

The Study of the Characteristics of the Spring Season Cyclogenesis in Different Phases of the Madden-Julian in Mediterranean Region

Teymouri, M.¹  | Salahi, B.¹  | Nasr Esfahani, M. A.²  | Alimohammadi, M.³ 

1. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2. Department of Hydraulic Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Imam Khomeini University of Marine Sciences, Nowshahr, Iran.

Corresponding Author E-mail: bromand416@yahoo.com

(Received: 16 Oct 2024, Revised: 18 Nov 2024, Accepted: 29 April 2025, Published online: 10 June 2025)

Summary

The MJO is the dominant mode of sub-seasonal variability in tropical and subtropical regions and plays a crucial role in the atmosphere-ocean circulation system. Numerous studies have investigated the effects of the Madden-Julian Oscillation on precipitation and temperature. In Iran, this phenomenon has also attracted attention, and several studies have been conducted to assess its impact on the country's climate variations. However, historical reviews show that the predictive use of this phenomenon has been less emphasized. Moreover, the MJO significantly affects the behavior of cyclones in the region, and the annual phase changes of the MJO have substantial impacts on the distribution, movement tracking, and intensity of cyclones entering Iran. In this study, to examine the cyclogenesis conditions during different phases of the Madden-Julian Oscillation (MJO) in the Mediterranean region during the warm season (March, April, and May), MJO, OLR index data and Mean sea level pressure data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA5 section between 1989 and 2020 were utilized. Cyclogenesis characteristics in three aspects—frequency, depth, and cyclone tracking—were analyzed using the Melbourne University Cyclone Detection and Tracking Algorithm. In this analysis, days with MJO occurrences having an amplitude of 0.75 or higher, and phases one through eight where this amplitude was consecutively maintained, were extracted as the study period. Due to the limited number of selected periods based on the mentioned conditions, phases that missed one cycle were also included, resulting in 34 selected periods for the warm season overall. Filters were applied to the extracted data using the Melbourne University algorithm, including: a) Only cyclones located within the defined spatial and temporal boundaries (10-55°E / 10-45°N, during 1989-2020) were considered. b) Cyclones lasting less than 24 hours (four time steps: 00:00, 06:00, 12:00, 18:00) were excluded. c) Cyclones identified over multiple time steps (assigned identical numbers) were reviewed, and only the instance with the lowest recorded pressure was considered. d) The median pressure during selected days of different phases was calculated, with the maximum surface pressure of 1005.8 hPa for the warm season. The study of OLR indicates that in phases 1, 2 and 7, the most negative OLR anomaly occurs over the Middle East and especially over Iran, which indicates the occurrence of convective currents with cloudiness in different regions of Iran. The study of the characteristics of the cyclones in the region showed that phase 8 with more than 17% has the most and phases 1 and 4 with nearly 9.36% have the lowest cyclogenesis area in the study region. In terms of distribution, out of the 25 cases of minimum pressure in warm season, 17, 6, and 2 cases are related to April, March, and May, respectively. The tracking of the cyclogenesis indicated that in phase 1, most of the cyclogenesis were on the Mediterranean Sea and very few cases were formed in its eastern area. At the same time, in phase 2, along with the formation of cyclones in the eastern Mediterranean, some of them have entered Iran. In phases 3 and 4 in the north and center of Iraq, the cyclones have traveled their path, and in phases 5 and 6, the majority of the cyclones were over the Mediterranean, and in phases 7, they reached their peak, and the majority of the cyclogenesis were in the central to southern regions of Iraq. The formed cyclone in phase 8 over the Mediterranean Sea have a different behavior and at the same time they have traveled longer paths than other cyclones in different phases. The results of examining the cyclogenesis characteristics during the warm season in different phases of the Madden-Julian Oscillation (MJO) over the Mediterranean Sea reveal that the highest negative anomaly of the OLR index occurs in phase 1 of this oscillation, with its primary focus on Iran. The study of cyclogenesis areas indicates that cyclonic activity during the warm period of the year is asymmetrically distributed. In various phases of the MJO, most cyclones during the warm season are concentrated over Iraq and the western and northwestern regions of Iran, while other cyclonic cores form over the southern of the Persian Gulf and the Arabian Peninsula. The findings from the number of cyclogenesis centers show that out of 25 cases of minimum pressure during the warm season, 17 cases occurred in April, 6 in March, and 2 in May. Cyclone tracking in the region revealed that cyclones formed over the Mediterranean Sea travelled longer distances.

