

## Investigating Rossby wave breaking in the Northern Hemisphere storm tracks during the period 1958–2023 using the distribution of potential temperature on the isosurfaces of potential vorticity

Motevalli-Taher, F. Z.<sup>1</sup>  | Mirzaei, M.<sup>1</sup>   | Mohebalhojeh, A. R.<sup>1</sup>  | Ahmadi-Givi, F.<sup>1</sup> 

1. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: [mirzaeim@ut.ac.ir](mailto:mirzaeim@ut.ac.ir)

(Received: 17 Sep 2025, Revised: 18 Oct 2025, Accepted: 30 Dec 2025, Published online: 30 May 2026)

### Summary

On isentropic surfaces, Rossby Wave Breaking (RWB) is characterized by the rapid and irreversible deformation of potential vorticity (PV) contours. Rossby waves are generated by the meridional PV gradient of the background flow and can be identified by their PV anomaly relative to that background flow. The present study is devoted to evaluating the distribution of RWB based on the method introduced by Pelly and Hoskins (2003; PH), known as the PV- $\theta$  method, and its associated index (BI), across the Northern Hemisphere storm tracks during the boreal wintertime over 65-year period from 1958 to 2023, using the JRA-55 reanalysis data with a horizontal resolution of  $1.25^\circ \times 1.25^\circ$  at 00 UTC. Two quantities, the Direction of Breaking (DB) and the Intensity of Breaking (RI), were employed to identify four distinct types of Anticyclonic and Cyclonic Rossby wave breaking: Anticyclonic breaking with warm air intrusion (ABW), Anticyclonic breaking with cold air intrusion (ABC), Cyclonic breaking with warm air intrusion (CBW), and Cyclonic breaking with cold air intrusion (CBC). First, to evaluate the application of the PH method in identifying the occurrence of various wave breaking types, the distribution of BI, DB, and RI, were compared with the distribution of Potential Vorticity (PV) on the 330-K isentropic surface and potential temperature ( $\theta$ ) on the PV isosurface with 2 PVU value, alongside geopotential height at the 500 hPa level and wind speed at the 200 hPa level, for three case studies. The first case study corresponds to March 8, 1959, the second to January 6, 2008, and the third to January 27, 2018. In the next step, the climatological distributions of various types of wave breaking using the above quantities (BI, DB, and RI) for the winter season were examined and analyzed during the study period. Finally, wave breaking was examined in terms of its intensity and categorized into strong, moderate, and weak classes.

The evaluation of the PH method performance indicates that the higher the RI value, the more overturning of  $\theta$  contours, and a stronger geopotential height gradient at the 500 hPa level. The climatological distribution of the results demonstrates the predominance of anticyclonic wave breaking events over the eastern Atlantic Ocean, Europe, western Asia, the eastern Pacific Ocean, and western North America. The frequency of ABW is higher than ABC in these regions. The highest frequency of CBW is observed over the eastern Pacific Ocean and western Asia, while the maximum frequency of cyclonic wave breaking events dominated by CBC is found over the western Atlantic Ocean and the western Pacific Ocean. The frequency of CBW event is higher in East Asia than in other regions, while CBC events are more frequent in the western Atlantic and Pacific Oceans. Furthermore, the frequency of strong wave breaking is higher than that of weak wave breaking across all longitudes, though marginally.

**Keywords:** Rossby wave brecking, cyclonic wave breaking, anticyclonic wave breaking, wave brecking index. potential vorticity.

Cite this article: Motevalli-Taher, F. Z., Mirzaei, M., Mohebalhojeh, A. R., & Ahmadi-Givi, F. (2026). Investigating Rossby wave breaking in the Northern Hemisphere storm tracks during the period 1958–2023 using the distribution of potential temperature on the isosurfaces of potential vorticity. *Journal of the Earth and Space Physics*, 52(1), 139-159. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.402301.1007723>

E-mail: (1) [fmotevalli@ut.ac.ir](mailto:fmotevalli@ut.ac.ir) | [amoheb@ut.ac.ir](mailto:amoheb@ut.ac.ir) | [ahmadig@ut.ac.ir](mailto:ahmadig@ut.ac.ir)



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.402301.1007723>

Print ISSN: 2538-371X  
Online ISSN: 2538-3906

# بررسی شکست موج راسبی در مسیرهای توفان نیمکره شمالی در دوره ۱۹۵۸-۲۰۲۳ بر مبنای توزیع دمای پتانسیلی روی سطوح هم‌مقدار تاوایی پتانسیلی

فاطمه زهرا متولی طاهر<sup>۱</sup> | محمد میرزایی<sup>۱</sup> ✉ | علیرضا محب‌الحجه<sup>۱</sup> | فرهنگ احمدی گیوی<sup>۱</sup>

۱. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [mirzaeim@ut.ac.ir](mailto:mirzaeim@ut.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۲۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۳/۹)

## چکیده

پژوهش حاضر اختصاص به ارزیابی توزیع شکست موج راسبی بر اساس روش معرفی‌شده توسط پلی وهاسکینز (PH) و شاخص همبسته با آن (BI) در مسیرهای توفان نیمکره شمالی برای فصل زمستان در دوره بلندمدت ۱۹۵۸-۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های JRA-55 دارد. برای این کار، ابتدا توزیع BI، جهت شکست (DB)، شدت شکست (RI)، تاوایی پتانسیلی (PV) بر روی تراز هم‌دمای پتانسیلی ۳۳۰ کلون،  $\theta$  بر روی سطح هم‌مقدار PV (دارای دو واحد PV) با وضعیت همدیدی در سه مورد مطالعاتی مقایسه شد. سپس، توزیع اقلیم‌شناختی انواع شکست موج BI، DB، و RI برای فصل زمستان مطالعه و تحلیل شد.

ارزیابی کارکرد روش PH نشان می‌دهد که هر چه مقدار RI بیشتر باشد، هم واژگونی پربندهای  $\theta$  و هم گرادیان ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بیشتر است. توزیع اقلیم‌شناختی نتایج نیز نشان‌دهنده چیرگی رخدادهای واچرخندی در شرق اقیانوس اطلس، اروپا، نیمه غربی آسیا، شرق اقیانوس آرام و نیمه غربی قاره آمریکا است. به‌علاوه، فراوانی رخداد شکست واچرخندی با غلبه نفوذ توده‌های گرم ABW در این مناطق، از شکست متناظر با غلبه توده‌های سرد بیشتر است. بیشترین فراوانی رخداد شکست چرخندی با غلبه نفوذ توده‌های گرم (CBW) در شرق اقیانوس آرام و غرب آسیا، و بیشینه فراوانی رخداد شکست چرخندی با غلبه نفوذ توده‌های سرد (CBC) در غرب اقیانوس اطلس و غرب اقیانوس آرام دیده می‌شود. فراوانی رخداد CBW در شرق آسیا و CBC در غرب اقیانوس‌های اطلس و آرام از دیگر مناطق بیشتر است. فراوانی رخداد شکست موج قوی در همه طول‌های جغرافیایی اندکی بیشتر از شکست موج ضعیف است.

واژه‌های کلیدی: شکست موج راسبی، شکست موج چرخندی، شکست موج واچرخندی، شاخص شکست موج، تاوایی پتانسیلی.

## ۱. مقدمه

موجب انتقال انرژی، رطوبت و تکانه در جو می‌شوند. برهم‌کنش امواج راسبی و جریان میانگین می‌تواند جریان میانگین مداری را تغییر داده و باعث ایجاد پریشیدگی با دامنه بزرگ در وردسپهر زیرین به شکل شکست موج راسبی (Rossby Wave Breaking) RWB شود. بر روی سطوح هم‌آنروپی، RWB با دگرشکلی سریع و برگشت‌ناپذیر پربندهای تاوایی پتانسیلی (PV Potential Vorticity) مشخص می‌شود. RWB با رویدادهای جوی تأثیرگذار مانند بندال، فرین‌های قطبی، گرمایش ناگهانی پوشش سپهری، رودهای جوی و بارش‌های فرین قاره‌ای

امواج راسبی (امواج کژفشار) و چرخه زندگی آنها همواره موضوع مهمی برای پژوهشگران علوم جوی بوده است تا از این طریق بتوانند هم درک درستی از پدیده‌های جوی بزرگ‌مقیاس و هم پیش‌بینی‌های بهتری ارائه دهند. توسعه امواج کژفشار، تشکیل چرخندهای برون‌حاره‌ای سطحی و ایجاد پریشیدگی‌های وردسپهر زیرین را به همراه دارد. همچنین امواج راسبی عامل حرکات نوسانی عظیمی در سرتاسر جو سیاره هستند که این حرکات نقش مهمی در گردش‌های جوی-اقیانوسی، واداشت‌های بزرگ‌مقیاس جوی و حتی تغییر اقلیم دارند (پینالت، ۲۰۲۲). امواج راسبی

استناد: متولی طاهر، فاطمه زهرا؛ میرزایی، محمد؛ محب‌الحجه، علیرضا و احمدی گیوی، فرهنگ (۱۴۰۵). بررسی شکست موج راسبی در مسیرهای توفان نیمکره شمالی در دوره

۱۹۵۸-۲۰۲۳ بر مبنای توزیع دمای پتانسیلی روی سطوح هم‌مقدار تاوایی پتانسیلی. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۲(۱)، ۱۳۹-۱۵۹. DOI: 10.22059/jesphys.2025.402301.1007723

<http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.402301.1007723>

رایانامه: (۱) [ahmadig@ut.ac.ir](mailto:ahmadig@ut.ac.ir) | [amoheb@ut.ac.ir](mailto:amoheb@ut.ac.ir) | [fmotevalli@ut.ac.ir](mailto:fmotevalli@ut.ac.ir)



دسته حالت آینه‌ای موارد در نظر گرفته شده توسط تورنکرافت و همکاران (۱۹۹۳) نسبت به جریان جتی بود. لاچات و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی و دسته‌بندی انواع شکست موج راسبی نتیجه گرفتند که مکان، نوع و شدت اثرات وردسپهری RWB به الگو و ساختار آن بستگی دارد.

در مطالعات پیشین، دو رویکرد، یکی بر اساس فعالیت موج و دیگری بر اساس ساختار بندال‌های جوی، برای بررسی شکست موج راسبی مورد توجه بوده است. اسلر و هینز (۱۹۹۹) با استفاده از فعالیت موج و شار آن شاخصی برای تعیین جهت شار تعریف کردند و نشان دادند که چگونگی توزیع میدان PV در تعیین جهت شار فعالیت موج مهم است. از جمله مطالعات مربوط به رویکرد فعالیت موج می‌توان به خدادی و همکاران (۱۳۹۹) اشاره کرد که با کاربست شاخص اسلر و هینز (۱۹۹۹)، آمار RWB را بر روی اروپا و غرب آسیا ارائه دادند. آنها مطالعه خود را برای تمام روزهای زمستان سال‌های ۲۰۱۸-۱۹۷۹ با دسته‌بندی شکست موج به سه گروه ضعیف، متوسط و قوی انجام دادند و شکست‌های چرخندی و واچرخندی قوی را بررسی کردند. نتایج نشان داد دامنه و تاوایی امواج و همچنین مؤلفه‌های قائم و نصف‌النهاری فعالیت موج در شکست واچرخندی بیشتر از شکست چرخندی است.

از طرفی، پلی و هاسکینز (۲۰۰۳) نشان دادند که می‌توان رخداد RWB را به‌طور کمی با معرفی شاخصی بر مبنای گرادیان نصف‌النهاری دمای پتانسیلی ( $\theta$ ) بر روی تراز  $2PVU$  ( $1PVU = 10^{-6} Kkg^{-1}m^2s^{-1}$ ) اطراف یک عرض مرجع، تعیین کرد. در این رهیافت که به  $PV - \theta$  معروف است، عرض جغرافیایی مرجع منطبق بر محور مسیر توفان در وردسپهر زبرین در هر طول جغرافیایی گرفته می‌شود. آنها در ادامه پیشنهاد کردند که بندال‌های عرض‌های میانی را می‌توان با ماندگاری رخداد RWB بر روی یک بازه معین از طول جغرافیایی در نظر گرفت. این شاخص که از این پس به نام PH به اختصار نام معرفی‌کنندگان از آن یاد می‌شود، برای شناسایی و مطالعه جنبه‌های اقلیم‌شناختی بندال و یا ویژگی‌های دینامیکی جو

مرتبط است؛ همچنین ممکن است با چرخندهای حاره‌ای برهم کنش داشته و بر مسیر و شدت آنها اثر بگذارد (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۱).

امواج راسبی در اثر گرادیان نصف‌النهاری PV در جریان زمینه به وجود می‌آیند و شناسایی آنها هم با تعیین بی‌هنجاری PV بر جریان زمینه امکان‌پذیر است. با توجه به اصل وارون‌سازی PV (هاسکینز و همکاران، ۱۹۸۵)، امواج راسبی اثر خود را در متغیرهای جوی بی‌شماری مانند نوسان جت عرض‌های میانی، بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی و بی‌هنجاری دما نشان می‌دهند (شونبرگر، ۲۰۲۱). شکست موج راسبی یک فرایند دینامیکی مهم است که می‌تواند با سامانه‌های جوی مانند مسیر توفان، بندال، کم‌فشار بریده و نوسان اطلس شمالی (NAO) همراه باشد. برای نمونه می‌توان به مطالعه دوریس (۲۰۲۱) در مورد RWB و انتقال شدید رطوبت برای رویدادهای بارش فرین طی سال‌های ۲۰۱۸-۱۹۷۹ یا کار مارتیوس و همکاران (۲۰۰۷) در مورد ارتباط مکان و فراوانی جریان‌های چرخندی و واچرخندی RWB با دورپیوندهای واقع در وردسپهر در زمستان نیمکره شمالی اشاره داشت. از جمله مطالعات انجام شده بر روی تغییرات و اثرات شکست موج راسبی می‌توان به تاکمورا و همکاران (۲۰۲۰)، گیون و همکاران (۲۰۲۱)، دوریس و همکاران (۲۰۲۴) و تاهوون و رایسانن (۲۰۲۴) اشاره کرد.

