iran (Case Study: Rainfall on 04/11/ 2004). *Physical Geography Research*, 43(76), 105-120. https://jphgr.ut.ac.ir/article_23073.html?lang=en (in persian).