Keywords: Convection, Cyclogenesis, Cyclone Tracking, Madden-Julian Oscillation, Mediterranean Region.

Cite this article: Teymouri, M., Salahi, B., Nasr Esfahani, M. A., & Alimohammadi, M. (2025). The Study of the Characteristics of the Spring Season Cyclogenesis in Different Phases of the Madden-Julian in Mediterranean Region. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(1), 247-265. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.383443.1007635>

E-mail: (1) maryamteymouri@uma.ac.ir (2) mnasr@sku.ac.ir (3) mhyar_alimohammadi@yahoo.com



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.383443.1007635>

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

بررسی ویژگی‌های چرخندزایی فصل بهار در فازهای مختلف مادن-جولیان در منطقه مدیترانه

مریم تیموری^۱ | برومند صلاحی^۱ | محمدعلی نصرافیهانی^۲ | مهریار علیمحمدی^۳

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲. گروه مهندسی هیدرولیک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۳. گروه علوم جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، نوشهر، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: bromand416@yahoo.com

(دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲۵، بازنگری: ۱۴۰۳/۸/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۲/۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۳/۲۰)

چکیده

مرکز چرخندزایی دریای مدیترانه، به‌عنوان یکی از مناطق مهم چرخندزایی دنیا در قالب سامانه گردش عمومی جو، نقش مهمی در شکل‌گیری سامانه‌های بارشی ایران دارند. در تحقیق حاضر، ویژگی‌های چرخندزایی مدیترانه در فازهای مختلف مادن-جولیان در فصل بهار مورد بررسی قرار گرفته است. از داده‌های تابش موج‌بلند خروجی (OLR) و میانگین فشار تراز دریا در دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۰ برای ماه‌های مارس، آوریل و می استفاده شد که از پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت اروپا و از محصولات مدل ERA5 به‌دست آمد. روش مورد استفاده در این پژوهش، الگوریتم تشخیص و مسیریابی چرخند دانشگاه ملبورن می‌باشد. نتایج نشان داد که در فازهای ۱، ۲ و ۷، بیشترین بی‌هنجاری منفی OLR بر روی خاورمیانه و به‌خصوص بر روی ایران به وجود آمده که نشان‌دهنده وقوع جریانات همرفتی همراه با ابرناکی در مناطق مختلفی از ایران است. بررسی ویژگی‌های چرخندها در منطقه مدیترانه نشان داد که بیشینه چرخندزایی هم‌زمان با چیرگی فاز ۸ (۱۷٪) و کمینه آن با چیرگی فازهای ۱ و ۴ (۹٪) رخ داده است. از ۲۵ مورد کمینه فشار تشخیص داده شده در دوره مورد مطالعه، ۱۷ مورد مربوط به ماه آوریل، ۶ مورد مربوط به ماه مارس و ۲ مورد مربوط به ماه مه بوده است. مسیریابی چرخندها حاکی از آن بود که در فاز ۱، اغلب چرخندها بر روی دریای مدیترانه بوده و موارد بسیار اندکی در شرق آن تشکیل شده است. در فاز ۲، ضمن تشکیل چرخندها در شرق مدیترانه، برخی از آنها به داخل ایران راه یافته‌اند.

واژه‌های کلیدی: چرخندزایی، مسیریابی چرخند، منطقه مدیترانه، نوسان مادن-جولیان، همرفت.