رویدادهای شکست موج در ابتدا از طریق مشاهدات میدان‌های ردیاب گوناگون بررسی و دو الگوی رفتاری از چرخه زندگی موج کژفشار معرفی شد (مانند تورنکرافت و همکاران، ۱۹۹۳). این الگوها چرخه‌های زندگی شکست موج چرخندی (Cyclonic wave breaking) CWB و واچرخندی (Anticyclonic wave breaking) AWB نام‌گذاری شد. در ادامه، پیترس و واف (۱۹۹۶) تأثیر چینش فشارورد بر روی فرارفت قطب‌سوی هوای وردسپهر زبرین را با استفاده از تحلیل نتایج دو مدل عددی ساده، طی زمستان بررسی کردند. آنها تغییرات هوای وردسپهر در شکست قطب‌سوی امواج راسبی را با توجه به چینش‌های نصف‌النهاری و مداری به دو دسته تقسیم کردند که این دو

تفکیک افقی ۱/۲۵ درجه در دو راستای مداری و نصف‌النهاری برای ۳۷ تراز فشاری از ۱۰۰۰ تا ۱ هکتوپاسکال برای هر ۶ ساعت در دسترس هستند که در اینجا از داده‌های ساعت UTC ۰۰ استفاده شده است. داده‌های به کار رفته شامل ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد در ساعت UTC ۰۰ هستند.

## ۲-۲. فرمول‌بندی

بنابر تعریف پلی و هاسکینز (۲۰۰۳)، شاخص PH با نماد  $BI$  و رابطه

$$BI = \frac{2}{\Delta\phi} \left( \int_{\phi_0}^{\phi_0+\Delta\phi/2} \theta d\phi - \int_{\phi_0-\Delta\phi/2}^{\phi_0} \theta d\phi \right) \quad (1)$$

سنجه‌ای برای گرادبان نصف‌النهاری  $\theta$  بر روی تراز ۲PVU است. در رابطه (۱)،  $\phi_0$  عرض جغرافیایی مرکز بندال و  $\Delta\phi$  اختلاف بین عرض‌های جغرافیایی دو قطاع بالا و پایین  $\phi_0$  را نشان می‌دهد که در اینجا ۳۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. این شاخص در یک طول جغرافیایی معین ( $\lambda_0$ ) محاسبه می‌شود. پلی و هاسکینز (۲۰۰۳) عرض جغرافیایی مرکز بندال را عرض جغرافیایی بیشینه انرژی جنبشی پیچک‌های بالابسامد مربوط به امواج کزفشار گرفته‌اند. در پژوهش فعلی، مشخصات عرض جغرافیایی مطابق با شکل ۲ در کار آزر و همکاران (۲۰۲۳) بر اساس عرض جغرافیایی بیشینه انرژی جنبشی پیچک‌های دارای دوره تناوب ۲ تا ۶ روز در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال گرفته شده است. اگر  $BI > 0$  باشد به مفهوم واژگونی نصف‌النهاری پرندهای دمای پتانسیلی و شکست موج راسبی است. از این به بعد، تنها مجموعه مقادیر مثبت  $BI$  مدنظر است که با  $BI$  نشان داده می‌شود. برمبنای دو انتگرال موجود در رابطه (۱) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_i^n &= \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0}^{\phi_0+\Delta\phi/2} \theta_i d\phi \\ \bar{\theta}_i^s &= \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0-\Delta\phi/2}^{\phi_0} \theta_i d\phi \end{aligned} \quad (2)$$

که در هر طول جغرافیایی مربوط به نقطه شبکه‌ای  $i$  برای دو قطاع شمالی و جنوبی حول عرض جغرافیایی مرکز بندال محاسبه می‌شوند. بالانویس  $n$  و  $s$  نیز به ترتیب به معنی شمال و جنوب هستند. سه کمیت شاخص بندال ( $BI$ )، جهت

در زمان وقوع بندال استفاده شده است (مانند، ترلیس و هاسکینز، ۲۰۰۸ و آزر و همکاران، ۲۰۲۳). روش PV- $\theta$  را در ادامه بریسفورد و همکاران (۲۰۰۷) و سپس ماساتو و همکاران (۲۰۱۳) گسترش دادند. در مطالعه ماساتو و همکاران (۲۰۱۲)، شاخص PH نه فقط بر روی یک عرض جغرافیایی مرجع بلکه بر روی تمام مناطق عرض‌های میانی و بالا به کار بسته شد. به علاوه، بر اساس همین روش، کمیت‌هایی برای تشخیص ویژگی‌های اصلی شکست موج شامل جهت (جهت چرخندی/واچرخندی شکست DB Direction of Breaking) و سهم نسبی توده‌های هوا (شدت نسبی گرم/سرد) یا شدت نسبی  $RI$  (Relative Intensity) طراحی شد.

از آنجا که RWB اغلب با پدیده‌های جوی مانند مسیر توفان، بندال، کم‌فشار بریده و NAO همراه است و ممکن است به شکل بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی و بی‌هنجاری دما هم بروز کند، مطالعه سازوکارهای رخداد RWB می‌تواند کمک به‌سزایی به شناخت بهتر پدیده‌های مذکور نماید. همچنین بررسی ارتباط بسامد و نوع رخداد RWB با بی‌هنجاری‌های بزرگ در مسیرهای توفان اطلس شمالی و مدیترانه در مقیاس فصلی، جایگاه ویژه‌ای خواهد داشت. هدف پژوهش حاضر، محاسبه RWB بر اساس کاربست شاخص PH در مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه برای فصل زمستان نیمکره شمالی در دوره بلند مدت ۱۹۵۸ الی ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های JRA-55 است. ساختار مقاله حاضر به این صورت است که در بخش دوم، داده‌ها و روش کار بیان می‌شود. سپس، نتایج و تحلیل آنها در بخش سوم آورده می‌شود. در نهایت، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش چهارم ارائه خواهد شد.

## ۲. داده‌ها و روش انجام پژوهش

### ۲-۱. داده‌ها

در این پژوهش، از داده‌های بازتحلیل آژانس هواشناسی ژاپن (JRA-55) طی دوره مطالعاتی دسامبر ۱۹۵۸ تا فوریه ۲۰۲۳ (۶۵ سال) استفاده شده است. این داده‌ها دارای

چرخندی است. همچنین برای تحلیل شدت نسبی ( $RI$ )، دمای پتانسیلی میانگین‌گیری شده بر روی قطاع شمال و قطاع جنوب عرض جغرافیایی مرکزی با مقادیر اقلیمی آن مقایسه می‌شود. اگر علامت شاخص  $RI$  مثبت باشد، نشان‌دهنده چیرگی نفوذ توده‌های گرم و اگر منفی باشد، نشانه چیرگی نفوذ توده‌های سرد است.

### ۲-۳. روش انجام پژوهش

در مطالعات پیشین، دسته‌بندی‌های مختلفی برای انواع شکست موج راسبی ارائه شده است. برای مثال، گیون و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی ارتباط بین چرخه زندگی موج راسبی و تغییرپذیری فصلی آن با باد میسترال (باد سرد و خشک جنوب فرانسه)، شکست موج راسبی را بر اساس توزیع  $PV$  دسته‌بندی کردند. این دسته‌بندی شامل شکست موج راسبی چرخندی، واچرخندی و کم‌فشار بریده بوده و بر اساس ویژگی ناوه پهن، عمیق و نفوذ جنوب‌سو انجام شده است. در پژوهش حاضر همانند شی و ناکامورا (۲۰۲۱)، از دسته‌بندی ماساتو و همکاران (۲۰۱۳) استفاده شده است. این دسته‌بندی شامل چهار نوع شکست موج راسبی بدین شرح: (۱) شکست موج چرخندی با نفوذ هوای گرم ( $CBW$  Cyclonic wave breaking warm) یا  $P1$  ( $DB < 0$  و  $RI > 0$ )، (۲) شکست موج چرخندی با نفوذ هوای سرد ( $CBC$  Cyclonic wave breaking cold) یا  $LC2$  ( $DB < 0$  و  $RI < 0$ )، (۳) شکست موج واچرخندی با نفوذ هوای گرم ( $ABW$  Anticyclonic wave breaking warm) یا  $P2$  ( $DB > 0$  و  $RI > 0$ ) و (۴) شکست موج واچرخندی با نفوذ هوای سرد ( $LC1$  Anticyclonic wave breaking cold) یا  $DB > 0$  و  $RI < 0$  است.

در این پژوهش، ابتدا ارزیابی کاربست روش  $PH$  در شناسایی رخداد انواع شکست موج، با محاسبه و بررسی توزیع  $PV$  در تراز دمای پتانسیلی  $330$  کلونین،  $\theta$  بر روی تراز وردایست ( $2PVU$ )، ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز  $hPa$   $500$  و سرعت باد در تراز  $hPa$   $200$  برای سه مورد مطالعاتی

شکست ( $DB$ ) و شدت نسبی ( $RI$ ) برای شکست موج راسبی در هر نقطه شبکه بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} BI &= \bar{\theta}_i^n - \bar{\theta}_i^s \\ DB &= \bar{\theta}_{i-1} - \bar{\theta}_{i+1} \\ RI &= \bar{\theta}_i - \theta_i^* \end{aligned} \quad (3)$$

در اینجا  $\bar{\theta}_i = (\bar{\theta}_i^n + \bar{\theta}_i^s)/2$  و  $\theta_i^*$  مقادیر اقلیم‌شناختی  $\theta$  برای ماه‌های زمستان نیمکره شمالی (دسامبر، ژانویه و فوریه) در نقطه شبکه  $i$  است (ماساتو و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین  $BI$  معرف اختلاف  $\theta$  بر روی تراز  $2PVU$  در شمال و جنوب آن نقطه است. دقت شود که واحد همه کمیت‌های معرفی شده در اینجا همان واحد دمای پتانسیلی است، اما با توجه به امکان منفی شدن مقادیر، برای پیشگیری از ابهام، در ارائه نتایج از ذکر نام کلونین یا سلیوس خودداری می‌شود.

نوع شکست موج بر اساس ویژگی‌های آن با شاخص‌های  $RI$  و  $DB$  طبقه‌بندی می‌شود. بدین منظور، ابتدا داده‌ها از ترازهای فشاری استاندارد به ترازهای فشاری با فاصله برابر  $100$  hPa از  $1000$  hPa تا  $100$  hPa درون‌یابی شده، سپس،  $PV$  با کمک رابطه (۴) و با کاربست روش تفاضل‌گیری متناهی مرکزی مرتبه دوم روی ترازهای فشاری محاسبه می‌شود. در ادامه،  $PV$  بر روی ترازهای  $\theta$  با استفاده از روش هرمیت تکه‌ای مکعبی یکنوا درون‌یابی می‌شود. در مرحله بعد با مشخص کردن تراز  $2PVU$ ، شاخص‌ها بر روی آن تراز تعیین می‌شوند.

$$PV = -g \left[ \left( f + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{\partial \theta}{\partial p} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} \right] \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $u$  و  $v$  به ترتیب معرف مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری سرعت افقی،  $f$  پارامتر کوریولیس و  $g$  شتاب گرانی هستند (هاسکینز و همکاران، ۱۹۸۵).

کمیت‌های  $DB$  و  $RI$  برای زمستان هر سال (دسامبر، ژانویه و فوریه) با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند. برای این منظور، از  $\theta$  و میانگین بلندمدت آن استفاده می‌شود. اگر علامت  $DB$  مثبت باشد، جهت‌گیری واچرخندی و اگر علامت آن منفی باشد، جهت‌گیری

انجام می‌شود. هدف از این قسمت، درک نحوه کارکرد روش و ارتباط آن با سامانه‌های همدیدی است. مورد مطالعاتی اول به صورت تصادفی انتخاب شده که مربوط به تاریخ ۸ فوریه ۱۹۵۹ است. دو مورد دیگر با توجه به دو مطالعه پیشین پدیده‌های فرین در ایران انتخاب شده‌اند تا بتوان نتایج حاصل را با نتایج آنها مورد مقایسه قرار داد. این مقایسه مبنایی برای چگونگی کارکرد هر کمیت در روش PH و میزان تطابق آنها با واقعیت خواهد بود. مورد دوم مربوط به ۶ ژانویه ۲۰۰۸ (خان‌سالاری و همکاران، ۱۳۹۷) و مورد سوم مربوط به ۲۷ ژانویه ۲۰۱۸ (قریب و همکاران، ۲۰۲۴) است که هر دو مورد همراه با بارش برف سنگین در تهران، فعالیت سامانه همدیدی قوی همراه با جبهه‌های سطحی بارز و رخداد شکست موج راسبی بنابر مطالعات مذکور بوده‌اند.

