



Examination and Identification of Rossby Wave Break Patterns in Relation to Extreme Precipitation Events in Northwest of Iran (1990-2024)

Sirus Khodadadeh¹ , Ali Mohammad Khorshidoost^{2✉} , Behrouz Sarisarrafi³ 

1. PhD Student of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: siruskhodadadeh@gmail.com
2. Corresponding Author, Professor of Climatology, Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: khorshid@tabrizu.ac.ir
3. Professor of Climatology, Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: sarisarrafi@tabrizu.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 6 December 2024

Revised: 20 January 2025

Accepted: 29 January 2025

Published: 29 December 2025

Keywords:

Extreme Precipitation,
Rossby wave break,
potential vorticity,
northwest Iran.

In this study, the relationship between the break of Rossby waves and the occurrence of extreme precipitation in northwestern Iran was investigated on a synoptic scale. The research focused on the synoptic analysis of potential vorticity at the potential temperature level of 330 Kelvin. During the 34-year statistical period (from 1990 to 2024), 270 precipitation systems were identified, based on which the break of Rossby waves was examined. Through long-term analysis of both anticyclonic and cyclonic breaks of Rossby waves, four patterns of Rossby wave break related to extreme precipitation events in northwestern Iran were identified. The results indicate that the patterns in the spring and autumn seasons have the highest frequency, while those in winter and summer have the lowest occurrences of Rossby wave breaks, respectively. The highest frequency of cyclonic break events occurred in the months of April and May, while the highest frequency of anticyclonic breaks was noted in the months of October and November. The analysis of potential vorticity streamers and their connection to extreme precipitation events reveals a seasonal dependency between the break of Rossby waves, which influence both latitudinal and longitudinal extents, contributing to the occurrence or intensification of extreme precipitation in northwestern Iran. Therefore, the findings of this research can enhance the understanding of extreme precipitation patterns and improve medium- to long-term weather forecasting in the country.

Cite this article: Khodadadeh, S., Mohammad Khorshidoost, A., & Sarisarrafi, B. (2026). Examination and Identification of Rossby Wave Break Patterns in Relation to Extreme Precipitation Events in Northwest of Iran (1990-2024). *Journal of Geography and Planning*, 29 (94), 273-290. <http://doi.org/10.22034/gp.2025.64891.3333>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2025.64891.3333>

Publisher: University of Tabriz.

Introduction

Iran is located in a semi-arid region of the world, and one of the prominent features of the climate in these areas is the occurrence of heavy rainfall. Heavy precipitation is formed through the vertical transport of moisture within rain-producing clouds, which is enhanced by upward force, reduction of static stability, and provision of water vapor (Zhong et al., 2020). Large amounts of rainfall are generally associated with substantial convection of moisture within moist air and unstable environments. When conditions are established, this often occurs in connection with the relative stability of synoptic scale flows and the slow movement of systems and precipitation patterns at the mesoscale (Arger et al., 2021; Barnes et al., 2023). The occurrence of Rossby wave breaking on a larger scale and its connection to heavy precipitation events in Northwest Iran indicates that significant changes are induced in the regional atmospheric patterns. Cyclonic and anticyclonic breakups, along with the transport of warm and cold moist air, create synoptic and dynamic conditions for convection and moisture uplift, leading to heavy rainfall. The combination of these two phenomena, especially during seasonal changes, can result in rapid and sudden alterations in the precipitation and atmospheric patterns of the region (Holton, 2013).

Materials and Methods

The occurrence of heavy precipitation in Northwest Iran and its relationship with Rossby wave breaking were examined for the statistical period of 1990-2024. Initially, using rainfall data from synoptic stations in the northwest of the country, 275 heavy precipitation systems were identified for the region. To identify Rossby waves, an amount of 2 PV units (2PVU) was examined on potential temperature levels of 330 Kelvin (330K). The streamer detection index developed by Wernli and Sprenger (2017) was used to determine and classify the breaks. After identifying and classifying the wave breaks, the frequency of occurrences was calculated and underwent synoptic and climatic analysis.

Results

The results indicate that the identified patterns exhibit the highest frequency of Rossby wave breaking events in spring and autumn, while winter and summer rainfall patterns show the lowest frequencies. The highest frequency of cyclonic wave breaking events (CWB) occurs in the months of Farvardin (March-April) and Ordibehesht (April-May), while the highest frequency of anticyclonic wave breaking events (AWB) occurs in the months of Mehr (September-October) and Aban (October-November). The analysis of potential vorticity streamers (2PVU) and their relationship with heavy rainfall events in the studied region shows a strong seasonal dependency between Rossby wave breaking that penetrates both latitude and longitude, contributing to or enhancing heavy rainfall in northwest Iran. Consequently, this research can provide a better understanding of synoptic and dynamical rainfall patterns and improve medium- to long-term weather forecasting in the country.

The hypothesis of this study posits that Rossby wave breaking provides a primary synoptic and dynamic pathway for the occurrence of Extreme Precipitation Events (EPEs) in Northwest Iran. This hypothesis was examined through a systematic review using EPE climatology and PV streamers, focusing on Rossby wave breaking. In the spring breaking pattern for AWB, a significant frequency core is formed in Central Asia. The spring pattern represents the most critical frequency pattern for CWB streamer occurrences and accounts for the highest frequency values. The frequency core in this pattern completely covers Northwest Iran and the Caspian Sea, playing the most important role in wave breaking and heavy rainfall events in Northwest Iran. In the autumn pattern, maximum frequency occurs for AWB breaking, with frequency cores forming over the Mediterranean Sea and southern Turkey. In the prevailing winter breaking pattern, a strong anomaly core is established at 30 degrees North latitude and approximately 15 degrees West longitude, over the northwestern continent of Africa and the North Atlantic Ocean. The summer breaking pattern shifts upward to 40 to 80 degrees North latitude. The frequencies of AWB breaking create a secondary core in the northern half of the Caspian Sea, extending into the northern strip of the Alborz Mountains and areas of Northwest Iran.

Conclusion

The annual total of AWB (Atlantic Wave Breaking) and CWB (Continental Wave Breaking) events during the studied statistical period of 1990-2024 demonstrates that the frequency of Rossby wave breaking correlates with the frequency of precipitation events. AWB and CWB events show a higher frequency from 2004 to 2024. Climate change, resulting from global warming, has led to dynamic and synoptic changes, increasing instances of Rossby wave breaking and heavy, sudden rainfall in recent decades. The higher frequency of CWB breaking events compared to AWB suggests that intense and convective rainfall has also increased in recent decades, owing to the mechanism by which CWB influences convective rainfall and severe thunderstorms accompanied by lightning. Research indicates that with rising temperatures, the intensity of storms and atmospheric phenomena increases significantly. These storms can impart additional energy to waves, resulting in more

frequent breakages (IPCC, 2021). In Iran, the study by Rafati and Sadeghinia (2023) confirms this issue concerning lightning occurrences and their trends in recent decades.

Keywords: Extreme Precipitation, Rossby wave break, potential vorticity, northwest Iran.



بررسی و شناسایی الگوهای شکست امواج راسبی در ارتباط با رخدادهای بارشی شدید شمال غرب ایران (۱۹۹۰-۲۰۲۴)

سیروس خداداده^۱، علی محمدخورشیددوست^۲✉، بهروز ساری صراف^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: siruskhodadadeh@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: khورشید@tabrizu.ac.ir
۳. استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: sarisarraff@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این تحقیق، ارتباط بین شکست امواج راسبی و رخدادهای بارشی شدید شمال غرب ایران در مقیاس همدیدی مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه به تجزیه و تحلیل سینوپتیکی تاوایی پتانسیلی، در سطح هم‌دمای پتانسیلی ۳۳۰ کلون پرداخته است. در دوره آماری ۳۴ ساله (از ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴)، ۲۷۰ سامانه بارشی شناسایی شد و براساس آن شکست امواج راسبی مورد بررسی قرار گرفت. با تحلیل و بررسی بلندمدت شکست آنتی‌سیکلونی و سیکلونی امواج راسبی، چهار الگوی شکست امواج راسبی در ارتباط با رخدادهای شدید بارشی شمال غرب ایران شناسایی شدند. نتایج نشان می‌دهد که الگوهای فصل بهار و پاییز بیشترین فراوانی، و الگوهای زمستان و تابستان، به ترتیب حداقل رخدادهای شکست امواج راسبی را دارند. بیشترین فراوانی رخدادهای شکست سیکلونی، ماه‌های فروردین و اردیبهشت، و بیشترین فراوانی شکست آنتی‌سیکلونی، ماه‌های مهر و آبان را شامل می‌شود. تحلیل استریم‌های تاوایی پتانسیلی، و ارتباط آن با رخدادهای بارشی شدید نشان می‌دهد که یک وابستگی فصلی بین شکست امواج راسبی وجود دارد که هم در عرض و هم در طول جغرافیایی نفوذ می‌کنند و بارش‌های شدید شمال غرب ایران را ایجاد یا تقویت می‌کنند؛ بنابراین تحقیق صورت‌گرفته می‌تواند به درک بهتر الگوهای بارشی شدید و همچنین بهبود پیش‌بینی‌های میان‌مدت و بلندمدت آب‌وهوایی کشور کمک کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸	
کلیدواژه‌ها: بارش‌های شدید، شکست امواج راسبی، تاوایی پتانسیلی، شمال غرب ایران.	

استناد: خداداده، سیروس؛ محمدخورشیددوست، علی و ساری صراف، بهروز (۱۴۰۴). بررسی و شناسایی الگوهای شکست امواج راسبی در ارتباط با رخدادهای بارشی شدید شمال غرب ایران (۱۹۹۰-۲۰۲۴). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۹ (۹۴)، ۲۹۰-۲۷۳.

<http://doi.org/10.22034/gp.2025.64891.3333>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

ایران در یک منطقه نیمه‌خشک جهان واقع شده است و یکی از ویژگی‌های بارز آب‌وهوای این مناطق، وقوع بارش‌های شدید^۱ است. به همین دلیل، مطالعه بارش‌های شدید اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی‌های زیربنایی دارد. رخداد بارش‌های شدید خطر طبیعی بزرگ در سراسر جهان است که اغلب منجر به سیل می‌شود و می‌تواند تهدیدی برای زندگی انسان‌ها باشد (اشلی ۲۰۰۸؛ پیتر و همکاران، ۲۰۱۵) همچنین اثرات اجتماعی-اقتصادی و زیست‌محیطی پرهزینه‌ای را به دنبال دارد (جومن و همکاران ۲۰۱۲). بارش‌های شدید با جریان عمودی رطوبت داخل ابرهای بارش‌زا که از طریق نیروی صعودی، کاهش پایداری ایستا و تأمین بخار آب تقویت می‌شود شکل می‌گیرد (ژونگ و همکاران، ۲۰۲۰). مقدار زیاد بارش عموماً در ارتباط با همرفت فراوان رطوبت در درون هوای مرطوب و محیط‌های ناپایدار ایجاد می‌شود، و در صورت استقرار و فراهم بودن شرایط و حرکت آهسته سامانه‌ها و الگوهای بارشی در مقیاس متوسط اتفاق می‌افتد (آرگر و همکاران، ۲۰۲۱؛ بارنز و همکاران، ۲۰۲۳). شکست امواج راسبی^۲ می‌تواند به ناپایداری‌های جوی، تغییر در الگوهای آب و هوایی و وقوع پدیده‌هایی مانند طوفان‌ها و بارش‌های شدید منجر شوند.