۱. مقدمه

ویکمن، ۱۹۸۷؛ ژانگ، ۲۰۰۵). این پدیده الگوهای بارش و اقلیمی جهان را به‌طور معناداری تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (لائو و والیسر، ۲۰۱۱؛ ژانگ، ۲۰۱۳). رخداد MJO بر رفتار چرخندها در منطقه ایران نیز تأثیرگذار بوده و با تغییر فازهای MJO در توزیع، مسیر حرکتی و قدرت چرخندهای وارد شده به ایران تأثیر زیادی مشاهده می‌شود (مجلسی راد، ۱۴۰۳). از تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های دو و همکاران (۲۰۲۴) اشاره کرد که با بررسی پدیده MJO از دیدگاه تغییر اقلیم، دریافتند که قابلیت پیش‌بینی این پدیده، عمدتاً به‌دلیل گرمایش حاصل از فعالیت‌های انسانی، در طول قرن گذشته افزایش یافته است

الگوها و شاخص‌های آب‌وهوایی «دور پیوند» بر وضعیت آب‌وهوایی درون فصلی هر منطقه اثرگذار می‌باشند که نوسان مادن-جولیان (MJO) (مادن و جولیان؛ ۱۹۷۱، ۱۹۷۲) یکی از این پدیده‌ها است. مادن-جولیان، نوسان درون فصلی (شکل قالب تغییرپذیری درون فصلی مناطق حاره و برون حاره که در سامانه گردش جو-اقیانوس نقش مهمی را ایفا می‌کند) همراه با یک سیستم همرفتی بزرگ‌مقیاس است که با بسامد زمانی ۹۰-۳۰ روزه به‌سمت شرق با سرعت متوسط حدود ۵ متر بر ثانیه در پهنه‌های گرمسیری اقیانوس هند و اقیانوس آرام غربی در نیمکره شمالی حرکت می‌کند (مادن و جولیان، ۱۹۹۴؛ ناتسون و

استناد: تیموری، مریم؛ صلاحی، برومند؛ نصرافیهانی، محمدعلی و صلاحی، برومند (۱۴۰۴). بررسی ویژگی‌های چرخندزایی فصل بهار در فازهای مختلف مادن-جولیان در منطقه مدیترانه. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۱(۱)، ۲۴۷-۲۶۵. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.383443.1007635>

رایانامه: (۱) maryamteymouri@uma.ac.ir (۲) mnasr@sku.ac.ir (۳) mhyar_alimohammadi@yahoo.com



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.383443.1007635>

خجسته (۱۴۰۰) به بررسی فراوانی ورود چرخندهای مدیترانه به ایران و اثر آنها بر بارش‌های فراگیر ایران پرداختند و دریافتند که هرگاه چرخندهای مدیترانه در مسیر خود از دریای سرخ و سیاه عبور کنند بارش‌های سنگین‌تر با فراوانی بیشتری به وقوع می‌پیوندد.

در رابطه با تأثیر رخداد MJO بر وضعیت جوی نقاط مختلف کره زمین مطالعات متعددی انجام شده است. چاند و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر نوسان مادر-جولیان را بر فعالیت چرخندهای حاره‌ای مناطق فیجی مورد بررسی قرار دادند و نتایج ارتباط قوی را بین این دو نشان داد، به‌طوری‌که فعالیت چرخندهای حاره‌ای در فاز فعال MJO، پنج برابر بیشتر می‌باشد. یولیهاستین و همکاران (۲۰۱۷)، در بررسی خود درباره تأثیر MJO بر بارش روزانه جاوای غربی در طول دوره قبل مانسون و النینو قوی در سال ۲۰۱۵ دریافتند که MJO در دوره شدت خود، در فاز ۴ و ۵ دامنه بارش روزانه جاوای غربی را به‌طور معناداری افزایش داده است که این تأثیر در جنوب آن ۵۰ درصد بیشتر از شمال آن است. جیا و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی تأثیر پدید MJO بر بارش و سیستم‌های چرخندی چین نشان دادند که MJO تأثیر محسوسی بر بارش‌های زمستانه‌ی چین دارد. بدین ترتیب که با قرار گرفتن MJO در فازهای ۲ و ۳ (۶ و ۷)، بارش به شکل چشمگیری بیشتر (کمتر) می‌شود.