پس از ارزیابی کاربرد شاخص PH در شناسایی شکست موج در چندین مورد مطالعاتی ذکر شده، توزیع آماری  $BI$  و بیشینه آن، دو دسته اصلی شکست موج  $CWB$  و  $AWB$  همراه با چهار دسته‌بندی شکست موج شامل  $CBC$ ،  $CBW$ ،  $ABC$  و  $ABW$  بر حسب طول جغرافیایی برای فصل زمستان دوره مورد مطالعه ۶۵ ساله ارائه می‌شود. همچنین با تعیین میانگین بلندمدت فصلی  $BI$  بر روی هر طول جغرافیایی، بیشینه آن محاسبه و توزیع بلندمدت آن آورده می‌شود. در نهایت، شکست‌های قوی ( $strong$ )، متوسط ( $medium$ ) و ضعیف ( $weak$ ) با محاسبه انحراف معیار شناسایی می‌شوند. برای این کار ابتدا انحراف معیار  $BI$  در هر طول جغرافیایی طی دوره ۶۵ سال محاسبه و بر مبنای آن شکست موج به سه دسته مذکور تقسیم می‌شود. موارد شکستی که مقدار  $BI$  طی آنها بیشتر از میانگین کلیه مقادیر  $BI$  به علاوه یک انحراف معیار باشد، شکست موج قوی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین موارد شکستی که مقدار  $BI$  طی آنها بین دو مقدار میانگین  $BI$  به علاوه یک انحراف معیار و میانگین  $BI$  منهای یک انحراف معیار باشد، شکست موج متوسط و مواردی که مقدار  $BI$  طی آنها کمتر از میانگین  $BI$  منهای یک انحراف معیار است، شکست موج ضعیف محسوب

می‌شوند.

### ۳. نتایج

#### ۳-۱. ارزیابی روش PH در مطالعات موردی

در این بخش، ارزیابی کاربرد روش شاخص PH در شناسایی شکست موج راسبی، شدت و جهت آن برای سه مورد مطالعاتی معرفی شده در بخش ۲-۳ ارائه می‌شود. بدین منظور، تغییرات مقادیر  $BI$  به همراه  $DB$  و  $RI$  بر حسب طول جغرافیایی ترسیم می‌شوند. همچنین، توزیع  $PV$  در تراز هم‌دمای پتانسیلی ۳۳۰ کلون،  $\theta$  بر روی وردایست، ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa و سرعت افقی باد در تراز ۲۰۰ hPa برای ارزیابی نتایج مربوط به سه شاخص مذکور ارائه می‌شوند.

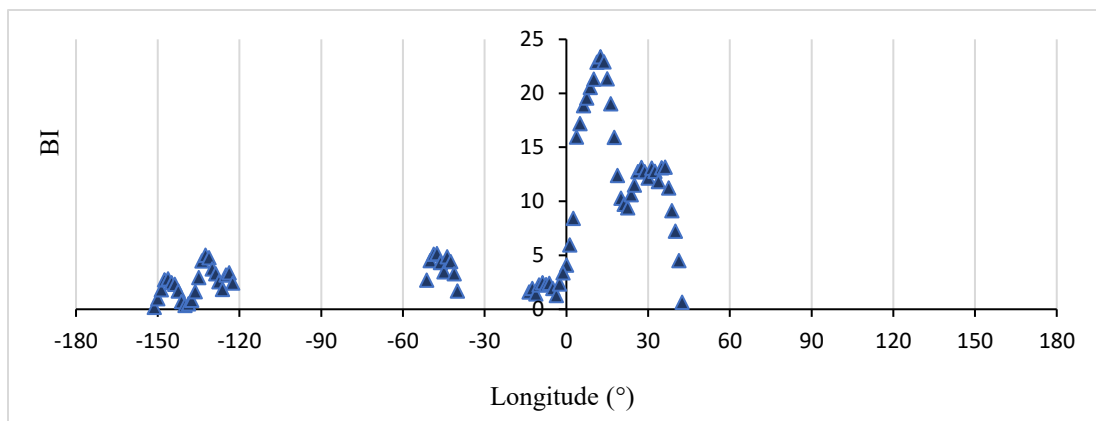
#### ۳-۱-۱. مورد مطالعاتی اول

مورد مطالعاتی اول مربوط به ۸ فوریه ۱۹۵۹ انتخابی تصادفی است که توزیع  $BI$  برای آن در شکل ۱-الف آورده شده است. مطابق شکل،  $BI$  در مناطق حدود ۱۵ درجه غربی تا ۴۰ درجه شرقی، ۴۰ تا ۵۰ درجه غربی و ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه غربی قابل شناسایی است و بیشترین مقدار آن برابر ۲/۹ در ۱۱ درجه شرقی دیده می‌شود. مقادیر شاخص‌های  $DB$  و  $RI$  در ناحیه ۱۵ درجه غربی تا حدود ۲۰ درجه شرقی کوچک بوده و به شکل نوسانی بین مقادیر ۳+ و ۴- تغییر می‌کند (شکل ۱-ب)؛ با این وجود، توزیع  $PV$  در تراز ۳۳۰ کلون (شکل ۲-الف)، نفوذ مقادیر  $PV$  از عرض‌های بالا را نشان می‌دهد. مقدار هر دو کمیت  $DB$  و  $RI$  در ناحیه ۲۰ تا ۴۰ درجه شرقی مثبت است (شکل ۱-ب) که انتظار می‌رود با  $ABW$  مطابقت داشته باشد؛ این مورد به خوبی در ناحیه محصور شده در قاب مستطیلی بر روی شکل ۲-الف دیده می‌شود. مقدار  $RI$  در این ناحیه بزرگ‌تر از سایر نواحی بوده و بیشینه آن به عدد ۱۰ می‌رسد. لازم به ذکر است که بیشینه مقدار  $PV$  در قاب مستطیلی، ۸ PVU و منطبق بر بیشترین مقادیر  $BI$  است. همچنین علامت هر دو کمیت  $DB$  و  $RI$  در ناحیه ۴۰ تا ۵۰ درجه غربی بر روی

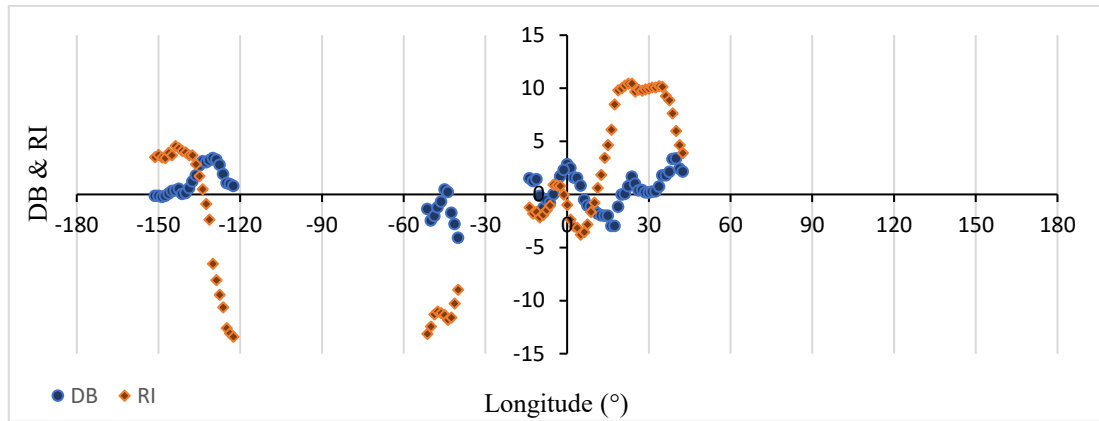
مطابق شکل، شکست موج منطبق بر مناطق نشان داده شده با قاب‌های مربع، مستطیل و دایره رخ داده است و به ترتیب پربندهای ۵۳۰ تا ۵۶۰، ۵۰۰ تا ۵۶۰ و ۵۳۰ تا ۵۷۰ ژئوپتانسیل دکامتر مشاهده می‌شود. همچنین سرعت باد افقی در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در شکل ۲-د نشان می‌دهد جریان جتی سطوح زیرین وردسپهر دارای پیچ‌وتاب در راستای نصف‌النهاری است. مطالعات پیشین مانند تورنکرافت و همکاران (۱۹۹۳)، اسلر و هینز (۱۹۹۹) و پیترس و واف (۱۹۹۶) اشاره می‌کنند جریان جتی هنگام شکست موج راسبی از نوع واچرخندی سرد و چرخندی گرم (LC1 و P1)، باریک و در شکست موج راسبی از نوع چرخندی سرد و واچرخندی گرم (LC2 و P2)، پهن می‌شود که در شکل ۲-د نیز این الگوها به خوبی دیده می‌شود. مقدار بیشینه جریان جتی در شکل ۲-د به ۶۰ تا ۷۰ متربرثانیه، به‌ویژه در قاب‌های مستطیل و دایره می‌رسد. در این خصوص، خدادی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در نتایج خود بیان کردند که در شکست قوی موج راسبی مقدار بیشینه جریان جتی در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال به ۶۰ تا ۷۰ متربرثانیه می‌رسد. همچنین لاجات و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود بیان کردند که در شکست موج راسبی قوی، سرعت باد در وردایست بیش از ۴۰ متربرثانیه است و می‌تواند از ۶۰ متربرثانیه نیز بیشتر شود.

اقیانوس اطلس منفی است (شکل ۱-ب) که نشان‌دهنده شکست CBC می‌باشد. این حالت در الگوی توزیع PV در ناحیه محصور شده در قاب دایره‌ای در شکل ۲-الف نیز دیده می‌شود. علامت شاخص DB در ناحیه ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه غربی واقع در غرب قاره آمریکا و شرق اقیانوس آرام مثبت است، اما مقدار RI ابتدا منفی و سپس مثبت می‌شود که مطابق با ABC و سپس ABW است. این نتیجه با بررسی توزیع PV منطبق بر ناحیه محصور شده در قاب مربعی شکل ۲-الف قابل تأیید است. مقدار RI در ناحیه ۴۰ تا ۵۰ درجه غربی و ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه غربی به ۱۳- می‌رسد که صرف‌نظر از علامت، بزرگی آن از سایر نقاط بیشتر است. همچنین مقدار نفوذ PV در موقعیت شکست موج بین ۴-۸ PVU است. بررسی توزیع  $\theta$  بر روی تراز ۲PVU در شکل ۲-ب، به خوبی واژگونی پربندهای ۲۷۰ تا ۳۱۰ کلون در مناطق ذکر شده را نشان می‌دهد؛ شایان توجه است که توزیع میانگین  $\theta$  در این عرض‌های جغرافیایی مقادیر بین ۳۱۰ تا ۳۴۰ کلون را نشان می‌دهد (شکل آورده نشده است).

برای کمک به درستی‌سنجی رخدادهای شکست موج راسبی در مناطق مذکور، از نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۲-ج) نیز استفاده شده است.

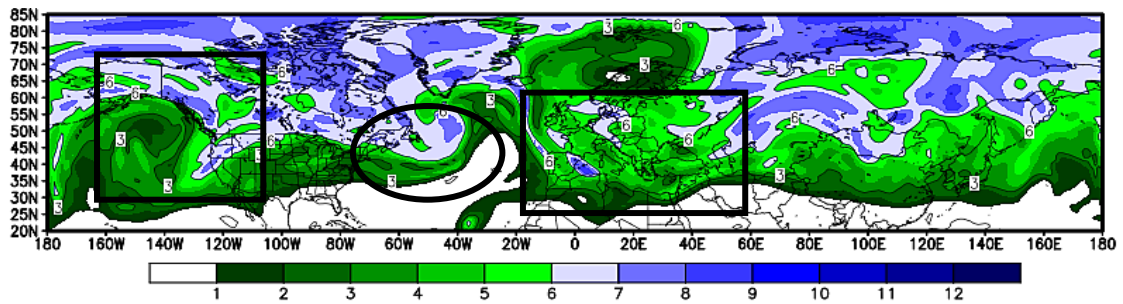


(الف)

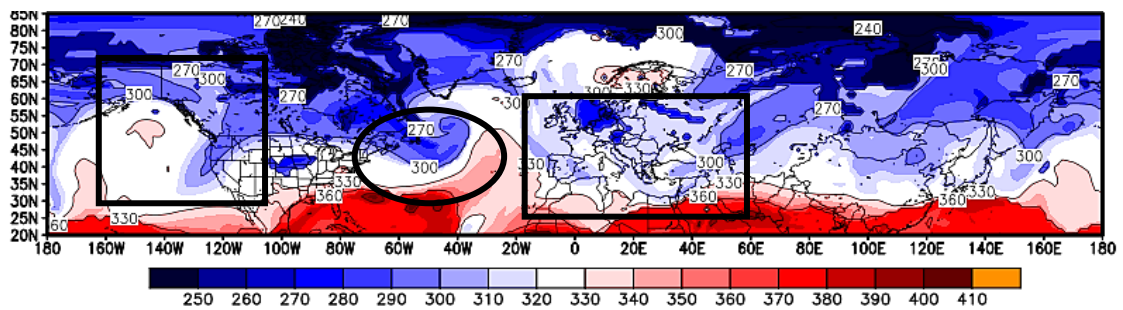


(ب)

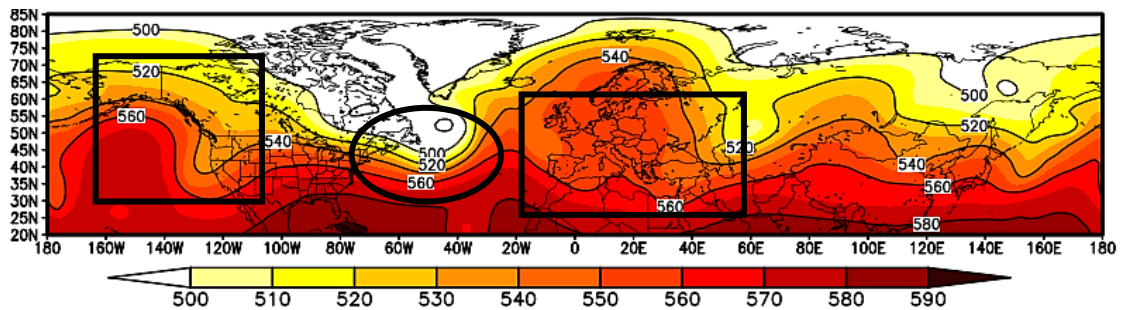
شکل ۱. تغییرات (الف)  $BI$  و (ب)  $DB$  (نقاط آبی) و  $RI$  (نقاط قرمز) برحسب طول جغرافیایی برای مورد مطالعاتی اول در UTC ۰۰ روز ۸ فوریه ۱۹۵۹.