امواج راسبی^۳، به‌عنوان امواج سیاره‌ای شناخته می‌شوند و در سیالات در حال چرخش ایجاد شده و در داخل سیال جریان می‌یابند. این امواج که به طور طبیعی در سیالات در حال چرخش رخ می‌دهد (هولتون، ۲۰۱۳)، برای اولین بار توسط هواشناس آمریکایی سوئدی‌الاصل کارل گوستاو آروید راسبی^۴ در جو زمین در سال ۱۹۳۹ شناسایی شدند (راسبی، ۱۹۳۹). امواج راسبی در جو زمین پیچ‌وخم‌های بزرگی در بادهای سطوح بالا که تأثیر عمده‌ای بر آب‌وهوا دارند ایجاد می‌کند. این امواج با سامانه‌های فشار و جریان رودبادهای مرتبط هستند (دیکپاتی، ۲۰۲۰). شکست امواج راسبی به عنوان یک واژگونی در مقیاس بزرگ و غیرقابل برگشت خطوط تاوایی پتانسیلی^۵ (PV) روی سطوح همدمای پتانسیلی تعریف می‌شود (هولتون، ۲۰۱۳). شواهد نشان می‌دهد که شکست امواج راسبی در امتداد سطوح بالایی، می‌تواند فرایند دینامیکی اصلی برای ایجاد بارش‌های شدید باشد (لنگن هاگر و همکاران، ۲۰۱۹؛ مور و همکاران، ۲۰۲۱).

زمانی که امواج راسبی شکسته می‌شوند، زبانه‌های درازی از هوا با PV بالا تشکیل می‌شود که استریم‌های تاوایی پتانسیلی^۶ (PVs) نامیده می‌شوند. استریم‌های که با اتصال کم‌عرض و باریک به بدنه اصلی تاوایی پتانسیل از آن کشیده می‌شوند، در واقع هوای استراتوسفری یا تروپوسفری هستند که به سمت استوا یا قطب امتداد می‌یابند (بارنز و همکاران، ۲۰۲۳). استریم‌های PV می‌توانند با انتقال رطوبت به سمت قطب‌ها بر آب‌وهوای یک منطقه مانند رخداد بارش‌ها، بادهای سیل‌ها که در سمت شرق جریان PV ایجاد می‌شود تأثیر بگذارد (مور، ۲۰۱۷) و می‌تواند الگوهای بارش شدیدی را ایجاد کند (گلات و همکاران، ۲۰۱۱). استریم‌ها با اعوجاج‌های متمایز آنتی‌سیکلونی و سیکلونی میدان تاوایی پتانسیلی (PV) خود مشخص می‌شوند، بر این اساس شکست‌های سیکلونی^۷ (CWB) و آنتی‌سیکلونی^۸ (AWB) را شکل می‌دهند (مک اینتایر و پالمر، ۱۹۸۳). ترکیب این دو پدیده، به‌ویژه در زمان تغییرات فصول سال، می‌تواند به تغییرات سریع و ناگهانی سامانه‌های بارشی و جوی منطقه منجر شود. با توجه به این تأثیرات؛ درک ویژگی‌های اقلیمی و دینامیکی حاکم بر رخداد‌های بارشی شدید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای بهبود پیش‌بینی‌های میان‌مدت و پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی بلندمدت باشد (وولف و همکاران، ۲۰۲۴).

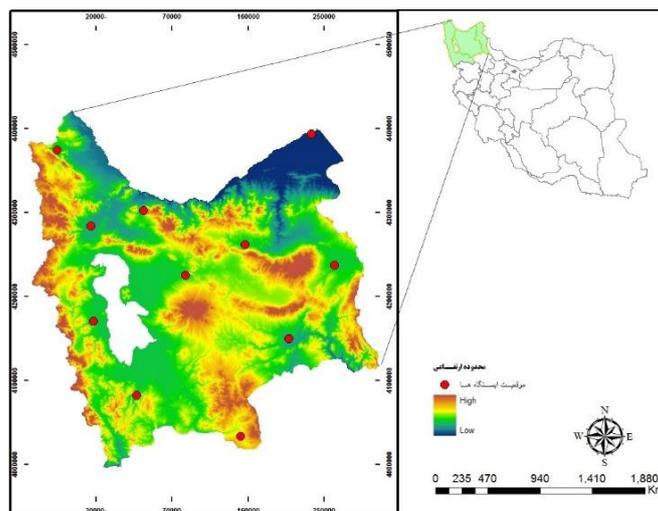
در ایران، پژوهش‌های زیادی در زمینه‌های سینوپتیکی و دینامیکی برای تحلیل بارش‌های شدید انجام شده است؛ از جمله

1. extreme precipitation events (EPEs)
2. Rossby wave breaking (RWB)
3. Rossby wave
4. Carl-Gustaf Arvid Rossby
5. Potential Vorticity
6. Potential Vorticity Streamers (PVs)
7. cyclonic wave breaking (CWB)
8. Anticyclonic wave breaking (AWB)

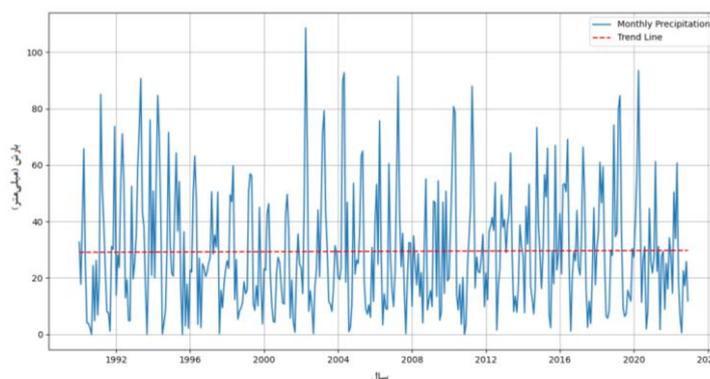
برای رخدادهای بارش فرین غرب ایران آستانه‌ای مناسب و مقیاس مکانی مناسب تعیین شده است (ساری صراف و همکاران، ۱۴۰۱). بررسی همدیدی سازوکار وقوع بارش‌های سنگین بهاره شمال غرب ایران با چهار الگوی همدیدی دسته‌بندی می‌شود (خورشید دوست و همکاران ۱۳۹۵). مقایسه شکست امواج راسبی روی اروپا و غرب آسیا از دیدگاه فعالیت موج (خدادی و همکاران، ۱۳۹۹)، و همچنین تاوایی پتانسیلی و ارتباط آن با بارش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است (سعادت‌آبادی، ۱۳۹۴). وجود چرخندهای اولیه در پیش باد زاگرس برای ایجاد چرخندزایی در بادپناه کوهستان زاگرس ضروری است و منجر به رخداد بارش شدید می‌شود (جهانبخش و همکاران ۱۳۹۹). محمدی و همکاران (۱۳۹۱) با تحلیل دینامیکی سامانه‌های سودانی و رخداد بارش‌های سنگین در جنوب غرب ایران، کمیت‌های دینامیکی و تأثیر آن بر بارش‌های سنگین را مورد بررسی قرار دادند، همچنین مرادی و همکاران (۱۳۸۷) نقش تاوایی پتانسیلی هم‌ارز و تر در مسیریابی سامانه‌های سودانی، مسیر حرکت این سامانه را به‌خوبی نشان دادند. خان‌سالاری و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر عوامل کشانه تاوایی پتانسیلی بر میدان‌های هواشناختی با کاربست فن وارون‌سازی تاوایی پتانسیلی و اثر کوهستان را بررسی کردند. برهانی و همکاران (۱۳۹۷) نیز با مطالعه فراوانی و توزیع تاشدگی وردایست و تغییرات فصلی آن را با تأکید بر منطقه جنوب غرب آسیا نشان دادند که این منطقه در تمام طول سال دارای بی‌هنجاری مثبت فراوانی تاشدگی نسبت به مقدار میانگین نیمکره شمالی است.

روش پژوهش

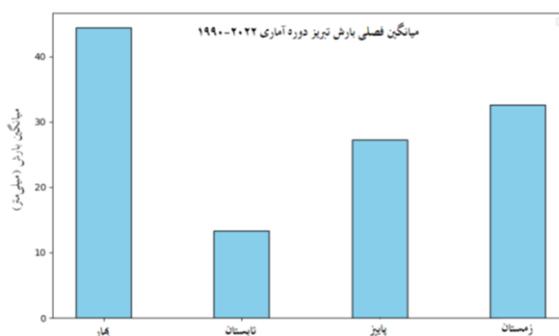
در این تحقیق از داده‌های نسل پنجم داده‌های باز تحلیل جوی^۱ (ERA5) تولید شده توسط ECMWF^۲ با وضوح شبکه 1° تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. این مرکز با استفاده از سیستم‌های همسان‌سازی داده‌ها یک پایگاه داده منسجم فیزیکی از وضعیت جهانی جو ایجاد می‌کند که توسط مشاهدات موجود محدود شده و از کالیبراسیون‌های دقیقی استفاده می‌شود تا آب و هوای محلی را به دقت بازتولید کند (سوسی و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین داده‌های سینوپتیکی و مقدار بارش ایستگاه‌های انتخابی (شمال غرب ایران)، برای دوره آماری مورد مطالعه (سال‌های ۲۰۲۴-۱۹۹۰) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. برای شناسایی و استخراج بارش‌های شدید با توجه به شرایط اقلیمی و محلی خاص منطقه، بارش‌های بالای ۱۰ میلی‌متری روزانه که بیش از ۴۰ درصد از سطح منطقه را در بر می‌گیرند، انتخاب شدند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ مظفری و همکاران، ۱۳۹۶). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که با توجه به شرایط محلی و اقلیمی آستانه‌های مختلفی برای تعریف بارش‌های شدید وجود دارد (عسگری و همکاران، ۱۳۸۶؛ حجازی زاده و همکاران، ۱۳۹۹؛ محمدی، ۱۳۹۲؛ ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۸۸؛ شفیعی و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیو، ۲۰۱۷). بر این اساس ۲۷۰ سامانه‌ی بارشی از یک‌روزه تا بیشتر از ۵ روزه انتخاب شدند. در شکل ۱، منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های انتخابی با توجه به توپوگرافی خاص منطقه که در بارش‌های منطقه نقش مهمی دارند مشاهده می‌شود. در شکل ۲ و ۳ نمودار سری زمانی بارش ماهانه و فصلی ایستگاه سینوپتیکی تبریز که نشان دهنده اقلیم منطقه است آورده شده است. نمودار میانگین بارش فصلی نشان می‌دهد که فصل بهار بیشترین بارندگی را دریافت می‌کند و فصل تابستان نیز حداقل بارندگی را دارد (شکل ۳).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های انتخابی



شکل ۲. نمودار سری زمانی بارش ماهانه ایستگاه هواشناسی تبریز، دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۲.