در داخل کشور نیز ارتباط بین بارش با رخداد MJO توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. ناظم‌السادات و شاهقلیان (۲۰۱۷) ارتباط بارش‌های سنگین ۹ ایستگاه جنوب غربی ایران را با پدیده MJO در دوره ۱۹۷۵-۲۰۱۱ مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد که بیشتر بارش‌های سنگین با فاز ۸ این پدیده در ارتباط است. در این پژوهش مهم‌ترین الگوهای همدیدی ایجاد کننده بارش‌های سنگین، جبهه سرد روی عربستان سعودی و جبهه گرم روی جنوب غربی ایران تشخیص داده شد که منبع رطوبتی آنها، از بخش‌های شمالی دریای عربی، بخش‌های جنوبی دریای سرخ و خلیج فارس می‌باشد. پوراصغر و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی خود درباره تأثیر فازهای مختلف پدیده مادر-جولیان بر بارش‌های

و انتظار می‌رود که این روند ادامه یابد و منجر به پیش‌بینی‌های MJO با پیامدهای قابل توجهی برای پیش‌بینی آب‌وهوای جهانی شود. مایلر و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی اثر MJO بر فراوانی وقوع گردبادها و بارش تگرگ در نتیجه تشکیل چرخندهای قوی پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که وقوع MJO با تأخیری ۳ الی ۴ هفته‌ای سبب افزایش منطقه‌ای و اگرایی فوقانی بر روی آمریکا شده است و همچنین همبستگی مثبتی با افزایش فراوانی این دو مخاطره با تأخیرهای زمانی در منطقه به ثبت رسیده است.

مراکز چرخندزای عرض‌های میانی در تعیین اقلیم و هوای این مناطق نقش کلیدی را دارند و به‌دلیل ساختار مشخص آنها به‌عنوان یک شاخص اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌دلیل اهمیت این مراکز تغییر ویژگی‌های اصلی آنها در دهه‌های گذشته و آینده مورد به‌طور مداوم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد (پیتو و همکاران، ۲۰۰۷؛ نیسن و همکاران، ۲۰۱۴؛ بفورت و همکاران، ۲۰۱۶؛ کاتو و همکاران، ۲۰۱۹). حوزه مدیترانه یکی از مناطق اصلی چرخندزایی جهان، در عرض‌های میانی می‌باشد (اختر و همکاران، ۲۰۱۴؛ راگون و همکاران، ۲۰۱۸) و تعداد زیادی چرخند با ساختار، عمر و شدت‌های متفاوت هر ساله در آن تشکیل می‌شود (لیونلا و همکاران، ۲۰۱۶) که مناطق اطراف از جمله کشور ایران را به‌طور مستقیم متأثر می‌کنند و مطالعات متعددی نیز درباره آن انجام شده است. ایلی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی مسیرهای چرخندی مدیترانه در اروپا با تأکید بر کشور رومانی پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که چرخندها، بیشتر از مناطق مدیترانه مرکزی و شرقی عبور می‌کنند که ۴ درصد از چرخندهای شکل گرفته در حوزه مدیترانه از منطقه رومانی عبور کرده‌اند. از نظر فصلی، بیشترین فراوانی وقوع مختص زمستان و کمترین آن مربوط به تابستان است هیچ تغییر قابل توجهی در وقوع سالانه یا فصلی مشاهده نشد. آراگانو و پورکو (۲۰۲۲) با بررسی فعالیت‌های چرخندی در منطقه مدیترانه دریافتند که مناطق اصلی چرخندزایی شامل دریای اژه، سواحل تونس و لیبی می‌باشند که چرخندها در فصل سرد، تعداد کمتر، عمق بیشتر و کمترین مقدار MSLP را دارند. عساکره و

گیرد؛ اما تاکنون مطالعه جامعی در مورد تأثیرپذیری ناحیه چرخندزای مدیترانه که نقش مهمی در شکل‌گیری سامانه‌های بارش‌زایی که کشور ایران را متأثر می‌کند، انجام نشده است. از آنجا که رفتار ناحیه چرخندزای مدیترانه در فصل سرد و گرم سال متفاوت است، در مطالعه حاضر تلاش شده که رفتار و ویژگی‌های چرخندهای منطقه مدیترانه به‌صورت هم‌زمان با وقوع فصل بهار پدیده MJO مورد بررسی قرار گیرد.