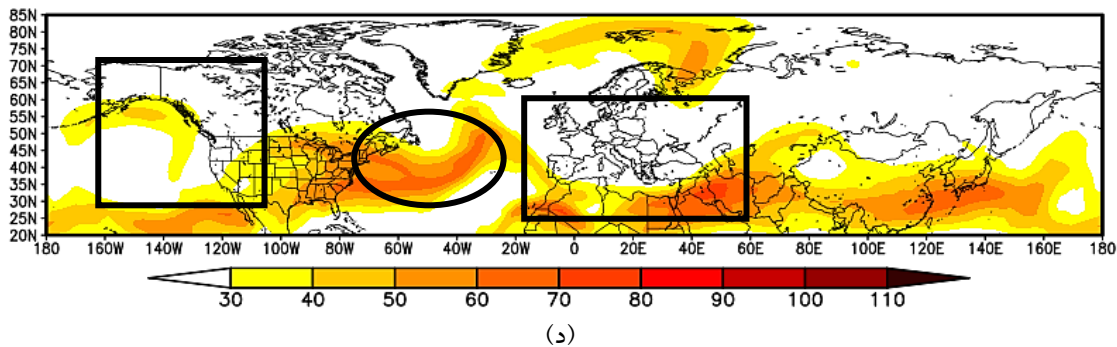
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲. توزیع (الف) PV در تراز ۳۳۰ کلونین (سایه‌روشن رنگی؛ یکای PVU)، (ب)  $\theta$  بر روی وردایست (سایه‌روشن رنگی؛ یکای K)، (ج) ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa (سایه‌روشن رنگی؛ یکای gpm) و (د) سرعت باد در تراز ۲۰۰ hPa (سایه‌روشن رنگی؛ یکای m/s) برای مورد مطالعاتی اول در UTC ۰۰ روز ۸ فوریه ۱۹۵۹. نواحی محصور شده در قاب‌های مربعی، مستطیلی و دایره‌ای بر روی شکل‌ها برای کمک به تحلیل‌های ارائه شده در متن است.

### ۳-۱-۲. مورد مطالعاتی دوم

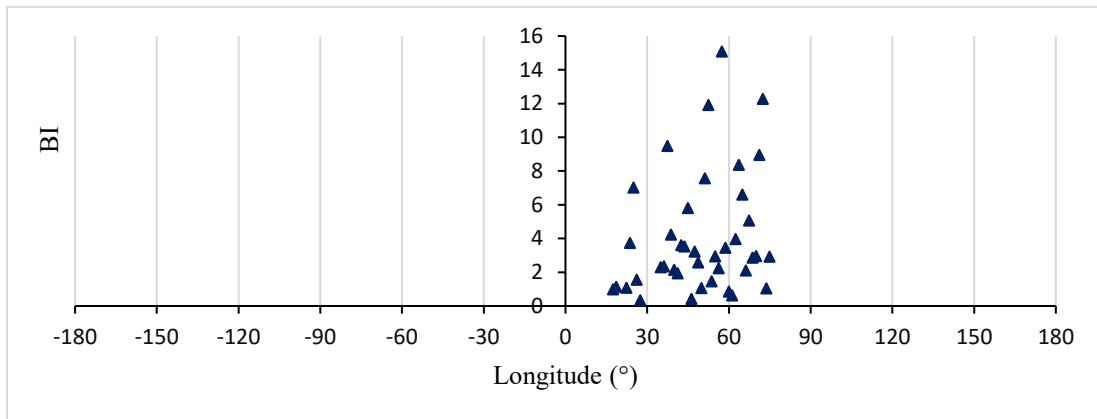
کاهش یابد. همچنین توزیع ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۴-ج)، شکست موج را بر روی شمال شرق دریای خزر (ازبکستان، ترکمنستان و دریاچه آرال) تا شمال غرب ایران با پربندهای ۵۳۰ تا ۵۶۰ ژئوپتانسیل دکامتر همراه با یک کم ارتفاع بسته با مرکز ۵۳۰ ژئوپتانسیل دکامتر نشان می‌دهد. این درحالی است که در عرض‌های بالاتر و در شمال شرق اروپا، ارتفاع زیاد با مرکز ۵۶۰ ژئوپتانسیل دکامتر قرار دارد. بر اساس تقسیم‌بندی لاجات و همکاران (۲۰۲۴) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پربندهای ۵۲۰ تا ۵۷۰ ژئوپتانسیل دکامتر در شکست موج قوی دیده می‌شود. علاوه بر این، بررسی میدان سرعت باد در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۴-د) نشان می‌دهد که جریان جتی دارای پیچ‌وتاب در راستای نصف‌النهاری است و منطقه مورد بررسی در خروجی سرد جریان جتی قرار دارد. همچنین پهن‌شدگی جریان جتی با بیشینه سرعت ۸۰ متربرثانه به‌خوبی قابل شناسایی است (شکل ۴-د) و مطابق با مطالعه مارتیوس و همکاران (۲۰۰۷)، شکست چرخندی در شمال یک جریان جتی قوی جنب‌حاره‌ای رخ می‌دهد و در شکست و اچرخندی، بیشینه فراوانی شکست موج منطبق بر اروپا و آسیا در پایین دست شاخه اطلس جریان جتی جنب‌حاره‌ای است.

الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی در شکل ۴-ج برای مقایسه با نتایج مطالعه خان‌سالاری و همکاران (۱۳۹۷) که ارتفاع ژئوپتانسیلی را در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای UTC ۰۰

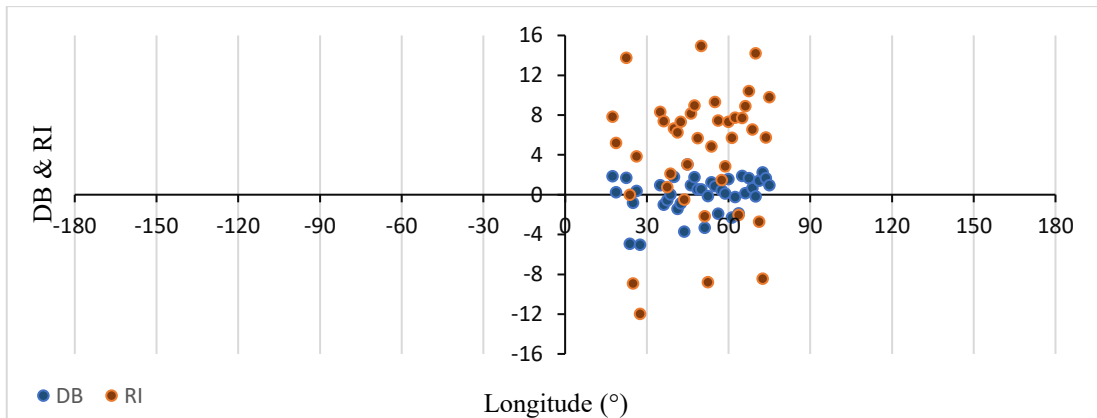
مورد مطالعاتی دوم مربوط به ۶ ژانویه ۲۰۰۸ است. این مورد با توجه به رخداد بارز شکست موج راسبی بنا بر مطالعه خان‌سالاری و همکاران (۱۳۹۷) انتخاب شده است. تغییرات BI با طول جغرافیایی در UTC ۰۰ روز ۶ ژانویه ۲۰۰۸ در شکل ۳-الف نشان می‌دهد بیشترین مقدار BI برابر با ۱۵ در ۵۷ درجه شرقی قرار دارد و کمیت‌های DB و RI در همین مکان با هر دو علامت مثبت و منفی دیده می‌شوند. در عین حال مقادیر RI عمدتاً مثبت بوده که بیشینه آن برابر با ۱۵ در ۵۰ درجه شرقی واقع است، حال آن‌که DB دارای هر دو علامت اما با مقادیر مثبت کوچک است. توزیع PV در تراز ۳۳۰ کلونین در منطقه مورد بررسی، منطبق بر قاب مستطیلی مشخص شده در شکل ۴-الف، چهار دسته شکست موج ABC، CBW، CBC، ABW و CBW را به تناوب نشان می‌دهد. مقادیر PV در این قاب بین ۴-۷PVU است. مطابق با نتایج مطالعه خدادی و همکاران (۱۳۹۹)، در شکست و اچرخندی قوی مقدار PV بین ۴-۶ PVU و در شکست چرخندی قوی بین ۶-۸ PVU است که طبق تعریف، این شکست‌ها را می‌توان شکست قوی دانست. از طرفی، واژگونی پربندها در این منطقه به‌خوبی از الگوی  $\theta$  بر روی تراز ۲ PVU (شکل ۴-ب) با مقادیر بین ۲۶۰ تا ۳۱۰ کلونین قابل شناسایی است؛ در حالی که مقادیر میانگین  $\theta$  در این ناحیه بین ۳۱۰ تا ۳۴۰ کلونین است و انتظار می‌رود با افزایش عرض جغرافیایی

PV در تراز ۳۱۵ کلومین به کمک داده‌های ERA-Interim ، به شکست موج در این منطقه و وجود زبانه‌ای از PV با مقادیر بالاتر (۶ تا ۸ PVU) در شرق دریای خزر و مرزهای شمال‌غربی ایران اشاره کردند که با شکل ۴-الف مطابقت دارد.

روز ۶ ژانویه ۲۰۰۸ تحلیل کردند، آورده شده است. آنها شکست موج راسبی با جهت‌گیری شمال‌شرقی- جنوب‌غربی با پربندهای ۵۳۰ تا ۵۵۰ ژئوپتانسیل دکامتر را شناسایی کردند که مطابقت خوبی با شکل ۴-ج دارد. خان‌سالاری و همکاران (۱۳۹۷) همچنین با ترسیم توزیع

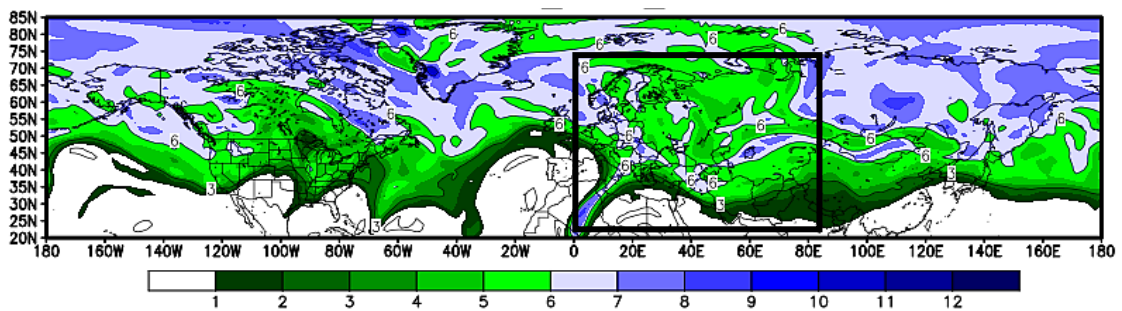


(الف)

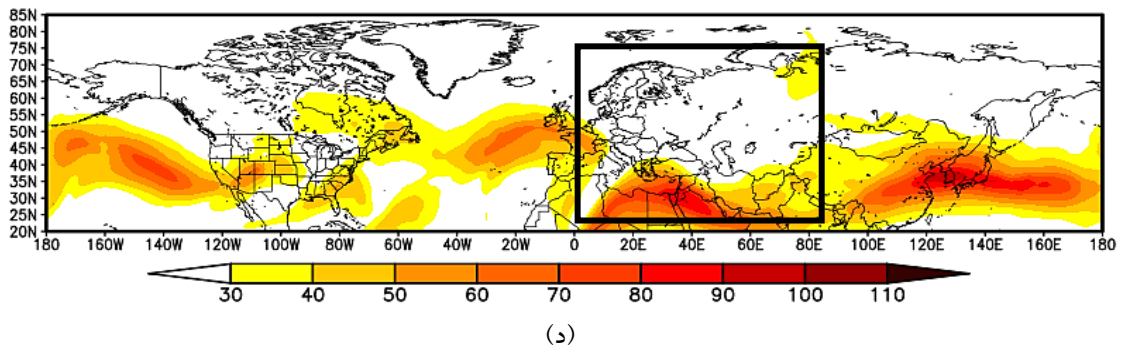
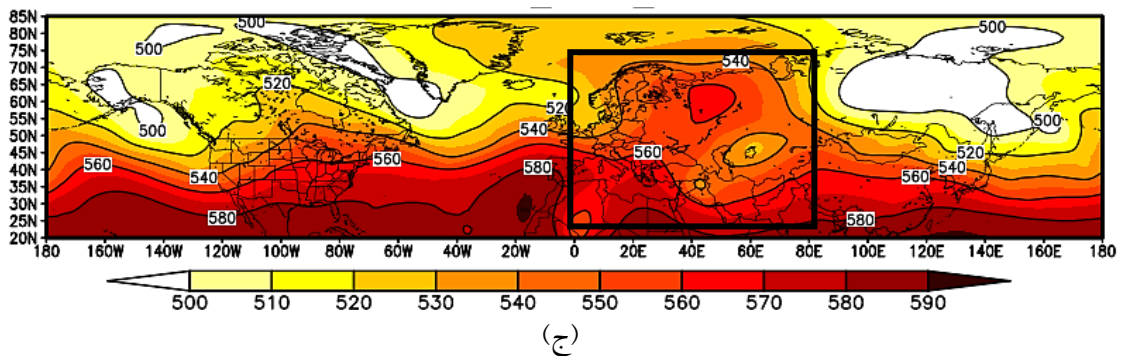
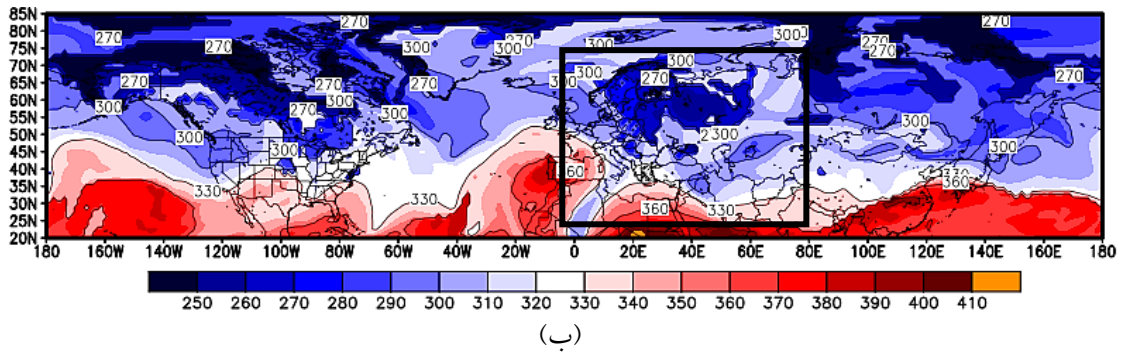


(ب)

شکل ۳. مانند شکل ۱ اما برای مورد مطالعاتی دوم در ۰۰ UTC روز ۶ ژانویه ۲۰۰۸.