شکل ۳. نمودار میانگین بارش فصلی ایستگاه تبریز، طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۲.

برای شناسایی امواج راسبی از تاوایی پتانسیلی بر روی سطوح هم‌دمای پتانسیلی استفاده شد، تاوایی پتانسیل به‌عنوان یکی از موفقیت‌های مهم نظری هواشناسی مدرن بوده و رویکردی ساده شده برای درک حرکت سیالات در یک سامانه چرخشی مانند جو زمین است. تاوایی پتانسیل (PV)، تاوایی مطلق بسته‌ای از هوایی است که بین دو سطح هم‌دما محصور شده است (برایان و همکاران، ۲۰۱۲). ارتل (ارتل، ۱۹۴۲)، PV را به‌عنوان حاصلضرب چرخندگی مطلق (ζ) و پایداری استاتیک $1 \left(-g \frac{\partial \theta}{\partial p}\right)$ تعریف کرد، رابطه ۱.

۱. پایداری جو در جهت عمودی نسبت به جابجایی‌های عمودی

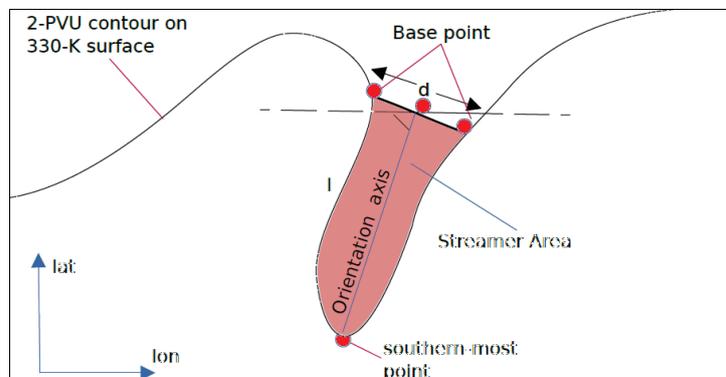
در سامانه مختصات همسان تروپی:

$$PV = (\zeta\theta + f) \times \left(-g \frac{\partial\theta}{\partial p}\right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

θ مؤلفه عمودی تاوایی نسبی روی سطوح با دمای ثابت، f عامل کوریولیس، g شتاب ناشی از گرانش و θ دمای پتانسیل است (هولتن، ۱۹۹۲). واحد تاوایی پتانسیل (PVU) به صورت زیر تعریف می شود:

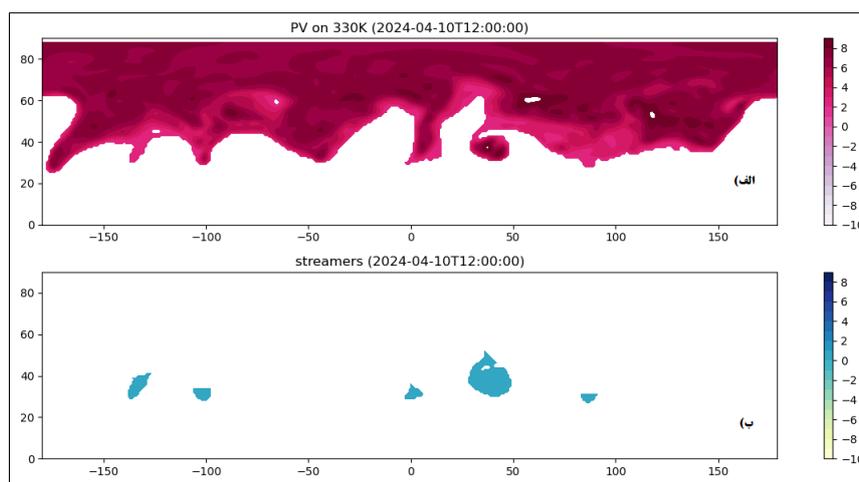
$$\frac{10^{-6} \cdot K \cdot m^2}{kg \cdot s} = 1PVU$$

در این تجزیه و تحلیل PV (2PVU) روی سطوح پتانسیل دمایی 330K که به عنوان سطح معمول تقاطع تروپوپاز دینامیکی است انتخاب شده است (شکل ۴). برای تعیین و مرزبندی استریمر بر اساس اندازه و عرض آن‌ها از شاخص تشخیص استریمر که توسط ورنلی و اسپرنگر (۲۰۰۷)، و سایرین توسعه یافته است استفاده می شود (اسپرنگر و همکاران، ۲۰۱۷؛ کادیرلی، ۲۰۲۲)، شکل ۴.



شکل ۴. شناسایی استریمر PV بین نقاط پایه، انتهایی و جنوبی ترین نقطه، محور جهت و زاویه جریان. اقتباس شده از ورنلی و اسپرنگر (۲۰۰۷).

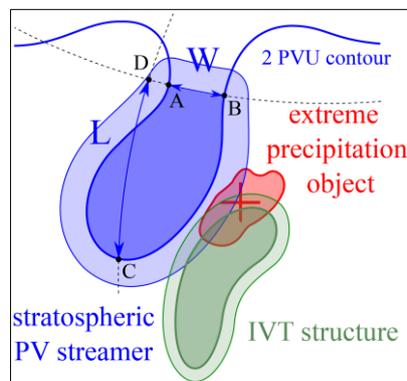
برای تشخیص استریمرها در امتداد تروپوپاز دینامیکی 2PVU، نقاط پایه (d، شکل ۴) با فاصله‌ای ۸۰۰ کیلومتر (نقاط پایه قرمز رنگ شکل ۴) بررسی می شوند تا فرورفتگی‌های بزرگ‌تر حذف شوند. طول کل کانتور (l، شکل ۲) نیز ۱۲۰۰ کیلومتر در نظر گرفته می شود (این مقادیر را می توان برای استریمرهای PV گسترده تر و یا باریک تر تغییر داد)، تا فقط ویژگی‌های مهم ثبت شود و تغییرات جزئی در تروپوپاز 2PVU وجود نداشته باشد (شکل ۵). هنگامی که این شرایط ایجاد شود، ناحیه محصور شده توسط منحنی به عنوان یک استریمر (ناحیه رنگی) شناسایی می شود. محور چرخش استریمر نیز برای تشخیص استریمرهای آنتی سیکلونی و سیکلونی مورد استفاده قرار می گیرد؛ بنابراین شاخص استریمر ورنلی و اسپرنگر (۲۰۱۷)، در یک چارچوب فنی و سیستماتیک برای بارش‌های شدید انتخابی، با گام زمانی ۶ ساعته، برای دوره آماری ۲۰۲۴-۱۹۹۰ مورد محاسبه و شناسایی قرار گرفت (شکل ۵).



شکل ۵. شناسایی استریم‌های PV: (شکل الف) PV با مقدار 2PVU روی سطح هم‌دمای پتانسیل 330K، (شکل ب): استریم‌های PV شناسایی شده.

ارتباط استریم‌های PV با رخداد بارش‌های شدید

شکست امواج راسبی، انتقال رطوبت را به سمت قطب تسهیل می‌کند و می‌تواند در مناطقی منجر به بارندگی شدید شود. استریم‌های تاوایی پتانسیلی بر روی بارش‌ها تأثیر گذاشته و با ایجاد جبهه‌ها، و رودبادهای شدید، همرفت شدیدی را ایجاد می‌کند. مطالعه‌ای از کو و همکاران (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که استریم‌های پتانسیل تاوایی معمولاً با وقوع بارش‌های شدید در ارتباط بوده و جریان‌های صعودی و همرفت‌های قوی را ایجاد می‌کنند. شکست امواج راسبی می‌تواند منجر به توده‌های هوای کم‌فشار و شرایط ناپایدار شده و بارش‌ها را افزایش دهند. سیمونز و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی بر روی دینامیک جو بیان کرده‌اند که این شکست‌ها معمولاً بر توزیع‌های بارش تأثیر شدیدی دارند و به شکل‌گیری جبهه‌ها و سامانه‌های جوی کمک می‌کنند. بروس و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیق خود اشاره کردند که جبهه‌های سرد بر رفتار خط بارش تأثیر می‌گذارند و با افزایش رطوبت در ترکیب با دمای بالا، شرایط را برای بارش‌های شدید فراهم می‌کنند. در واقع استریم‌های تاوایی پتانسیلی باعث افزایش ناپایداری‌های جوی شده و به توسعه طوفان‌های همرفتی و بارش‌های شدید کمک می‌کنند (شکل ۶). این ناپایداری‌ها معمولاً به دلیل تغییرات سریع در دما و فشار ایجاد می‌شوند، (هاسکینز و همکاران، ۱۹۸۵)؛ بنابراین استریم‌های تاوایی پتانسیلی با تغییرات در تبادل انرژی و تابش در جو، منجر به افزایش ناپایداری‌های حرارتی، تشکیل ابرهای همرفتی و بارش‌های شدید می‌شود (پیترز و همکاران، ۲۰۰۵).



شکل ۶. طرح شماتیک شکست موج راسبی (استریم PV به رنگ آبی) و انتقال رطوبت شدید (به رنگ سبز) به عنوان فرایندهای مقیاس سینوپتیک EPEs (بارش شدید به رنگ قرمز)، اقتباس شده از دی وریس و همکاران، (۲۰۲۴).