(الف)



شکل ۴. مانند شکل ۲ اما برای مورد مطالعاتی دوم در UTC ۰۰ روز ۶ ژانویه ۲۰۰۸.

### ۳-۱-۳. مورد مطالعاتی سوم

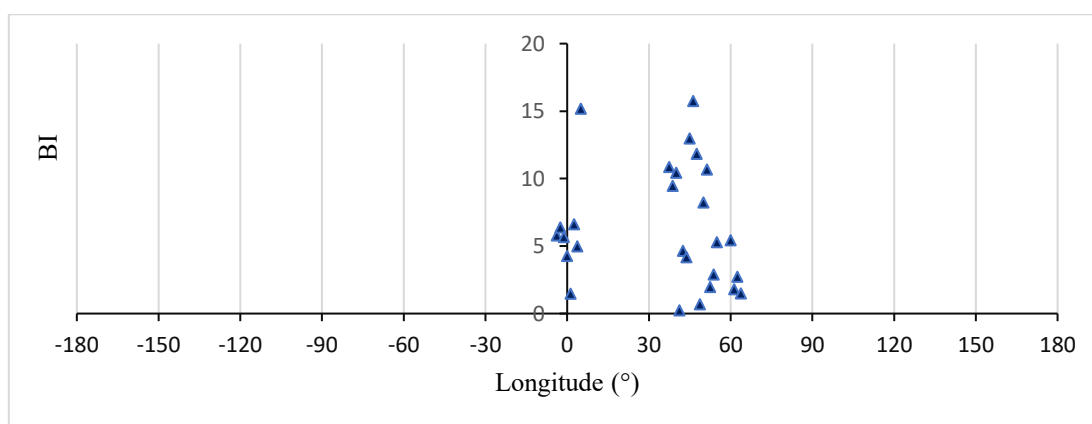
مورد مطالعاتی سوم مربوط به ۲۷ ژانویه ۲۰۱۸ است. دلیل انتخاب این مورد مطالعاتی، رخداد بارش برف سنگین و کم سابقه در برخی از نقاط استان تهران طی روزهای ۲۷ و ۲۸ ژانویه است که در مطالعه قریب و همکاران (۲۰۲۴) به تفصیل به آن پرداخته شده است. تغییرات  $BI$  با عرض جغرافیایی برای این مورد مطالعاتی در UTC ۰۰ روز ۲۷ ژانویه در شکل ۵-الف آورده شده است. مطابق شکل،  $BI$  در دو منطقه، اولی بین ۴ درجه غربی تا ۵ درجه شرقی بر روی سواحل شرقی اقیانوس اطلس و دومی بین ۳۷ تا ۶۴

درجه شرقی که ایران و همسایه‌های غربی آن را دربرمی‌گیرد، دیده می‌شود. این دو منطقه به ترتیب با قاب‌های دایره‌ای و مربعی در شکل ۶ مشخص شده‌اند. بیشترین مقدار  $BI$  برابر ۱۵/۷ مربوط به طول جغرافیایی ۴۶ درجه شرقی است.

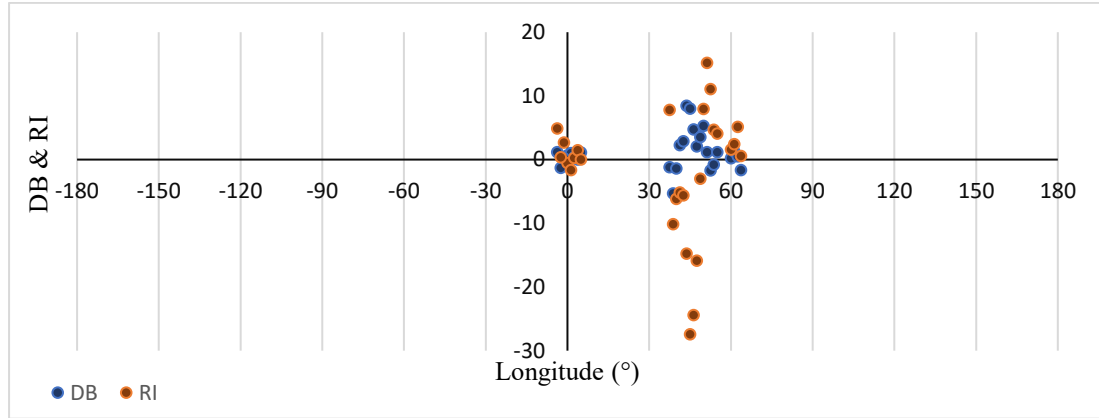
از سوی دیگر، مطابق شکل ۵-ب،  $DB$  و  $RI$  در حوالی نزدیک به طول جغرافیایی صفر درجه واقع در منطقه اول دارای مقادیر مثبت و منفی کوچکی هستند، درحالی که در ابتدای منطقه دوم (بین ۳۷ تا ۴۰ درجه شرقی) مقادیر منفی بوده و با  $CBC$  تطابق دارند. همچنین علامت  $DB$  و  $RI$  در

شکل ۶-د نیز نشان می‌دهد که جریان جتی درون قاب دایره‌ای کاملاً مداری شده و همچنین درون قاب مربعی با مرکز حدود ۸۰ متر بر ثانیه به‌طور کامل ایران را دربر گرفته است. بر اساس پژوهش‌های تورنکرافت و همکاران (۱۹۹۳) و پیترس و واف (۱۹۹۶)، LCI بر روی جریان جتی و P2 در زیر آن رخ می‌دهد که این یافته نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کند. در همین راستا لاچات و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود اظهار داشتند که در حالت AWB ساختار جریان جتی دو تکه در قطب سو و استواسوی ناحیه شکست مشاهده می‌شود و در جریان سو و پادجریان سوی ناحیه شکست، رگه جت به چشم می‌خورد؛ این مورد در شکل ۶-د نیز دیده می‌شود. قریب و همکاران (۲۰۲۴) نیز ضمن مطالعه این رویداد، ساختار میان‌مقیاس PV مرطوب همراه با آن را بررسی کردند. آنها میدان ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را برای ساعت UTC ۰۰ روز ۲۷ ژانویه با استفاده از داده‌های تحلیل نهایی NCEP (FNL) ترسیم کردند که الگوی آن با شکل ۶-ج قابل مقایسه است. همچنین، آنها یک زیانه ارتفاع زیاد در شمال دریای خزر و یک کم ارتفاع بریده در غرب ایران شناسایی کردند که در توافق با شکل ۶-ج است. به‌علاوه، میدان سرعت باد در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال در مطالعه قریب و همکاران (۲۰۲۴) یک جریان جتی با بیشینه سرعت ۸۰ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد که با شکل ۶-د تطابق دارد.

محدوده ۴۰ تا ۵۰ درجه شرقی به ترتیب مثبت و منفی است که ABC را نشان می‌دهد. در انتهای منطقه دوم (بین ۵۰ تا ۶۴ درجه شرقی)، هر دو شاخص *DB* و *RI* مثبت هستند که اشاره به ABW دارد. بیشینه مقدار *RI* برابر ۱۵ در ۵۱ درجه شرقی و کمینه آن برابر ۲۷- در ۴۵ درجه شرقی دیده می‌شوند؛ بیشینه مقدار *DB* برابر ۸ نیز در ۴۴ درجه شرقی رخ داده است. الگوهای شکست موج شناسایی شده درون دو قاب دایره‌ای و مربعی با الگوی شکست پربندهای PV در شکل ۶-الف (مقادیر بین ۸-۴ PVU) تأیید می‌شود و بر اساس تقسیم‌بندی خدادی و همکاران (۱۳۹۹) این الگو را هم می‌توان در دسته شکست قوی قرار داد. در ضمن، توزیع  $\theta$  بر روی تراز ۲ PVU در شکل ۶-ب نیز واژگونی پربندهای ۲۶۰ تا ۳۲۰ کلونین و نفوذ هوای سرد در وردایست را برای مناطق شکست موج مذکور، به‌ویژه در قاب مربعی، نشان می‌دهد. به‌علاوه، رخداد شکست موج در محدوده‌های درون قاب‌های مربعی و دایره‌ای با الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای این روز قابل شناسایی است (شکل ۶-ج). از طرفی، یک کم ارتفاع بریده با مرکز ۵۵۰ ژئوپتانسیل دکامتر در مرزهای غربی ایران و بر روی عراق و سوریه شکل گرفته و زیانه ارتفاع زیادی (۵۶۰ ژئوپتانسیل دکامتر) در عرض‌های بالاتر واقع در شمال دریای خزر و روسیه دیده می‌شود (شکل ۶-ج). بررسی میدان سرعت باد در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در

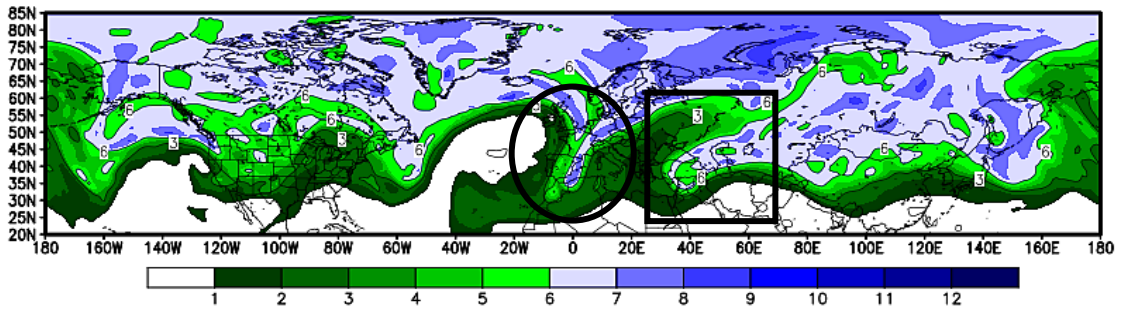


(الف)

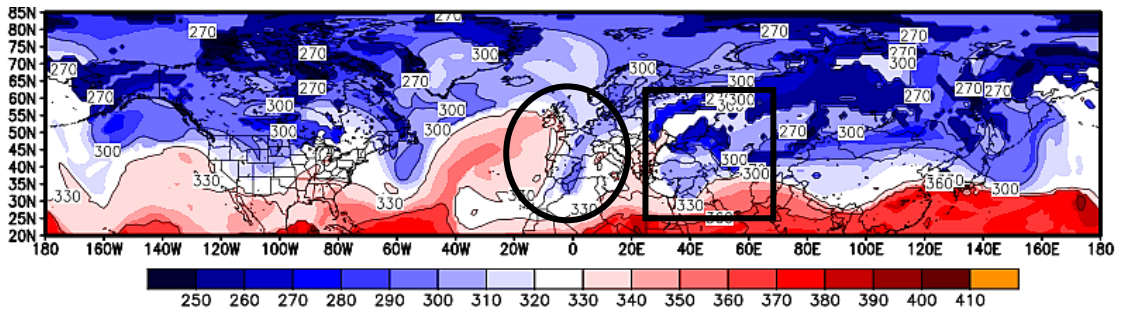


(ب)

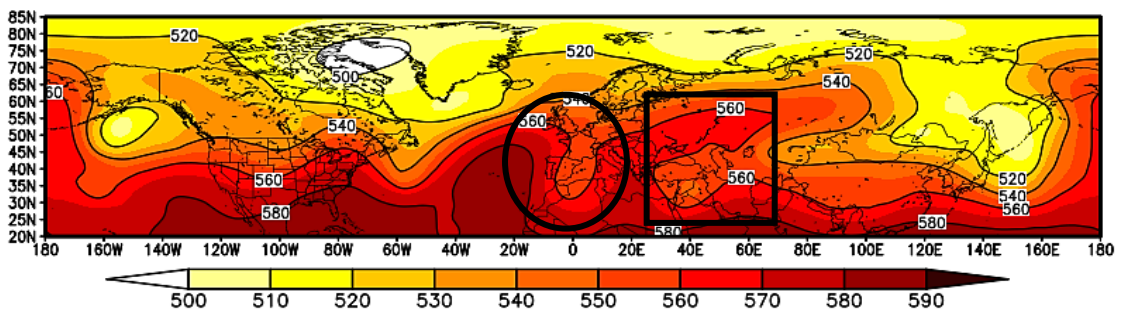
شکل ۵. مانند شکل ۱ اما برای مورد مطالعاتی سوم در ۰۰ UTC روز ۲۷ ژانویه ۲۰۱۸.



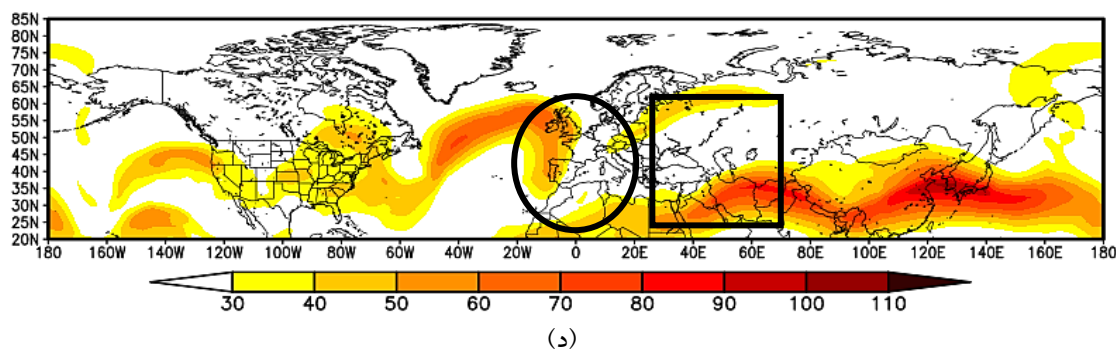
(الف)



(ب)



(ج)



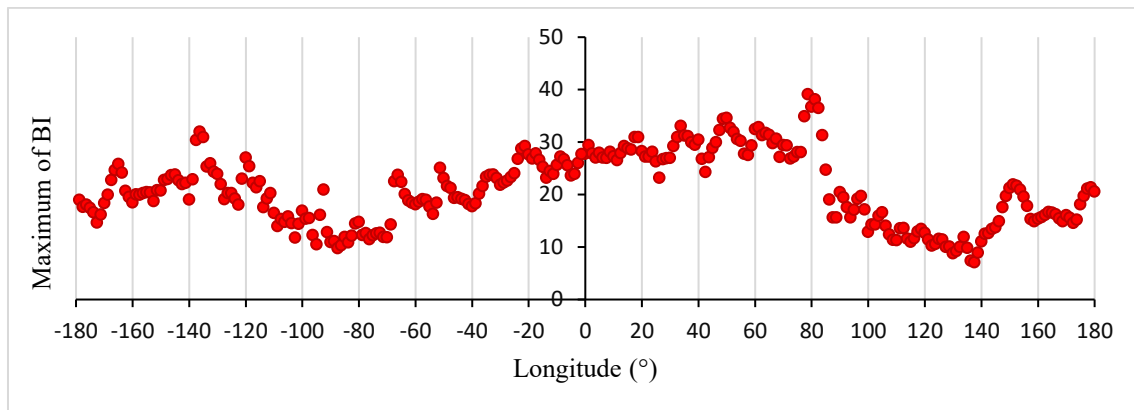
شکل ۶. مانند شکل ۲ اما برای مورد مطالعاتی سوم در UTC ۰۰ روز ۲۷ ژانویه ۲۰۱۸.

### ۲-۳. تحلیل آماری

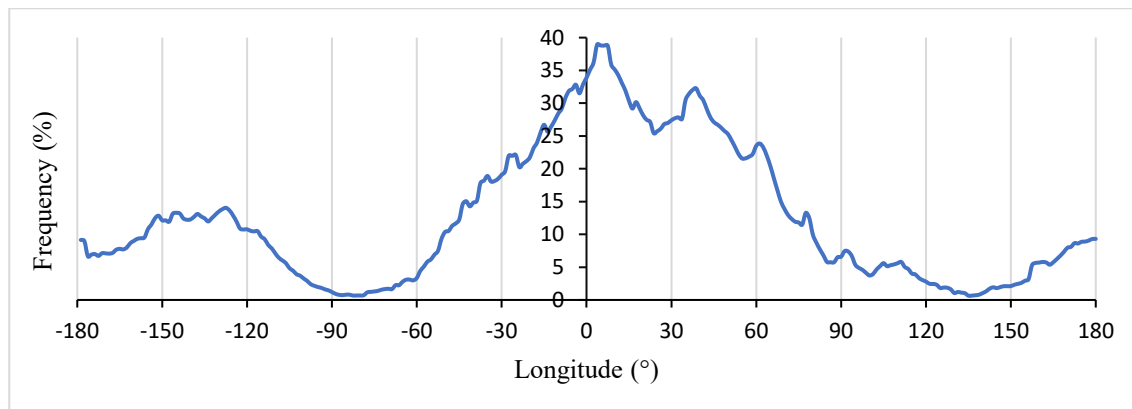
پس از اطمینان از درستی کاربست روش PH و تطابق نتایج آن با وضعیت همدیدی در شناسایی انواع شکست موج راسبی، در این بخش تحلیل آماری توزیع شکست موج راسبی و انواع آن طی دوره ۱۹۵۸ الی ۲۰۲۳ ارائه می‌شود. بدین منظور، ابتدا بیشینه مقدار  $BI$  در هر طول جغرافیایی برای فصل زمستان طی دوره مورد مطالعه در شکل ۷-الف نشان داده شده است. مطابق شکل، بیشترین مقادیر در محدوده ۲۰ درجه غربی تا ۸۰ درجه شرقی دیده می‌شوند که می‌تواند موقعیت وقوع چرخندها را در این فصل نشان دهد. یک بیشینه نسبی  $BI$  نیز در محدوده ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه غربی وجود دارد که منطبق بر سواحل شرقی اقیانوس آرام است. این دو منطقه منطبق بر مسیرهای توفان اطلس و آرام هستند که با افزایش فعالیت چرخندها و انرژی جنبشی پیچکی همراه هستند. همچنین بیشینه  $BI$  با مقدار ۳۹/۱ در ۷۸/۷۵ درجه شرقی دیده می‌شود. به طور کلی، بیشینه مقادیر  $BI$  در طول جغرافیایی حدود ۸۰ درجه شرقی و کمینه مقادیر آن در حدود ۱۴۰ درجه شرقی با مقدار ۷/۱ و سپس در حدود ۹۰ درجه غربی قرار دارند. وقوع کمینه‌ها نیز در شرق قاره‌های آسیا و آمریکا و در محدوده بین ۱۳۰ تا ۱۴۰ درجه شرقی و ۸۰ تا ۱۰۰ درجه غربی مشاهده می‌شود. این نتیجه با کاهش فعالیت سامانه‌های همدیدی طی فصل زمستان در شرق قاره‌ها مطابقت دارد.

درصد فراوانی  $BI$  بر اساس نسبت تعداد رخداد در هر طول جغرافیایی به کل موارد تعیین شده، در شکل ۷-ب آورده

شده است. مطابق شکل، بیشترین فراوانی نسبی رخداد  $BI$  در محدوده طول جغرافیایی ۲ تا ۴ درجه شرقی با حدود ۳۹ درصد دیده می‌شود. همچنین یک بیشینه نسبی دیگر در محدوده ۳۰ تا ۴۰ درجه شرقی قرار دارد که منطبق بر شرق دریای مدیترانه و دریای سیاه است (شکل ۷-ب). کمینه‌های درصد فراوانی  $BI$  نیز در حدود ۱۳۵ درجه شرقی و ۸۲ درجه غربی با مقدار کمتر از یک درصد قابل شناسایی هستند. به طور کلی می‌توان گفت بیشترین فراوانی در فصل زمستان مربوط به شرق مسیرهای توفان اطلس و آرام است. لازم به ذکر است، پلی و هاسکینز (۲۰۰۳) درصد فراوانی رخداد بن‌دال را با استفاده از  $BI$  به تفکیک فصل طی دوره ۵ ساله ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۱ بررسی و بیان کردند که بیشینه درصد رخداد بن‌دال در فصل زمستان بین ۲۰ درجه غربی تا ۴۵ درجه شرقی واقع است. الگوی کلی و موقعیت‌های کمینه و بیشینه رخداد بن‌دال شناسایی شده در مطالعه پلی و هاسکینز (۲۰۰۳) مطابقت خوبی با شکل ۷-ب دارد. آنها همچنین فراوانی رخداد شکست موج بر روی اقیانوس آرام را حدود ۱۰ درصد ذکر کردند که این نتیجه نیز با شکل ۷-ب تطابق دارد. اما دو مورد تفاوت در بیشینه و کمینه درصد فراوانی دیده می‌شود؛ بیشینه درصد فراوانی در کار پلی و هاسکینز (۲۰۰۳) حدود ۲۷ درصد و کمینه آن بین ۳ تا ۵ درصد موارد است. علت این تفاوت می‌تواند مربوط به دوره ۵ ساله مورد مطالعه و روش تعریف وقوع بن‌دال باشد که در مطالعه مذکور رخداد  $BI$  به مدت چهار روز به‌عنوان بن‌دال در نظر گرفته شده بود.



(الف)



(ب)

شکل ۷. توزیع (الف) بیشینه و (ب) درصد فراوانی  $BI$  برحسب طول جغرافیایی برای فصل زمستان طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۳.

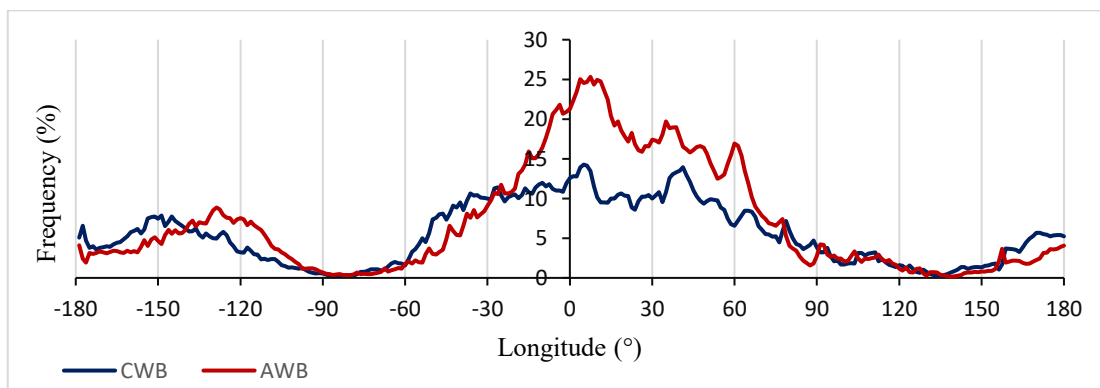
مطالعه گیون و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد. غلبه فراوانی  $AWB$  نسبت به  $CWB$  با اختلاف کمتر در محدوده ۱۳۵ درجه غربی تا ۹۵ درجه غربی منطبق بر شرق اقیانوس آرام و نیمه غربی قاره آمریکا نیز دیده می‌شود. این در حالی است که تاهوونن و رایسانن (۲۰۲۴) نیز این دو بیشینه فراوانی  $AWB$  را در مناطق مذکور (از ۶۰ درجه غربی تا ۱۲۰ درجه شرقی و ۹۰ درجه غربی تا ۱۸۰ درجه غربی) گزارش کرده‌اند. آنها همچنین اظهار داشتند که بیشینه درصد شکست موج در زمستان منطقه اطلس و اوراسیا در محدوده صفر درجه قرار دارد. ترلیس و هاسکینز (۲۰۰۸) نیز این مناطق (شرق اقیانوس اطلس، اروپا، نیمه غربی آسیا، شرق اقیانوس آرام و نیمه غربی قاره آمریکا) را به‌عنوان مناطق متداول وقوع بندال و غرب اقیانوس‌های اطلس و آرام را به‌عنوان مناطق کمینه نام برده‌اند. علاوه بر این، این نتیجه با مطالعه ماساتو و همکاران (۲۰۱۳) که موقعیت رخداد بندال عرض‌های میانی را اروپا، آسیا و غرب آمریکای

شکست موج راسبی با فرض مثبت بودن  $BI$ ، بر مبنای علامت منفی و مثبت  $DB$  به‌ترتیب به دو دسته  $CWB$  و  $AWB$  تقسیم می‌شود. درصد فراوانی هر دو دسته برای فصل زمستان طی دوره مورد مطالعه از نسبت تعداد رخدادها در هر طول جغرافیایی به کل رخدادها محاسبه شده و نتایج در شکل ۸ ترسیم شده است. مطابق شکل، رخداد  $AWB$  نسبت به  $CWB$  در مناطق شرق اقیانوس اطلس، اروپا و تا مرکز آسیا یعنی از حدود ۲۰ درجه غربی تا ۸۰ درجه شرقی غالب است. بیشینه  $AWB$  در این مناطق ۲۵ درصد و بیشینه  $CWB$  برابر ۱۴ درصد است که مکان بیشینه هر دو نوع شکست بین ۲ تا ۱۰ درجه شرقی قرار دارد. همچنین یک بیشینه نسبی در همین ناحیه در طول جغرافیایی ۳۲ تا ۴۵ درجه شرقی دیده می‌شود که می‌تواند در ارتباط با مسیر توفان مدیترانه باشد. به طور کلی درصد موارد رخداد  $AWB$  در شرق اطلس، اروپا و نیمه غربی آسیا طی فصل زمستان به وضوح بیشتر از  $CWB$  است (شکل ۸) که با نتیجه

که بندال به‌ندرت رخ می‌دهد. در این ارتباط، تا کمورا و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده‌اند این مناطق در تابستان (ژوئیه و اوت) شکست موج بیشتری را نسبت به سایر نقاط تجربه می‌کنند. همچنین مطابق نتایج آنها، درصد موارد رخداد AWB از CWB طی این ماه‌ها بیشتر است. جینگ و بنرجی (۲۰۱۸) نیز با بررسی شکست موج طی ۳۵ سال، نتیجه گرفتند که اوج فعالیت شکست موج راسی در زمستان بوده و تعداد رویدادهای AWB به وضوح بیشتر از CWB است. به‌علاوه، آنها با بررسی تاوایی مطلق بر روی تراز ۳۳۰ کلون نشان دادند بیشترین رویداد AWB طی زمستان بر روی شرق اقیانوس اطلس شمالی و شرق اقیانوس آرام شمالی روی می‌دهد و درصد فراوانی CWB در زمستان بر روی آرام از اطلس بیشتر است. همه این موارد با نتایج شکل ۸ تطابق دارد. طبق مطالعه آنها بیشترین فراوانی نسبی AWB در اطلس شمالی ۵ درصد و بیشترین فراوانی نسبی CWB بر روی آرام شمالی ۱/۲ درصد است. دلیل این اختلاف احتمالاً آن است که در کار آنها شکل دوبعدی شاخص‌ها در نظر گرفته شده است. در همین راستا نتیجه مطالعه لاچات و همکاران (۲۰۲۴) که ۴۰ سال داده ERA5 را بررسی کردند نیز با نتایج پژوهش حاضر هماهنگ است. نتایج آنها نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی AWB واقع بر نیمه شرقی اقیانوس اطلس، اروپا، سواحل غربی اقیانوس آرام و غرب قاره آمریکا است، در حالی که بیشترین فراوانی CWB بر روی اقیانوس آرام و غرب اقیانوس اطلس رخ می‌دهد.