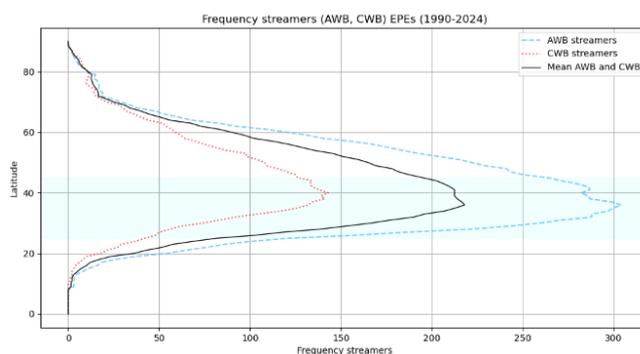
نتایج

شکست امواج راسبی زمانی اتفاق می‌افتد که امواج دچار تغییر شکل برگشت‌ناپذیر می‌شوند. بعد از شناسایی استریمرهای PV، شکست امواج به آنتی‌سیکلونی (AWB) و سیکلونی (CWB) طبقه‌بندی و مورد بررسی قرار گرفت. فراوانی شکست‌های AWB و CWB نشان می‌دهند که هر دو نوع شکست به طور مشترک تأثیرات مهمی بر الگوهای بارشی شمال غرب ایران دارند. به‌ویژه در فصل‌های بهار و پاییز، میانگین فراوانی هر دو نوع شکست افزایش یافته و به وقوع رخدادهای بارشی شدید کمک می‌کند. توزیع فراوانی در طی سال‌های آماری منطقه شمال غرب ایران معمولاً تحت تأثیر هر دو نوع شکست قرار می‌گیرند که این امر می‌تواند به نوسانات شدید آب‌وهوایی منجر شود (شکل ۸).

تأثیر دینامیکی شکست امواج موجب تغییرات در جریان‌های رودبادهای و الگوهای باد تراز میانی و بالایی جو را فراهم می‌کنند. این تغییرات می‌تواند به تغییر در توزیع فشار و دما در سطح جو منجر شوند. در فصول سردتر، شکست‌های آنتی‌سیکلونی نشان می‌دهند که جبهه‌های سرد تقویت شده و موجب تقابل هوای سرد و گرم‌تر می‌شوند. از سوی دیگر، شکست‌های سیکلونی با تقویت سامانه‌های کم‌فشار و انتقال هوای مرطوب، می‌توانند به بارش‌های سنگین منجر شوند. این پدیده‌ها در شمال غرب ایران که دارای ویژگی‌های جغرافیایی، توپوگرافی و اقلیمی خاص است، می‌تواند تأثیرات گسترده‌ای بر الگوهای بارشی و منابع آبی منطقه داشته باشد، (والاس و هابز، ۲۰۰۶)؛ بنابراین، شکست‌های امواج شناسایی شد و به دو دسته کلی، شکست AWB و CWB تقسیم‌بندی شدند. این تقسیم‌بندی به منظور تحلیل دقیق‌تر و شناسایی تفاوت‌های احتمالی در تأثیرات هر نوع شکست بر بارش‌های شدید شمال غرب ایران انجام شد.

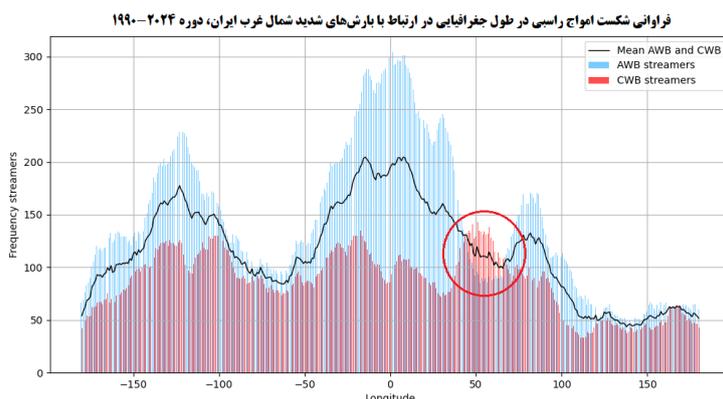
اقلیم‌شناسی شکست امواج راسبی

بررسی اقلیم‌شناسی استریمرهای PV بر روی سطح 330K برای رخدادهای بارشی شدید شمال غرب ایران، در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین فراوانی رخدادهای شکست امواج راسبی، در عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۵ درجه عرض شمالی اتفاق می‌افتد که منطقه شمال غرب ایران در این عرض جغرافیایی قرار دارد (شکل ۷، محدوده آبی کم‌رنگ).



شکل ۷. نمودار ارتباط فراوانی رخدادهای شکست با منطقه مورد مطالعه (آبی کم‌رنگ).

باتوجه به توزیع فراوانی شکست امواج راسبی در طول جغرافیایی، منطقه مورد مطالعه که از ۴۳ تا ۵۱ درجه طول شرقی قرار دارد، در شرق سوی هسته و کانون اصلی رخدادهایی که موجب بیشترین شکست در نیمکره شمالی است (غرب اقیانوس اطلس شمالی و روی دریای مدیترانه) شکل می‌گیرد، و در واقع بیشترین تأثیر را از این منطقه می‌پذیرد (شکل ۸). نمودار فراوانی شکست امواج در دوره رخداد بارش‌های شدید شمال غرب نشان می‌دهد که در نیمکره شمالی، کل فراوانی شکست‌های AWB نسبت به CWB بیشتر است و تنها در محدوده‌ای بصورت ناهنجاری دیده می‌شود (محدوده مشخص شده با دایره، شکل ۸)، که بعد از روند کاهشی شدید شکست AWB، فعالیت و فراوانی شکست CWB بیشتر می‌شود.



شکل ۸. نمودار توزیع فراوانی شکست امواج راسبی (AWB و CWB) شناسایی شده در طول جغرافیایی، دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۴.

با شناسایی رخداد‌های شکست AWB و CWB، نقشه‌های اقلیم‌شناسی استریم‌های PV برای کل دوره مطالعه و همچنین برای فصل‌های سال به طور مجزا مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت و چهار الگو شکست امواج راسبی بر اساس فصل‌های سال شناسایی شدند؛ الگوی شکست فصل بهار، زمستان، پاییز و تابستان.

الگوی شکست فصل بهار

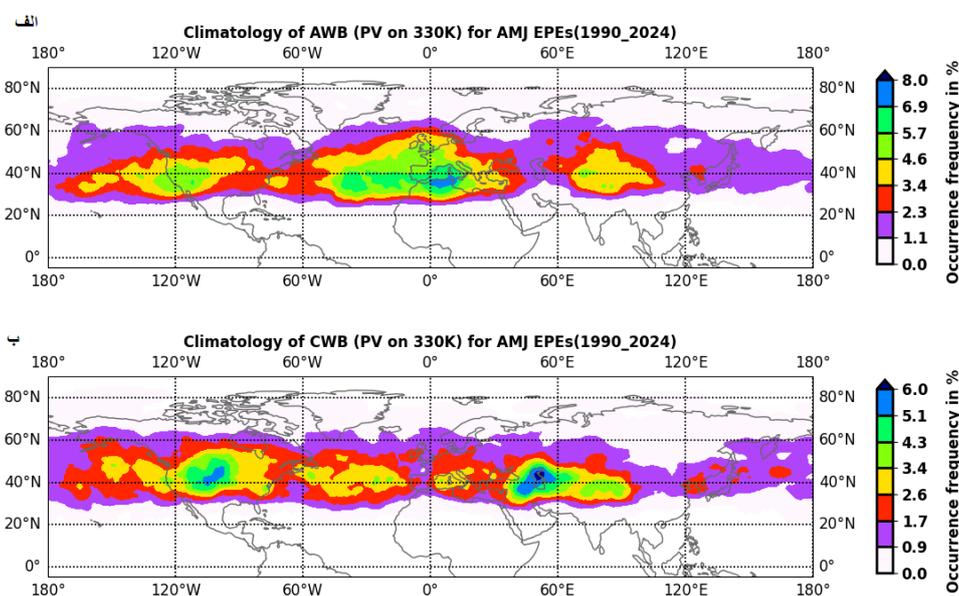
در الگوهای شکست حاکم در فصل بهار، مشاهده می‌شود که نواری از ناهنجاری‌های PV در حدود ۲۵ تا ۶۵ درجه عرض نیمکره شمالی را در بر می‌گیرد (شکل ۹). سه هسته متمایز تقریباً با فراوانی بالای ۸ درصد رخدادها را شامل می‌شود. الگوی فصل بهار نسبت به الگوی زمستان، فراوانی رخدادها از اقیانوس اطلس شمالی به سمت غرب، به روی شمال قاره آفریقا و دریای مدیترانه جابه‌جا می‌شوند. با توجه به اینکه در فصل بهار تقریباً قاره‌ها سریع‌تر از اقیانوس‌ها گرم‌تر می‌شوند، بنابراین شرایط لازم برای فراوانی رخداد‌های PV در الگوی بهار می‌تواند نشان‌دهنده شروع بارش‌های تندی (رعد و برقی) و ناپایداری‌های جوی ناگهانی باشد که همسو با مطالعات دی‌وریس و همکاران (۲۰۱۸) است.

با بررسی شکست AWB در الگوی فصل بهار (شکل ۹، الف)، مشاهده می‌شود که هسته فراوانی قابل توجهی در مرکز آسیا شکل گرفته است. یکی از دلایل اصلی تشکیل این ناهنجاری PV می‌تواند ناشی از ناهم‌واری‌های این منطقه که منجر به تغییرات در مراکز فشار و دما و رطوبت در این فصل است شکل بگیرد که مطالعات دیگران این را نیز تأیید می‌کند (مارتیوس و همکاران، ۲۰۱۰). این ناهنجاری نسبت به الگوی زمستان تقویت شده است. فراوانی بالای ۲ درصد به طور کامل شمال غرب و شمال شرق ایران را پوشش داده است (شکل ۳). فراوانی ناهنجاری‌های PV شکل گرفته در این فصل همراه با تغییر فصل و به دنبال آن تغییر در دما و مراکز فشار سطح زمین ایجاد می‌شود.

فراوانی رخداد‌های CWB در الگوی فصل بهار بالاترین مقادیر فراوانی نسبی را به خود اختصاص داده است (بالای ۵ درصد). هسته فراوانی رخدادها در این نوع شکست (CWB)، به طور کامل بالای جو شمال غرب ایران و دریای خزر را پوشش می‌دهد. این هسته فراوانی با جهت جنوب غربی شمال شرقی به حداکثر رخداد خود در شمال دریای خزر می‌رسد. مکانیزم این نوع شکست به همراه تغییرات دینامیکی که در سطوح بالای جو ایجاد می‌کند نشان‌دهنده شروع بارش‌های تندی (رعد و برقی) و ناپایداری‌های شدید جوی در شمال غرب ایران است (رفعتی و صادقی‌نیا، ۱۴۰۲). در این فصل که شرایط ناپایداری جوی در ارتباط با افزایش دمای سطح زمین، دسترسی به منابع رطوبتی و ناهم‌واری‌های خاص منطقه ایجاد می‌شود، شرایط همرفتی شدیدی به همراه ابرهای باران‌زا و طوفان‌های تندی شکل گرفته و دمای نهان سطوح پایین، شکست‌های سیکلونی بالای جو را تقویت کرده و ناهنجاری‌های PV را به سطوح پایین عمق می‌بخشند. این مکانیزم موجب همرفت شدید و بارش‌های شدید

منطقه را ایجاد می‌کنند. در واقع شکست‌های سیکلونی در فصل‌های مرطوب سال نقش مهمی در تأمین منابع آبی منطقه ایفا می‌کند (هاسکینز و کارولی، ۱۹۸۱).