شمالی ذکر کردند، مطابقت دارد. در مطالعه‌ای دیگر، دوریس و همکاران (۲۰۲۴) بیان کردند که شکست موج راسی استواسو در شکل‌گیری بارش در جریان‌سوی مسیر توفان عرض‌های میانی که بیشتر مناطق خشک جهان در آن قرار دارند، نقش مهمی دارد. به عبارت دیگر، همبستگی معنی‌دار بین توزیع بارش و توزیع شکست موج راسی تأیید شد. در این خصوص بر اساس نتایج مطالعه ماساتو و همکاران (۲۰۱۲)، حالت AWB بیشتر بر روی خشکی‌ها و عمدتاً در اوراسیا دیده شده است، در حالی که حالت CWB بیشتر بر روی دریاها رخ می‌دهد. همچنین آنها نشان دادند که حالت CWB یک بیشینه بر روی اروپا، یکی بر روی آسیا و دو بیشینه بر روی اقیانوس آرام دارد که با شکل ۸ سازگار است. با این حال، در نتایج آنها فراوانی رخداد AWB در ۱۵۰ درجه شرقی و ۵۰ درجه غربی تقریباً صفر است و CWB نیز یک بیشینه نسبی دارد که با شکل ۸ متفاوت است.

از طرفی مطابق شکل ۸، CWB در مرکز و غرب اقیانوس‌های اطلس و آرام چیرگی دارد که البته تفاوت در اینجا بسیار کمتر از مورد AWB است. بدین ترتیب، تطابق خوبی با نتایج ماساتو و همکاران (۲۰۱۳) که چیرگی فراوانی CWB را در شمال غرب اقیانوس اطلس و اقیانوس آرام ذکر کردند، دیده می‌شود. برای منطقه شرق آسیا و شرق قاره آمریکا می‌توان گفت که تعداد موارد رخداد AWB و CWB در فصل زمستان برابر هم و کمتر از دیگر مناطق است (شکل ۸). ماساتو و همکاران (۲۰۱۳) نیز مناطق ذکر شده را به‌عنوان مناطقی در نظر گرفتند



شکل ۸ درصد فراوانی شکست موج واچرخندی (AWB؛ خط قرمز) و چرخندی (CWB؛ خط آبی) برحسب طول جغرافیایی طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۳.

موارد رخداد هر دو دسته شکست موج چرخندی در شرق اطلس تقریباً برابر است و اندکی چیرگی در فراوانی رخداد CBW دیده می‌شود.

بر اساس مطالعه ماساتو و همکاران (۲۰۱۲)، همخوان با شکل ۹، دو نوع بندال واچرخندی گرم و سرد بر روی اروپا دارای بیشینه رخداد هستند. همچنین آنها گزارش کرده‌اند که فراوانی رخداد بندال همبسته با CBW در غرب اقیانوس آرام بر بقیه موارد غلبه دارد و در مرکز آرام و اطلس، فراوانی بندال همبسته با شکست چرخندی غالب است که موارد گرم آن از سرد بیشتر است. شایان ذکر است که توزیع ارائه شده در شکل ۹ این نتیجه را تأیید نمی‌کند. در ادامه ماساتو و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که بر روی اقیانوس آرام، ABW مقادیر مطلق بزرگ‌تری از DB و RI دارد. بر روی قطاع اروپا-اطلس نیز بندال همبسته با ABC دارای ماندگاری بیشتری نسبت به بندال همبسته با ABW است. به‌علاوه، در ABW مقدار DB سریع‌تر به صفر همگرا می‌شود، در حالی که ABC در نواحی DB مثبت دسته‌بندی می‌شود.

رخدادهای شکست موج راسبی طی دوره مورد مطالعه از نظر شدت به سه دسته ضعیف (W)، متوسط (M) و قوی (S) تقسیم و درصد فراوانی رخداد هر دسته برحسب طول جغرافیایی در شکل ۱۰ ارائه شده است. مطابق شکل، درصد فراوانی رخداد شکست موج قوی تقریباً در همه طول‌های جغرافیایی اندکی بیشتر از شکست موج ضعیف است. به‌طور کلی، با توجه به درصد فراوانی، قوی‌ترین شکست‌ها در محدوده شرق اقیانوس اطلس، اروپا و غرب آسیا رخ داده‌اند (شکل ۱۰). بیشینه رخداد برای هر سه دسته بر روی ۰ تا ۱۰ درجه شرقی و منطبق بر شرق اقیانوس اطلس و غرب اروپا قرار دارد. بیشینه فراوانی نسبی برای شکست موج قوی حدود ۶ درصد در طول جغرافیایی ۵ و ۶ درجه شرقی، و برای شکست موج ضعیف کمتر از ۶ درصد در همان محدوده جغرافیایی قابل شناسایی است. بیشینه فراوانی نسبی شکست موج متوسط نیز در این محدوده با مقداری حدود ۲۶ درصد است (شکل ۱۰). جینگ و بنرجی (۲۰۱۸) نیز نشان دادند که قوی‌ترین موارد شکست موج در نیمکره

رخدادهای شکست موج بر مبنای علامت هم‌زمان DB و RI به چهار حالت شامل دو حالت واچرخندی ABW و ABC و دو حالت چرخندی CBW و CBC تقسیم شده‌اند که درصد فراوانی آنها به ترتیب در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب آورده شده است. مطابق شکل ۹-الف، رخدادهای ABW فراوانی نسبی بیشتری از ABC دارند و بیشترین رخداد هر دو حالت در طول جغرافیایی ۳۰ درجه غربی تا ۶۰ درجه شرقی است. همچنین بیشترین فراوانی نسبی رخداد ABW حدود ۱۳ درصد و ABC حدود ۱۲ درصد بوده و هر دو بیشینه در بازه طول جغرافیایی ۸ تا ۱۱ درجه شرقی روی داده‌اند. یک بیشینه نسبی ABW نیز در طول جغرافیایی ۱۱۰ تا ۱۳۵ درجه غربی منطبق بر شرق اقیانوس آرام دیده می‌شود که حدود ۶ درصد کل موارد بوده و در مقایسه با ABC بیشتر است. در دو منطقه فوق که منطبق بر سواحل شرقی اقیانوس اطلس، اروپا، غرب آسیا و شرق اقیانوس آرام است، انتظار شکست موج و شکل‌گیری سامانه‌های جوی طی فصل سرد واقع بر فعالیت مسیرهای توفان در فصل زمستان وجود دارد.

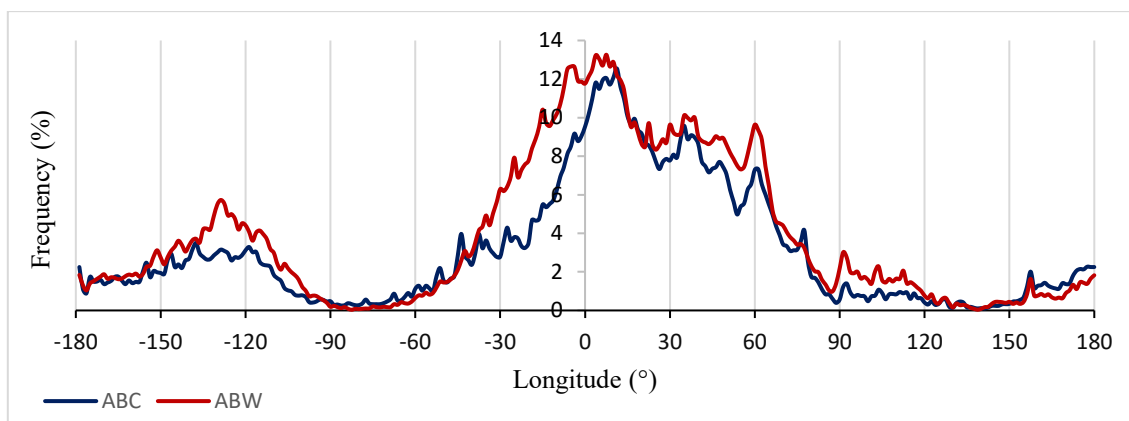
شکل ۹-ب دو نوع شکست موج چرخندی را نشان می‌دهد که مطابق آن، بیشینه هر دو حالت CBC و CBW با حدود ۷ درصد موارد در حوالی ۰ تا ۷ درجه شرقی قرار دارد. در هر دو نوع شکست، بیشینه دیگری در طول جغرافیایی ۳۶ تا ۴۲ درجه شرقی دیده می‌شود که منطبق بر شرق دریای مدیترانه است. همچنین یک بیشینه نسبی برای CBC در محدوده ۳۰ تا ۴۵ درجه غربی قابل شناسایی است. بیشینه نسبی دیگر برای CBC، در محدوده ۱۴۰ تا ۱۵۵ درجه غربی و ۱۷۰ تا ۱۸۰ درجه شرقی واقع است. حالت CBW نیز در ناحیه ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه غربی یک بیشینه نسبی با مقادیر کمتر دارد.

به‌علاوه نتایج نشان می‌دهد درصد رخداد موارد ABW و ABC در غرب اقیانوس اطلس تقریباً برابر بوده و ABC اندکی بیشتر است، اما در مرکز و شرق آن، درصد موارد ABW به وضوح بیشتر است (شکل ۹-الف). این درحالی است که شکل ۹-ب افزایش درصد موارد CBC نسبت به CBW در غرب و مرکز اطلس را نشان می‌دهد. درصد

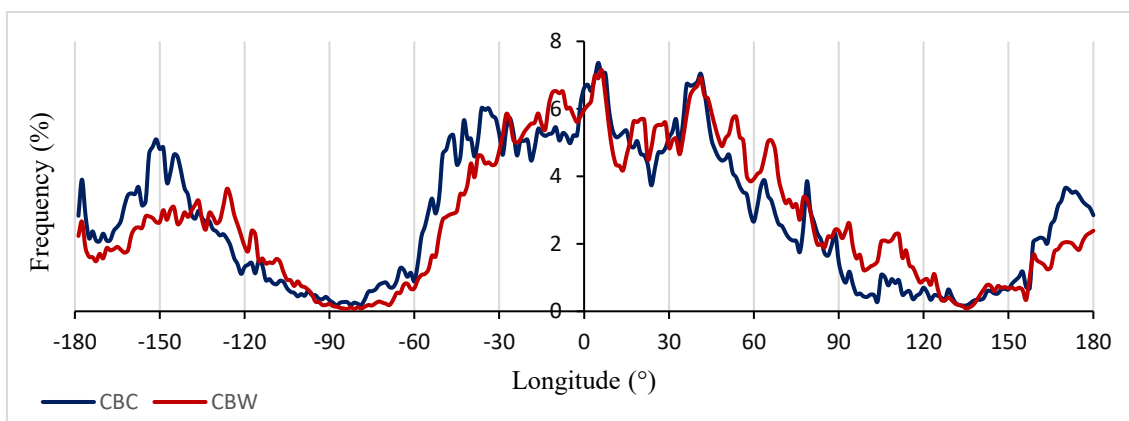
غرب آسیا بود. آنها در نتایج خود بیان کردند که سهم شکست موج واچرخندی متوسط و قوی ۱۷ درصد و سهم شکست چرخندی قوی و متوسط ۲۰ درصد است. این نتایج با شکل ۱۰ همخوانی ندارد که علت تفاوت می‌تواند به نوع طبقه‌بندی شکست موج مربوط باشد که نیاز به بررسی بیشتر در آینده دارد.

شمالی بر روی شرق اطلس و شمال غرب اروپا روی می‌دهد که با شکل ۱۰ تطابق دارد.