در این الگو، شرایط دررو (دیاباتیک) با تقویت پشته‌های قوی همراه با گرادیان نصف‌النهاری، PV سمت قطب را تقویت می‌کند. هنگامی که شکست رخ می‌دهد، جریان قوی‌تر منجر به فرا رفت بیشتر هوا با PV مثبت زیاد به درون استریم PV می‌شود (استولینگا و همکاران، ۲۰۰۳). هسته رودباد قوی‌تر، فرارفت عمیق‌تری از هوا با PV بالا را به سمت استوا افزایش می‌دهد (گرمز و همکاران ۲۰۱۱). به‌طور کلی در الگوی فصل بهار، شکست‌های امواج راسبی (AWB و CWB)، خصوصاً شکست CWB بیشترین فراوانی در رخداد بارش‌های شدید در شمال غرب ایران را دارند و باتوجه‌به اینکه بیشترین رخداد بارش‌های شدید در این فصل انتقال می‌افتد، بنابراین شکست امواج راسبی می‌تواند نقش مهمی در این رخدادها داشته باشد. داده‌های آماری میزان بارش (شکل ۳)، نشان می‌دهد که بیشترین دوره بارش در ماه‌های فروردین و اردیبهشت (آوریل و می) اتفاق می‌افتد.



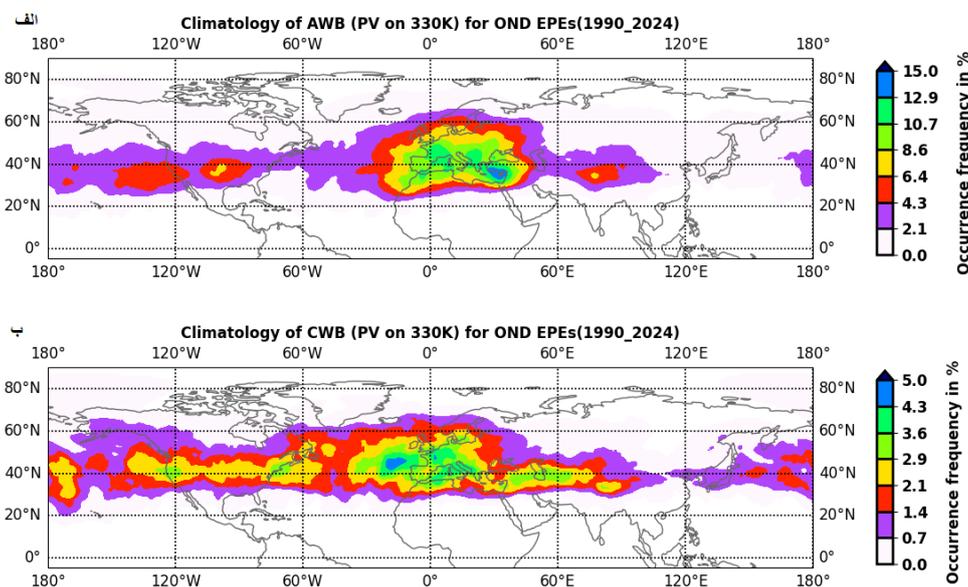
شکل ۹. الگوی شکست فصل بهار (فروردین، اردیبهشت و خرداد)؛ شکست امواج راسبی (CWB و AWB) روی هم‌دمای پتانسیلی 330K، برای دوره رخداد‌های بارشی شدید شمال غرب ایران (۱۹۹۰-۲۰۲۴).

الگوی شکست فصل پاییز

در این الگو هسته فراوانی رخداد‌های شکست روی دریای مدیترانه تشکیل شده است. این الگو نشان می‌دهد که شکست امواج راسبی (AWB و CWB) نقش مهمی در تشکیل و تقویت سامانه‌های بارشی شمال غرب ایران در فصل پاییز دارد که با تقویت سینوپتیکی و دینامیکی انتقال رطوبت به سمت غرب و سطوح بالای جو انجام می‌گیرد. فراوانی رخداد شکست AWB (شکل ۱۰، الف) روی دریای مدیترانه و حداکثر آن در شرق دریای مدیترانه و جنوب کشور ترکیه شکل گرفته است. منطقه شمال غرب ایران فراوانی نسبی بالای ۶ درصد از رخدادها را به خود اختصاص داده است. در این فصل، باتوجه‌به مکانیزم شکست AWB، رطوبت از طریق دسترسی به دریای مدیترانه و دریای سیاه در ارتباط با تأثیرات دینامیکی و سینوپتیکی شکست AWB، رخداد بارش‌های شدید شمال غرب ایران را تقویت و ایجاد می‌کنند (شکل ۱۰، الف).

هسته فراوانی شکست CWB (شکل ۱۰، ب)، در اقیانوس اطلس شمالی قرار دارد. باتوجه‌به مکانیزم این نوع شکست رطوبت از اقیانوس اطلس شمالی و دریای مدیترانه، همراه با امواج راسبی، رودخانه‌های اتمسفری و جریان‌ات رودها به سمت غرب و شمال غرب ایران شارش می‌کنند. فراوانی رخدادها در شمال غرب ایران در این شکست به ۱٫۵ درصد می‌رسد. اگرچه در این

الگو فراوانی نسبت رخداد‌های شکست CWB نسبت به فراوانی رخداد AWB کمتر است؛ ولی هر دو نوع شکست با همراهی هم، ناهنجاری‌های بارشی شدید در شمال غرب ایران را تقویت و ایجاد می‌کنند.



شکل ۱۰. الگوی شکست فصل پاییز (مهر، آبان و آذر)؛ شکست امواج راسبی (AWB) و CWB روی هم‌دمای پتانسیلی 330K، برای دوره رخداد‌های بارشی شدید شمال غرب ایران (۲۰۲۴ - ۱۹۹۰).

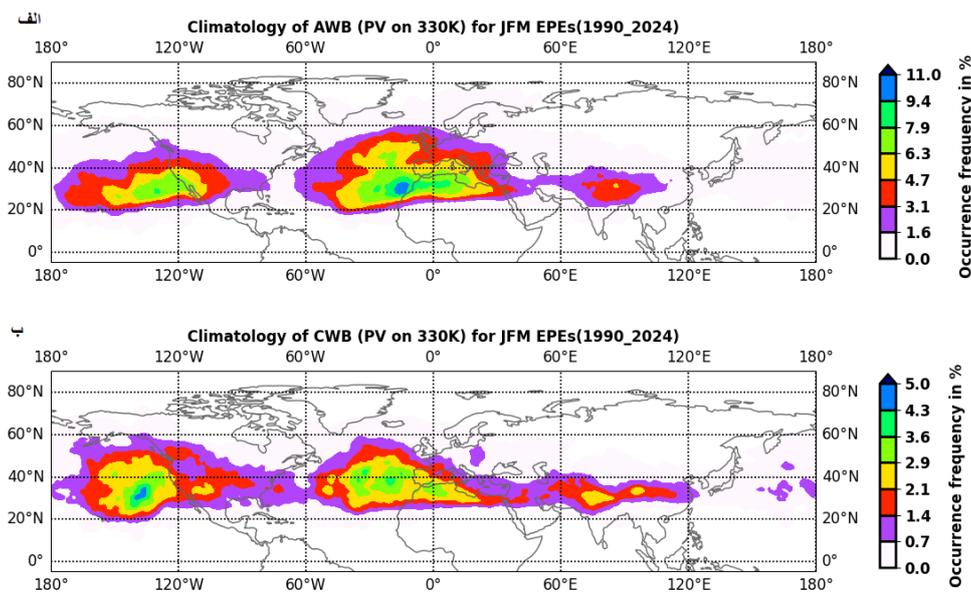
الگوی شکست فصل زمستان

باتوجه به اینکه شکست امواج راسبی به‌طور کلی برهم‌کنش بین جو زمین و پدیده‌های جوی وابسته به آن است. در این فصل با نفوذ جریان‌های عرض‌های بالا و همچنین نفوذ رودبادهای جنب قطبی به سمت عرض‌های پایین، منجر به تقابل جریان‌ها و شکل‌گیری جبهه‌های گرم و سرد و ناهنجاری‌هایی PV بالا شده و بارش‌های شدید زمستانی قاره‌ها را ایجاد می‌کند. چنان‌که در این فصل نیمکره شمالی کمترین دمای سالانه خود را دارد، اقیانوس‌ها با گرما و رطوبت بالای خود ناهنجاری‌های PV مثبت و شکست امواج راسبی را تقویت می‌کنند. امواج راسبی با شکست و انتشار موجی خود جریان‌های جوی لایه‌های پایین را به سمت شرق هدایت می‌کنند که در واقع در آخرین چرخه حیات خود که کامل‌ترین مرحله تکامل سیکلون‌زایی خود است به سمت غرب کشور ایران نفوذ کرده و بارش‌های فصل زمستان را ایجاد می‌کنند (پین، ۲۰۱۴).

حداکثر فراوانی الگوی زمستانی شکست با شکل‌گیری در سمت غرب قاره‌ها و شرقی اقیانوس‌ها به سمت شرق کشیده شده و تضعیف می‌شوند (شکل ۱۱، الف). هسته ناهنجاری PV قوی در عرض ۳۰ درجه شمالی و تقریباً ۱۵ درجه طول غربی روی شمال غربی قاره آفریقا و غرب اقیانوس اطلس شمالی تشکیل شده است. با جابه‌جایی‌های ناهنجاری PV به سمت شرق در این فصل رطوبت و دمای ناگهانی را ایجاد می‌کنند. تقریباً ناهنجاری‌های شدید PV، جنوب غرب، نیمه شمالی و شمال شرق ایران را فراگرفته و با ناهنجاری‌های شکل‌گرفته در هیمالیا ارتباط پیدا می‌کند که فراوانی ناهنجاری PV در حدود ۳ درصد است. در فصل زمستان جبهه‌های سرد و گرم و همچنین رودبادهای قوی در منطقه حاکم هستند و می‌توانند PV را تقویت کنند. مقادیر بالای PV به شکل‌گیری ناپایداری‌های جوی کمک کرده و در نتیجه منجر به رخداد بارش‌های شدید شمال غرب ایران می‌شوند.