خدادی و همکاران (۱۳۹۹) نیز شکست‌های موج را با استفاده از شاخص فعالیت موج و داده‌های ECMWF برای زمستان ۴۰ سال بررسی و آنها را به ضعیف، متوسط و قوی تقسیم کردند. ناحیه مورد بررسی از غرب اقیانوس اطلس تا

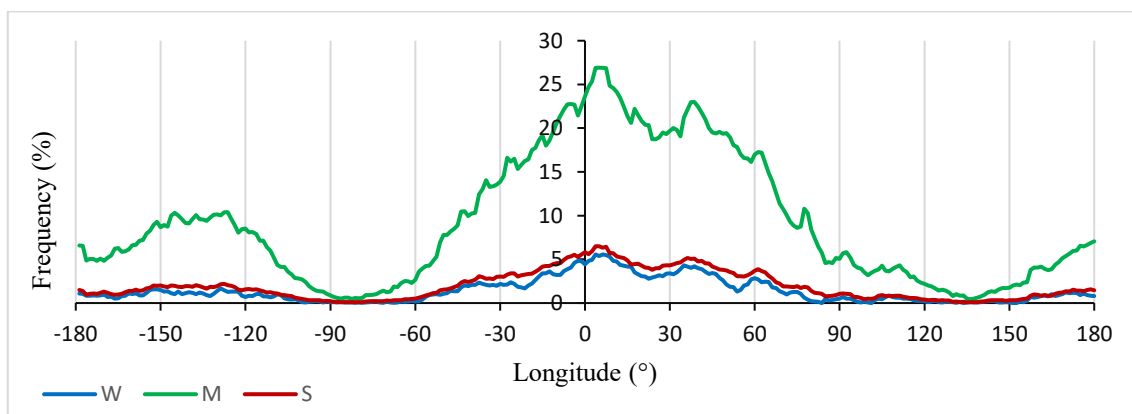


(الف)



(ب)

شکل ۹. درصد فراوانی شکست موج واچرخندی با نفوذ هوای گرم (الف) گرم (ABW؛ خط قرمز) و سرد (ABC؛ خط آبی)، و چرخندی با نفوذ هوای گرم (ب) گرم (CBW؛ خط قرمز) و سرد (CBC؛ خط آبی) برحسب طول جغرافیایی طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۳.



شکل ۱۰. درصد فراوانی BI ضعیف (W؛ خط آبی)، متوسط (M؛ خط سبز) و قوی (S؛ خط قرمز) برحسب طول جغرافیایی طی دوره ۱۹۵۸ تا

## ۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

موج رخ داده است، نفوذ PV با مقادیر ۸-۴ PVU و  $\theta$  با مقادیر ۲۶۰ تا ۳۱۰ کلوین دیده می‌شود. به علاوه، جریان جتی که در مجاورت این شکست‌ها قرار دارد، سرعتی بین ۵۰ تا ۸۰ متربرثانیه دارد. خدادی و همکاران (۱۳۹۹) نیز مقادیر نفوذ PV را ۸-۴ PVU و مقدار باد را بین ۶۰ تا ۷۰ متربرثانیه بیان کردند. در هر دو مورد مطالعاتی دوم و سوم که برف شدید بر روی بخش‌هایی از ایران روی داده است، شکست موج از نوع واچرخندی حاکم بوده است.

بررسی توزیع فراوانی BI در زمستان دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی آن، هماهنگ با نتایج پیشین همچون پلی و هاسکینز (۲۰۰۳)، مربوط به شرق مسیرهای توفان اطلس و آرام است. همچنین نتایج بررسی دو حالت CWB و AWB نشان‌دهنده چیرگی رخداد AWB در شرق اقیانوس اطلس، اروپا و تا مرکز آسیا است. این چیرگی در شرق اقیانوس آرام و نیمه‌غربی قاره آمریکا نیز دیده می‌شود که با نتایج مطالعات ترلیس و هاسکینز (۲۰۰۸)، ماساتو و همکاران (۲۰۱۲)، ماساتو و همکاران (۲۰۱۳)، گیون و همکاران (۲۰۲۱)، لاجات و همکاران (۲۰۲۴) و تاهوونن و رایسانن (۲۰۲۴) مطابقت دارد. در مرکز و غرب اقیانوس‌های اطلس و آرام، حالت CWB غالب است. به علاوه، درصد موارد رخداد CWB و AWB در فصل زمستان برای منطقه شرق آسیا و شرق قاره آمریکا برابر هم و کمتر از دیگر مناطق است.

نتایج بررسی آماری انواع شکست موج طی دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که درصد موارد AWB در دو منطقه سواحل شرقی اقیانوس اطلس، اروپا، غرب آسیا و شرق اقیانوس آرام که منطقه اثر مسیر توفان در فصل زمستان است، از ABC بیشتر است. رخداد هر دو حالت ABC و AWB در مرکز و غرب اقیانوس اطلس تقریباً برابر است، اما AWB‌ها در شرق آن بیشتر هستند. هر دو حالت شکست چرخندی CBC و CBW دارای دو بیشینه، یکی در غرب اروپا و دیگری در شرق دریای مدیترانه هستند. رخداد CBC در غرب و مرکز اطلس نسبت به حالت CBW،

این پژوهش با هدف بررسی توزیع شکست موج راسبی با استفاده از روش PH انجام گرفته است. بدین‌منظور، شاخص شکست (BI) همراه با دو کمیت جهت شکست (DB) و شدت شکست (RI) موج راسبی بر مبنای فرمول‌بندی پلی و هاسکینز (۲۰۰۳) و ماساتو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های JRA-55 برای فصل زمستان دوره زمانی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۳ محاسبه شده است. از این کمیت‌ها برای شناسایی چهار نوع شکست واچرخندی و چرخندی موج راسبی شامل ABC، ABW، CBW و CBC استفاده شد. سپس، ارزیابی کاربست روش PH برای شناسایی رخداد‌های شکست موج راسبی در سه مورد مطالعاتی ۸ فوریه ۱۹۵۹، ۶ ژانویه ۲۰۰۸ و ۲۷ ژانویه ۲۰۱۸ انجام شد. بدین‌منظور، توزیع کمیت‌های PV در تراز دمای پتانسیلی ۳۳۰ کلوین،  $\theta$  بر روی وردایست، ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa و سرعت باد در تراز hPa ۲۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند.

ارزیابی درستی کاربست روش PH در شناسایی انواع شکست موج در سه مطالعه موردی نشان می‌دهد که شکست موج منطبق بر مناطق BI مثبت رخ می‌دهد. همچنین جهت و شدت شکست موج با کمک DB و RI در مناطقی که مقدار آنها نزدیک به صفر نبود، به‌خوبی شناسایی شد. در مورد مطالعاتی اول، مقدار BI در طول جغرافیایی ۳ تا ۳۸ درجه شرقی از مقدار میانگین خیلی بیشتر بوده اما در بقیه نقاط برابر یا زیر مقدار میانگین است. در مورد مطالعاتی دوم، بیشتر مقادیر BI زیر مقدار میانگین در این نقاط هستند و به‌طور کلی مقدار BI در حدود یک سوم نقاط بیشتر از میانگین است. در مورد مطالعاتی سوم هم، در بخش مهمی از حوزه مطالعاتی بیش از نیمی از نقاط دارای BI بیشتر از میانگین هستند. با بررسی سه مطالعه موردی و مطابق انتظار، هر چه مقدار RI بیشتر باشد، واژگونی پرندهای  $\theta$  بیشتر و اختلاف با میانگین هم بیشتر است. همچنین در این نواحی، گرادیان ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز بیشتر است. در مناطقی که شکست

گرم اندکی بر متناظر آن با نفوذ توده‌های سرد فراوانی رخداد بیشتری دارد. با وجود عملکرد مناسب روش PH در شناسایی شکست امواج، استفاده از روش‌های دیگر، مانند روش‌های مبتنی بر توزیع شار فعالیت موج با فرمول‌بندی‌های مختلف، می‌تواند در مطالعات پیش‌رو در راستای یافتن توزیع هرچه دقیق‌تر شکست موج تا نیل به یک روش بهینه و کاربردی بسیار مفید باشد.

#### مراجع

خدادی، م. م.؛ آزادی، م.؛ مرادی، م. و رنجبر سعادت‌آبادی، ع. (۱۳۹۹). مقایسه شکست امواج راسبی روی اروپا و غرب آسیا از دیدگاه فعالیت موج، مجله ژئوفیزیک ایران، ۲، ۸۳-۱۰۱.

خان‌سالاری، س.؛ محب‌الحجه، ع. ر. و احمدی‌گیوی، ف. (۱۳۹۷). عوامل دینامیکی موثر بر بارش سنگین برف در تهران: مطالعه موردی، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱، ۱۷۹-۱۹۸.

- Azarm, K., Mohebalhojeh, A. R., & Mirzaei, M. (2023). The changes in dynamical tropopause associated with the Euro-Atlantic and West-Asia atmospheric blocking. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 102, 101361.
- Berrisford, P., Hoskins, B. J., & Tyrllis, E. (2007). Blocking and Rossby wave breaking on the dynamical tropopause in the Southern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(8), 2881-2898.
- de Vries, A. J. (2021). A global climatological perspective on the importance of Rossby wave breaking and intense moisture transport for extreme precipitation events. *Weather and Climate Dynamics*, 2(1), 129-161.
- de Vries, A. J., Armon, M., Klingmüller, K., Portmann, R., Röthlisberger, M., & Domeisen, D. I. V. (2024). Breaking Rossby waves drive extreme precipitation in the world's arid regions. *Communications Earth and Environment*, 5(1), 493.
- Esler, J. G., & Haynes, P. H. (1999). Baroclinic wave breaking and the internal variability of the tropospheric circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(23), 4014-4031.
- Gharib, A., Mirzaei, M., Ahmadi-Givi, F., & Mohebalhojeh, A. R. (2024). Analysis of the mesoscale structure of moist potential vorticity

افزایش نشان می‌دهد. بیشترین درصد رخداد CBW در شرق اقیانوس آرام و غرب آسیا و بیشینه درصد رخداد CBC در غرب اقیانوس اطلس و غرب اقیانوس آرام دیده می‌شود. درصد رخداد CBW در شرق آسیا و CBC در غرب اقیانوس اطلس و اقیانوس آرام از دیگر مناطق بیشتر است. این نتایج با مطالعات ماساتو و همکاران (۲۰۱۲) و (۲۰۱۳) همخوانی دارد. به‌علاوه، رویدادهای شکست موج به سه دسته ضعیف، متوسط و قوی تقسیم شد. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً تعداد رخداد شکست موج قوی در همه طول‌های جغرافیایی اندکی بیش از شکست موج ضعیف است و بیشینه این رخدادها سازگار با نتایج جینگ و بنرجی (۲۰۱۸) بر روی شرق اقیانوس اطلس و غرب اروپا قرار دارد.

در نهایت، تا آنجا که به سامانه‌های همدیدی موثر بر ایران مربوط می‌شود، شکست و اچرخندی بر روی بخش بزرگی از پادجریان سوی کشور تا میانه‌های اطلس، نوع غالب شکست موج راسبی است. در این میان، شکست و اچرخندی با غلبه نفوذ توده‌های

- during an extreme event of snowstorm in Tehran. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 107, 101479.
- Givon, Y., Keller Jr., D., Silverman, V., Pennel, R., Drobinski, P., & Raveh-Rubin, S. (2021). Large-Scale Drivers of the Mistral Wind: Link to Rossby Wave Life Cycles and Seasonal Variability. *Weather and Climate Dynamics*, 2(3), 609-630.
- 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.
- Jing, P., & Banerjee, S. (2018). Rossby wave breaking and isentropic stratosphere-troposphere exchange during 1981-2015 in the Northern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9011-9025.
- LaChat, G., Bowley, K. A., & Gervais, M. (2024). Diagnosing flavors of tropospheric Rossby wave breaking and their associated dynamical and sensible weather features. *Monthly Weather Review*, 152(2), 513-530.
- Martius, O., Schwierz, C., & Davies, H. C. (2007). Breaking waves at the tropopause in the wintertime Northern Hemisphere: Climatological analyses of the orientation and

- the theoretical LC1/2 classification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(7), 2576–2592.
- Masato, G., Hoskins, B. J., & Woollings, T. (2013). Wave-Breaking Characteristics of Northern Hemisphere Winter Blocking: A Two-Dimensional Approach. *Journal of Climate*, 26(13), 4535–4549.
- Masato, G., Hoskins, B. J., & Woollings, T. (2012). Wave-breaking characteristics of midlatitude blocking. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138(666), 1285–1296.
- Pelly, J. L., & Hoskins, B. J. (2003). A new perspective on blocking. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(5), 743–755.
- Peters, D., & Waugh, D. W. (1996). Influence of barotropic shear on the poleward advection of upper-tropospheric air. *Journal of Atmospheric Sciences*, 53(21), 3013–3031.
- Pinault, J. L. (2022). A review of the role of the oceanic Rossby waves in climate variability. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4), 493.
- Schönenberger, V. P. (2021). Quantifying the effect of recurrent Rossby wave patterns on extremely hot summers in present-day and end-of-the-century climate. Master's thesis, ETH Zurich.
- Shi, N., & Nakamura, H. (2021). A new detection scheme of wave-breaking events with blocking flow configurations. *Journal of Climate*, 34(4), 1467–1483.
- Tahvonen, S. L., & Räisänen, D. J. (2024). Impact of warming sea surface temperature on anticyclonic Rossby wave breaking during Northern Hemisphere winter and summer (Doctoral dissertation, Master's thesis, University of Helsinki, <http://hdl.handle.net/10138/589282>, 49 pp).
- Takemura, K., Mukougawa, H., & Maeda, S. (2020). Large-scale atmospheric circulation related to frequent Rossby wave breaking near Japan in boreal summer. *Journal of Climate*, 33(15), 6731–6744.
- 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(509), 17–55.
- Tyrlis, E., & Hoskins, B. J. (2008). Aspects of a Northern Hemisphere atmospheric blocking climatology. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(5), 1638–1652.
- Zhang, G., Murakami, H., Cooke, W.F. et al. (2021). Seasonal predictability of baroclinic wave activity. *npj Clim. Atmos. Sci.*, 4, 50.