بیشترین فراوانی شکست CWB در الگوی زمستان (شکل ۱۲، ب)، مربوط به مرکز و غرب اقیانوس اطلس شمالی و شمال قاره آفریقا در حدود ۳۰ تا ۴۵ درجه شمالی، مقادیر بالای ۴ درصد فراوانی‌های این شکست را به خود اختصاص داده است. از

هسته فراوانی نواری به سمت غرب ایران امتداد یافته است و فراوانی بالای ۳ درصد از مناطقی از شمال غرب و کل ایران را فراگرفته است. با وجود حداقل فراوانی نسبت به الگوی بهار و پاییز، فراگیر بودن آنها قابل چشمگیر است و جریان‌های جوی که در این فصل غالباً از سمت غرب وارد کشور می‌شوند را تحت تأثیر قرار داده و می‌توانند با انتقال رطوبت و ایجاد ناپایداری، منجر به بارش‌های فراگیر و گسترده در ایران شوند. این تغییرات دینامیکی در دوره‌های خاص، شرایط لازم برای رخداد بارش‌های شدید زمستانی شمال غرب کشور را فراهم می‌آورند.



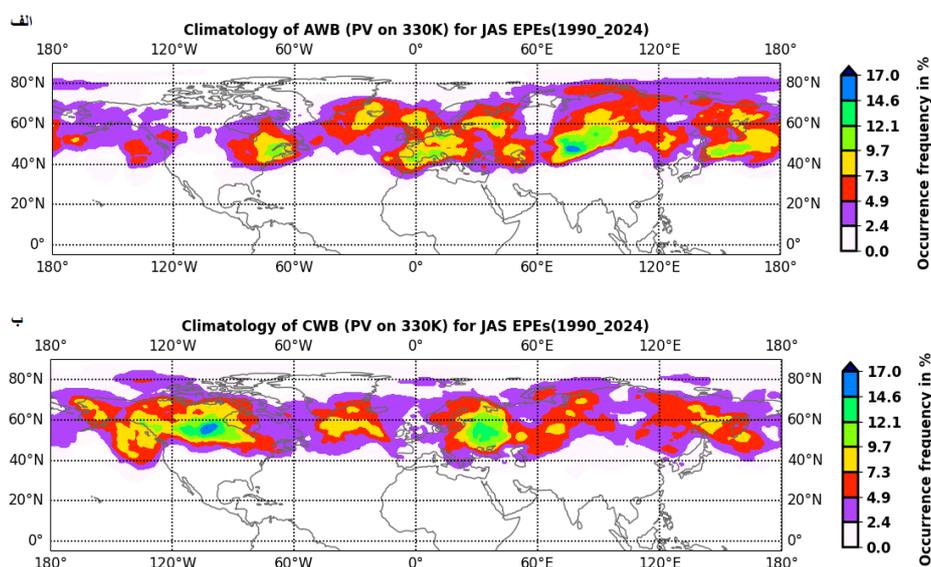
شکل ۱۱. الگوی شکست فصل زمستان (ژانویه، فوریه و مارس)؛ شکست امواج راسبی (AWB و CWB) روی هم‌دمای پتانسیلی 330K، برای دوره رخدادهای بارشی شدید شمال غرب ایران (۱۹۹۰-۲۰۲۴).

الگوی شکست تابستان

شکست امواج راسبی در الگوی تابستان، به عرض‌های ۴۰ تا ۸۰ درجه شمالی جابه‌جا می‌شوند (شکل ۱۲). رخداد فراوانی‌ها در شکست AWB، بیانگر یک هسته فراوانی از رخدادهای بر روی کشور قزاقستان است. هسته دیگری در شمال غربی دریای مدیترانه و جنوب اروپا شکل می‌گیرد. هسته ثانویه‌ای در نیمه شمالی دریای خزر با فراوانی ۵ درصد نوار شمالی کوه‌های البرز و نواحی از شمال غرب ایران را فرامی‌گیرد. باتوجه به اینکه این الگو از تعداد کمتری از سامانه‌های بارشی تابستانی (به دلیل رخداد بارش‌های شدید کمتر در این فصل) شکل گرفته است، مشاهده می‌شود که شکست AWB، با عمیق‌شدن به سطوح پایین تروپوسفر و با دسترسی به رطوبت دریای خزر و دریای سیاه می‌تواند بر بارش‌های تابستانی تأثیر بگذارد و رخدادهای حدی از جمله بارش‌های شدید را ایجاد و تقویت کند.

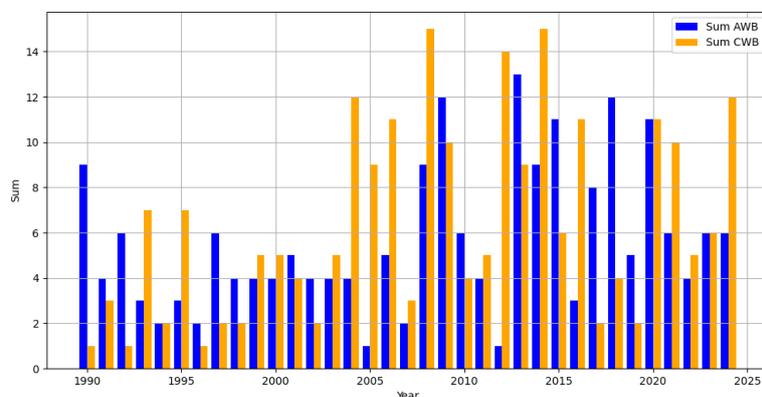
هسته‌ای فراوانی شکست CWB، روی کشور اوکراین و شمال دریای سیاه شکل گرفته است و فراوانی از آن بر بالای ایران دیده نمی‌شود. تنها در بخش کوچکی از نواحی شمال غرب ایران، فراوانی ۵ درصد تشکیل شده که در صورت تقویت و نفوذ به عرض‌های پایین‌تر موجب بارش‌های شدید رگباری تابستانی می‌شود. تأثیر دینامیکی شکست سیکلونی موجب انتقال رطوبت از دریای سیاه به منطقه شمال غرب کشور می‌شود. باتوجه به اینکه در این فصل کمربند همگرایی حاره‌ای (ITCZ) و مراکز پرفشار جنب‌حاره‌ای به عرض‌های بالاتر جابه‌جا و تضعیف می‌شوند، فعالیت PV و شکل‌گیری و نفوذ استریم‌های PV در عرض‌های میانی کمتر می‌شود. همچنین موقعیت پشته پرفشار بر روی ایران در این فصل در ترازهای میانی جو از ثبات و تمرکز خاصی

برخوردار است، (قائمى و همکاران، ۱۳۹۶)، انتظار می‌رود که مانع مهمی برای فعالیت شکست امواج راسبی در سطوح بالایی جو در ایران باشد ولی با این وجود شکست‌های امواج راسبی حتی در تابستان هم می‌توانند نقش مهمی در رخداد‌های بارش‌های شدید منطقه شمال غرب ایران داشته باشند.



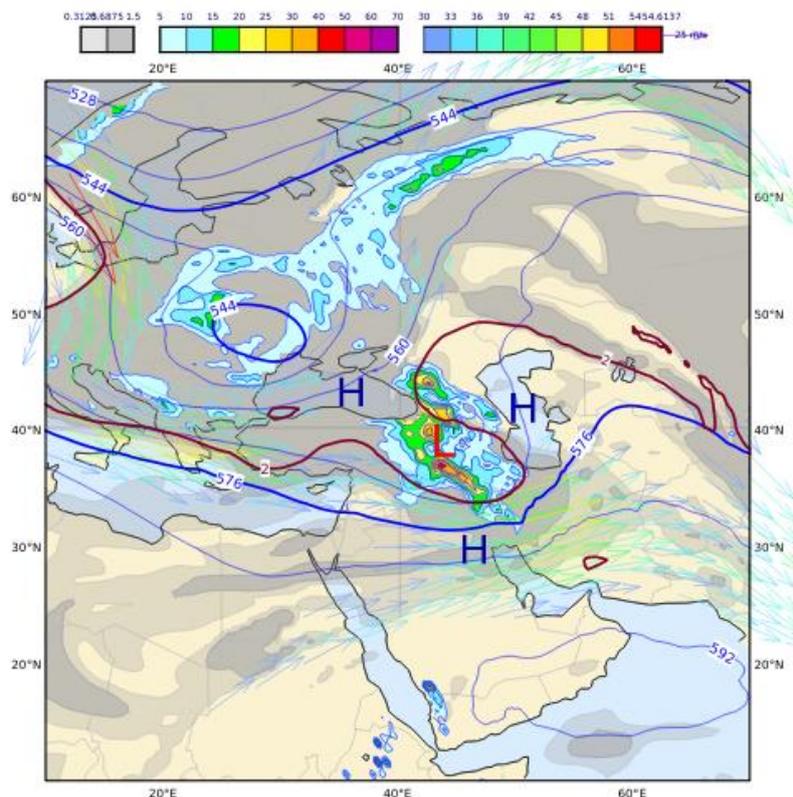
شکل ۱۲. الگوی شکست فصل تابستان (تیر، مرداد و شهریور)؛ شکست امواج راسبی (AWB و CWB) روی هم‌دمای پتانسیلی 330K، برای دوره رخداد‌های بارشی شدید شمال غرب ایران (۱۹۹۰-۲۰۲۴).

شکل ۱۳ نمودار مجموع سالانه رخداد‌های شکست امواج AWB و CWB، طی دوره آماری بارش‌های شدید ۱۹۹۰-۲۰۲۴، نشان می‌دهند که فراوانی رخداد‌های AWB و CWB از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ افزایش یافته است. تغییرات اقلیمی که نتیجه گرمایش جهانی است، موجب تغییرات دینامیکی و سینوپتیکی شده و رخداد‌های شکست امواج راسبی و بارش‌های شدید و ناگهانی را در دهه‌های اخیر افزایش داده است (IPCC, 2021). با توجه به فراوانی رخداد شکست CWB نسبت به AWB، نشان می‌دهد که بارش‌های شدید و رگباری در دهه‌های اخیر، با توجه به مکانیزم تأثیر شکست CWB بر بارش‌های همرفتی، طوفان‌های تندی شدید همراه با رعدوبرق نیز افزایش یافته است (شکل ۱۳). تحقیقات نشان می‌دهد که طی گرمایش جهانی، شدت طوفان‌ها و پدیده‌های جوی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این طوفان‌ها می‌توانند نیروی اضافی به امواج وارد کنند و موجب شکست بیشتر آنها شوند، (IPCC, 2021). مطالعات رفعتی و صادقی (۱۴۰۲)، در ارتباط با رخداد‌های آذرخش و روند تغییرات آن در دهه‌های اخیر این موضوع را تأیید می‌کند.



شکل ۱۳: نمودار مجموع سالانه رخداد‌های شکست امواج AWB و CWB، برای شمال غرب ایران، دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۴.

نقشه‌های سینوپتیکی نقش بسیار مهمی در تحلیل پدیده‌های جوی دارند. شکل ۱۴ مطالعه موردی شرایط سینوپتیکی شمال غرب ایران در ششم می ۲۰۲۰ (۱۶ اردیبهشت ۱۳۹۹) را نشان می‌دهد. موقعیت شکست CWB شناسایی شده، بارش شدید شمال غرب ایران را ایجاد کرده است. استریم PV شناسایی شده با منحنی میزان 2PVU (خط قهوه‌ای‌رنگ) در سطح هم‌دمای پتانسیلی 330K قرار دارد. شکست سیکلونی (CWB)، هم‌سو با منحنی‌های هم‌ارتفاع تراز ۵۰۰ ژئو پتانسیلی (hPa)، موجب صعود رطوبت و بارش‌های شدید در منطقه شمال غرب ایران شده است. مرکز کم‌ارتفاع ۵۴۴ ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ ژئو پتانسیلی، بالای اوکراین شکل گرفته که ناوهای از آن به سمت شمال غرب ایران کشیده شده است. موقعیت و قرارگیری رودباد تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال در جنوب منطقه مورد مطالعه، نقش دینامیکی مهمی در همراهی با شکست امواج راسبی در شکل‌گیری این سامانه بارشی ایفا می‌کند. مجموع بخار ستون آب (kg m^{-2}) (سایه‌رنگ خاکستری)، نشان می‌دهد که بخار آب از سطح زمین تا بالای جو در منطقه وجود دارد و شرایط رخداد بارش شدید را مهیا کرده است. مرکز کم‌فشار ۷۴۰ هکتوپاسکال و مراکز پرفشار سطح زمین با فشارهای ۱۰۱۱، ۱۰۱۲، ۱۰۱۰ و ۱۰۰۵ هکتوپاسکال به ترتیب روی دریای سیاه، مدیترانه، خلیج فارس و دریای خزر شکل گرفته است، همچنین مجموع بارش روزانه با طیف رنگی مشخص شده است. به‌طور کلی بررسی شرایط سینوپتیکی رخداد بارش‌ها، می‌تواند به درک بهتری از شناخت شرایط پیچیده جوی این پدیده‌ها از جمله شکست امواج راسبی کمک کند.



شکل ۱۴: نقشه ترکیبی، ششم می ۲۰۲۰ (۱۶ اردیبهشت ۱۳۹۹): موقعیت و قرارگیری شکست امواج راسبی سیکلونی (CWB)، با منحنی 2PVU ($\text{K m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)، روی هم‌دمای پتانسیلی 330K (منحنی قرمز رنگ); رودباد تراز ۲۵۰ (ms^{-1}) هکتوپاسکال (بیگان‌های رنگی); مجموع ستون بخار آب (kg m^{-2}) (خاکستری); ارتفاع ۵۰۰ ژئو پتانسیلی (hPa) (خطوط منحنی هم‌میزان آبی‌رنگ); مرکز کم‌فشار سطح زمین (Pa) (L); مراکز پرفشار سطح زمین (Pa) (H); مجموع بارش روزانه (طیف رنگی).

بحث و نتیجه‌گیری

فرضیه این مطالعه که شکست امواج راسبی شرایط سینوپتیکی و دینامیکی اصلی برای وقوع EPEs در شمال غرب ایران فراهم می‌کند، شکل گرفت. این فرضیه از طریق یک بررسی سامان‌مند با استفاده از رخدادهای EPEs و استریم‌های PV، شکست امواج راسبی را مورد بررسی قرار داد. رخدادهای بارشی شدید شمال غرب ایران و ارتباط آن با شکست امواج راسبی، برای دوره آماری ۲۰۲۴-۱۹۹۰، مورد بررسی قرار گرفت؛ ابتدا با استفاده از داده‌های بارشی ایستگاه‌های سینوپتیکی شمال غرب کشور، تعداد ۲۷۵ سامانه بارشی شدید برای منطقه مورد شناسایی قرار گرفت. جهت شناسایی امواج راسبی، مقدار ۲ واحد PV (2PVU) روی سطوح هم‌دمای پتانسیلی 330K مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین و طبقه‌بندی شکست‌ها از شاخص تشخیص استریم که توسط ورنلی و اسپرنگر (۲۰۱۷) توسعه‌یافته است استفاده شد. بعد از تشخیص و طبقه‌بندی شکست امواج، فراوانی رخدادهای محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل سینوپتیکی و اقلیمی قرار گرفتند. با بررسی و تحلیل نقشه‌های شکست امواج راسبی، چهار الگوی شکست امواج راسبی بر اساس فصل‌ها شناسایی شدند؛ الگوی شکست فصل بهار، پاییز، زمستان و تابستان.

در الگوی شکست فصل بهار شکست AWB، هسته فراوانی قابل توجهی در مرکز آسیا شکل می‌گیرد. فراوانی بالای ۲ درصد از کل رخدادهای، به طور کامل شمال غرب و شمال شرق ایران را پوشش داده است. الگوی فصل بهار مهم‌ترین الگوی فراوانی رخداد استریم‌های CWB است و بالاترین مقادیر فراوانی را به خود اختصاص می‌دهند. هسته فراوانی در این الگو به طور کامل شمال غرب ایران و دریای خزر را پوشش داده است و مهم‌ترین نقش را در شکست امواج و رخداد بارش‌های شدید شمال غرب ایران ایفا می‌کند (شکل ۹). در الگوی فصل پاییز حداکثر فراوانی برای شکست AWB، رخ می‌دهد. هسته فراوانی‌ها روی دریای مدیترانه و جنوب کشور ترکیه شکل گرفته است. با توجه به مکانیزم شکست AWB و تأثیرات دینامیکی آن، سامانه‌های بارشی شدید شمال غرب ایران را در این فصل تقویت و ایجاد می‌کنند، در الگوی فصل پاییز فراوانی رخدادهای شکست CWB نسبت به فراوانی AWB کمتر است، ولی هر دو نوع شکست ناهنجاری‌های بارشی شدید شمال غرب ایران را تقویت و ایجاد می‌کنند (شکل ۱۰). در الگوی شکست حاکم در فصل زمستان، هسته ناهنجاری قوی در ۳۰ درجه عرض شمالی و تقریباً ۱۵ درجه طول غربی در شمال غربی قاره آفریقا و غرب اقیانوس اطلس شمالی تشکیل شده است. فراوانی شکست CWB مناطقی از شمال غرب و کل ایران را فراگرفته است. با وجود فراوانی کمتر CWB، فراگیر بودن آنها قابل چشمگیر است و جریان‌های جوی که از غرب وارد کشور می‌شوند را تحت‌تأثیر قرار داده و بارش‌های فراگیر و گسترده در ایران را ایجاد می‌کنند (شکل ۱۰). در الگوی تابستان شکست امواج به بالای ۴۰ تا ۸۰ درجه عرض شمالی جابه‌جا می‌شود. فراوانی‌های شکست AWB، هسته ثانویه‌ای در نیمه شمالی دریای خزر شکل داده و نوار شمالی کوه‌های البرز و نواحی از شمال غرب ایران را فرا می‌گیرد. فراوانی شکست CWB، روی کشور اوکراین و شمال دریای سیاه است و فراوانی بر بالای ایران دیده نمی‌شود (شکل ۱۲). با این وجود می‌تواند نقش مهمی در شکل‌گیری رخدادهای بارش‌های شدید منطقه شمال غرب ایران داشته باشند.

ناهمواری‌های شمال غرب ایران در رخداد بارش‌های شدید و ناهنجاری‌های PV نقش مهمی دارند، بخصوص در فصل بهار با ایجاد همرفت شدید، حداکثر رخدادهای بارش و شکست را در این فصل ایجاد می‌کنند که همسو با مطالعات پژوهشگران می‌باشد (کیانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ گرامی و همکاران، ۱۴۰۱؛ سلیقه و همکاران، ۱۳۹۷؛ رفعتی و همکاران، ۱۳۹۳؛ مارتیوس و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین با گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر، رخدادهای بارشی شدید شمال غرب ایران همراه با رخدادهای شکست امواج راسبی افزایش یافته است که می‌توان در نمودار فراوانی سری زمانی رخدادهای طی دوره آماری ۲۰۲۴-۱۹۹۰ مشاهده کرد (شکل ۱۳). رخدادهای حدی دما و بارش‌ها در دهه‌های اخیر بر شکست امواج راسبی تأثیر گذاشته و موجب ناهنجاری‌های آن شده است که با بررسی پژوهشگران هم‌سو است، (IPCC, 2021).

بیشترین فراوانی رخدادهای شکست امواج راسبی، در عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۵ درجه عرض شمالی اتفاق می‌افتد (شکل ۷، محدوده آبی کم‌رنگ). باتوجه‌به اینکه منطقه شمال غرب ایران در این عرض جغرافیایی قرار دارد، بنابراین رخدادهای شکست

امواج راسبی نقش مهمی را در ایجاد و تقویت رخدادهای بارشی شدید این منطقه ایفا می‌کند. همچنین منطقه مورد مطالعه در شرق سوی هسته و کانون اصلی رخدادهایی که موجب بیشترین شکست در نیمکره شمالی است (غرب اقیانوس اطلس شمالی و روی دریای مدیترانه) شکل می‌گیرد، و بیشترین فراوانی شکست CWB را بعد از روند کاهشی شدید AWB ایجاد می‌کند (شکل ۸).

منابع

- برهانی، رضایی، احمد گیوی، فرهنگ، قادر، سرمد، محب الحجه، علیرضا (۱۳۹۷). «مطالعه فراوانی و توزیع تاشدگی وردایست و تغییرات فصلی آن در سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۵ با تأکید بر منطقه جنوب غرب آسیا». *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۴(۳)، ۶۲۴-۶۰۷.
- جهانبخش اصل، سعید؛ ساری صراف، بهروز؛ عساکره، حسین و شیرمحمدی، سهیلا (۱۴۰۱). شناسایی رخدادهای بارش فرین در غرب ایران (۲۰۱۶-۱۹۶۵)، *نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۶(۷۹)، ۱۱۵-۱۲۵.
- جهانبخش، سعید؛ محمد خورشید دوست، علی و میرهاشمی، حمید (۱۳۹۹). «بررسی چرخندزایی در بادپناه کوهستان زاگرس». *نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۴(۷۲)، ۱۰۵-۱۲۸.
- حجازی زاده، زهرا؛ حلبیان، امیرحسین؛ کربلایی درئی، علیرضا و طولابی نژاد، میثم (۱۳۹۹). واکاوی تغییرات مقادیر حدی بارش در گستره‌ی ایران زمین. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۹(۲۳)، ۱۳۵-۱۵۰.
- خان سالاری، سکینه؛ محب الحجه، علیرضا و فرهنگ احمدی، گیوی (۱۳۹۷). «عوامل دینامیکی مؤثر بر بارش سنگین برف در تهران». *فیزیک زمین و فضا*، ۴۴(۱)، ۱۷۹-۱۹۸.
- خدادی، محمدمهدی؛ آزادی، مجید؛ مرادی، محمد و سعادت‌آبادی، عباس رنجبر (۱۳۹۹). «مقایسه شکست امواج راسبی روی اروپا و غرب آسیا از دیدگاه فعالیت موج». *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۴(۲)، ۸۳-۱۰۱.
- ذوالفقاری، حسن؛ هاشمی، رضا و فشی، مهدی (۱۳۸۸). بررسی نسبت حداکثر بارش‌های روزانه به بارش‌های سالانه در ایران. *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۴(۱۹۲)، ۱۶۵-۱۸۸.
- رفعتی، سمیه و صادقی‌نیا، علیرضا (۱۴۰۲). «پراکنش فضایی و زمانی رخداد آذرخش و روند تغییر آن». *مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۴(۵۳)، ۱۲۰-۱۰۳.
- رفعتی، سمیه؛ حجازی‌زاده، زهرا و کریمی، م. (۱۳۹۳). تحلیل هم‌مدیدی شرایط رخداد سامانه‌های همرفتی با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر در جنوب غرب ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)*، ۴۶(۲)، ۱۳۷-۱۵۶.
- سعادت‌آبادی، عباس رنجبر (۱۳۹۴). «بررسی تاوایی پتانسیلی روی سطوح هم‌دمای پتانسیلی به کمک یک مدل عددی و ارتباط آن با بارش بر روی ایران». *مجله علمی و ترویجی نیوار*، ۳۹(۸۸)، ۳۰-۲۳.
- سلیقه؛ محمد؛ ناصرزاده، محمدحسین و غفاری، علی (۱۳۹۷). بررسی بارش‌های همرفتی بهاری شمال غرب ایران با استفاده از شاخص‌های ناپایداری (مطالعه موردی ایستگاه تبریز). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۲(۶۴)، ۱۴۷-۱۲۹.
- عسگری، احمد؛ رحیم‌زاده، فاطمه؛ محمدیان، نوشین و فتاحی، ابراهیم (۱۳۸۶). تحلیل روند نمایه‌های بارش‌های حدی در ایران. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۳(۳) (پیاپی ۹)، ۴۲-۵۵.
- قائم، هوشنگ؛ عساکره، حسین و مختار فتاحیان (۱۳۹۶). «تحلیل الگوی فضایی پشته پرفشار جنب حاره بر روی ایران». *اندیشه جغرافیا*، ۸(۱۶)، ۲۱-۱.

- کیانی، مهرداد؛ لشکری، حسن و قائمی، هوشنگ (۱۳۹۸). واکاوی اثر رشته کوه‌های زاگرس بر تغییرات بارش‌های سودانی در غرب ایران. *مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان*، ۳۰(۳ش ۷۵)، ۱۷-۴۰.
- گرامی، محمد صالح؛ کریمی، مصطفی؛ عزیزی، قاسم و رفعتی، سمیه (۱۴۰۱). تحلیل هم‌دیدگی بارش‌های همراه با طوفان تندرگی فراگیر بهاره در شمال غرب ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴(۱): ۹۵-۱۱۰.
- محمد خورشید دوست، علی؛ مفیدی، عباس و آذرم، کامل (۱۳۹۵). «تحلیل هم‌دیدگی سازوکار وقوع بارش‌های سنگین بهاره در شمال غرب ایران». *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۵(۲)، ۸۲-۵۳.
- محمدی، بختیار (۱۳۹۲). تحلیل روند سالانه آستانه بارش‌های سنگین ایران. *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۸(۱(پیاپی ۱۰۸))، ۱۶۳-۱۷۶.
- محمدی، حسین؛ عزیزی، قاسم؛ خوش اخلاق، فرامرز و رنجبر، فیروز (۱۳۹۶). تحلیل روند شاخص‌های حدی بارش روزانه در ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)*، ۴۹(۱)، ۲۱-۳۷.
- محمدی، حسین؛ فتاحی، ابراهیم؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر و اکبری، مهری (۱۳۹۱). «تحلیل دینامیکی سامانه‌های سودانی و رخداد بارش‌های سنگین در جنوب غرب ایران». *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۲(۲۴)، ۲۴-۷.
- مرادی، محمد؛ مشکواتی، امیرحسین؛ آزادی، مجید و علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی (۱۳۸۷). «نقش تاوایی پتانسیلی هم‌ارز و تر در مسیریابی سامانه‌های سودانی». *مجله علمی و ترویجی نیوار*، ۲(۶۸)، ۵۴-۳۴.
- مظفری، غلامعلی؛ مزیدی، احمد و شفیعی، شهاب (۱۳۹۶). بررسی و تعیین آستانه بارش‌های حدی غرب ایران با استفاده از روش توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۴(۲)، ۱۰۷-۱۲۵.

References

- Aregger, M. P. (2021). Stationary and slow-moving convection over Switzerland: a 14-year radar-based climatology.
- Ashley, S. T., & Ashley, W. S. (2008). Flood fatalities in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 805–818. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1611.1>
- Barnes, E. A., & Hartmann, D. L. (2012). Detection of Rossby wave breaking and its response to shifts of the midlatitude jet with climate change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D09117.
- Barnes, M. A., King, M., Reeder, M., & Jakob, C. (2023). The dynamics of slow-moving coherent cyclonic potential vorticity anomalies and their links to heavy rainfall over the eastern seaboard of Australia. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(755), 2233-2251.
- Barros, A. P., Chiao, S., Lang, T. J., Burbank, D., & Putkonen, J. (2006). From weather to climate—Seasonal and interannual variability of storms and implications for erosion processes in the Himalaya.
- De Vries, A. J., Armon, M., Klingmüller, K., Portmann, R., Röthlisberger, M., & Domeisen, D. I. (2024). Breaking Rossby waves drive extreme precipitation in the world's arid regions. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 493.
- Dikpati, M., & McIntosh, S. W. (2020). Space weather challenge and forecasting implications of Rossby waves. *Space Weather*, 18(3), e2018SW002109.
- Ertel, H. (1942). Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteorologische Zeitschrift*, 59, 271–281.
- Glatt, I., Dornbrack, A., Jones, S., Keller, J., Martius, O., Müller, A.,... & Wirth, V. (2011). Utility of Hovmöller diagrams to diagnose Rossby wave trains. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63(5), 991-1006.

- Grams, C. M., Wernli, H., Böttcher, M., Čampa, J., Corsmeier, U., Jones, S. C.,... & Wiegand, L. (2011). The key role of diabatic processes in modifying the upper-tropospheric wave guide: a North Atlantic case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(661), 2174-2193.
- Holton, J. R., & Hakim, G. J. (2013). *An introduction to dynamic meteorology* (Vol. 88). Academic Press.
- Hoskins, B. J., & McIntyre, M. E., & Robertson, A. W. (1985). On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(470), 877-946. <https://doi.org/10.1002/qj.49711147002>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jongman, B., Ward, P. J., & Aerts, J. C. (2012). Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Change*, 22(4), 823-835.
- Kaderli, S. (2022). Coding of a Rossby wave breaking detection algorithm in Python. University of Bern, Faculty of Science. Institute of Geography and Oeschger Centre for Climate Change Research.
- Kuo, Y. H., et al. (2012). Impact of potential temperature streamers on heavy rainfall. *Journal of Meteorological Research*.
- Lenggenhager, S., & Martius, O. (2019). Atmospheric blocks modulate the odds of heavy precipitation events in Europe. *Climate Dynamics*, in press. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04779-0>
- Liu, B., Chen, X., Chen, J., & Chen, X. (2017). Impacts of different threshold definition methods on analyzing temporal-spatial features of extreme precipitation in the Pearl River Basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31, 1241-1252.
- Martius, O., et al. (2010). The role of upper-level dynamics and surface processes for the genesis of severe cyclones: An example from the eastern Alps. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(5), 543-555.
- McIntyre, M. E., & Palmer, T. N. (1983). Breaking planetary waves in the stratosphere. *Nature*, 305(5935), 593-600.
- Moore, B. J. (2017). *Rosby Wave Breaking and Widespread Extreme Precipitation Events in the Central and Eastern US*. State University of New York at Albany.
- Moore, B. J., White, A. B., & Gottas, D. J. (2021). Characteristics of long-duration heavy precipitation events along the West Coast of the United States. *Monthly Weather Review*, 149(7), 2255-2277.
- Peters, J. M., & Schumacher, R. S. (2015). Mechanisms for organization and echo training in a flash-flood-producing mesoscale convective system. *Monthly Weather Review*, 143(3), 1058-1085. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00070.1>.
- Rosby, C. G., Willett, H. C., Holmboe, J., Namias, J., Page, L., & Allen, R. (1939). Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the permanent centers of action. *Journal of Marine Research*, 2(1), 38-55.
- Schumacher, R. S. (2009). Mechanisms for quasi-stationary behavior in simulated heavy-rain-producing convective systems. *Journal of Atmospheric Sciences*, 66(6), 1543-1568.
- Shaffie, S., Mozaffari, G., & Khosravi, Y. (2019). Determination of extreme precipitation threshold and analysis of its effective patterns (case study: west of Iran). *Natural Hazards*, 99, 857-878.
- Simmons, A. J., et al. (2010). A systematic evaluation of the impact of data assimilation on prediction skill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Soci, C., Hersbach, H., Simmons, A., Poli, P., Bell, B., Berrisford, P., ... & Thépaut, J. N. (2024). The

- ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Sprenger, M., Fragkoulidis, G., Binder, H., Croci-Maspoli, M., Graf, P., Grams, C. M., & Knippertz, P. (2017). Global Climatologies of Eulerian and Lagrangian Flow Features based on ERA-Interim. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1739–1748. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00299.1>
- Stoelinga, M. T., Hobbs, P. V., Mass, C. F., Locatelli, J. D., Colle, B. A., Houze, R. A., Jr., Rangno, A. L., Bond, N. A., Smull, B. F., Rasmussen, R. M., Thompson, G., & Colman, B. R. (2003). Improvement of Microphysical Parameterization through Observational Verification Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(12), 1807-1826. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-12-1807>
- Thorncroft, C. D., Hoskins, B. J., & McIntyre, M. E. (1993). Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 119, 17–55. <https://doi.org/10.1002/qj.49711950903>.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey* (Vol. 92). Elsevier.
- Wolf, G., Ferrett, S., Methven, J., Frame, T. H. A., Holloway, C. E., Martinez-Alvarado, O., & Woolnough, S. J. (2024). Comparison of probabilistic forecasts of extreme precipitation for a global and convection-permitting ensemble and hybrid statistical–dynamical method based on equatorial wave information. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(759), 877-896.