۲. روش پژوهش

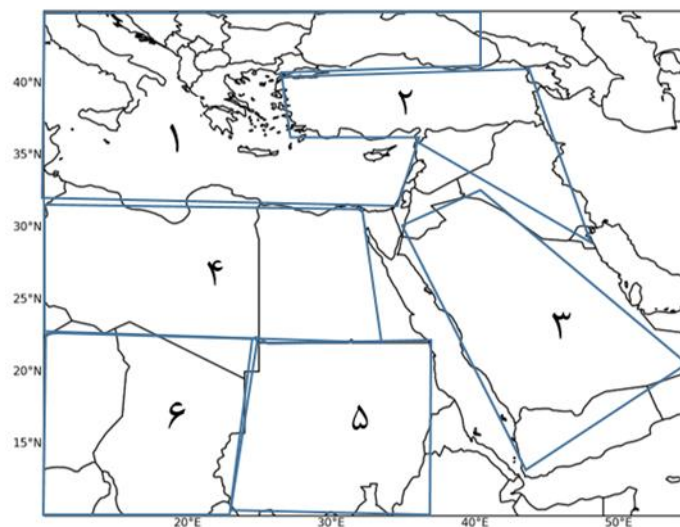
۲-۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوزه مدیترانه، منطقه‌ای فعال از نظر تشکیل و توسعه چرخندها محسوب می‌شود. ویژگی‌های جغرافیایی منطقه از جمله قرار گرفتن آن بین عرض‌های میانی و جنب استوایی، دریای تقریباً بسته و رشته‌کوه‌های نزدیک به ساحل نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های غالب هواشناسی منطقه دارند (تریگو و همکاران، ۲۰۱۳؛ میلوناس و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین فراوانی مراکز چرخندی دریای مدیترانه در قالب سامانه‌های گردش عمومی هوا، آب‌وهوای ایران را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند (علیچانی، ۱۳۸۲؛ پورکریم و همکاران، ۱۴۰۱).

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل منطقه مدیترانه در محدوده عرض جغرافیایی ۱۰ الی ۴۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۰ الی ۵۵ درجه شرقی می‌باشد. همچنین در این بررسی جهت جلوگیری از تکرار مدام اسامی مناطق چرخندزایی مشاهده شده، این مناطق به شش منطقه اصلی طبقه‌بندی و نام‌گذاری شدند (شکل و جدول ۱) و کل مناطق اشاره شده در این بررسی به‌عنوان منطقه مدیترانه (Mediterranean Region) در نظر گرفته شده است. در مطالعات قبلی نیز از جمله کار کوروتزاولو و همکاران، ۲۰۱۱؛ عمار و همکاران، ۲۰۱۴، منطقه‌بندی مشابهی صورت گرفته است.

درون فصلی ۱۸۳ ایستگاه جنوبی ایران، دریافتند که دوره ترسالی در این ایستگاه‌ها با فازهای ۱-۲ و ۷-۸ این پدیده و دوره خشک‌سالی با فازهای ۳ تا ۶ این پدیده مطابقت دارد. محمدپور و همکاران (۱۴۰۲) بی‌هنجاری بارش‌های فصل سرد ایران را تحت تأثیر پدیده MJO در دوره آماری ۱۹۸۰ الی ۲۰۲۰ پهنه‌بندی کرده و فازهای ۷، ۸، ۲، ۱ را به‌عنوان فازهای مؤثر بر بارش و فازهای ۳، ۴، ۵ و ۶ را به‌عنوان فازهای تضعیف‌کننده بارش‌های ایران شناسایی کردند. محمدی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه خود بر روی بارش‌های سنگین غرب ایران، به بررسی همدیدی-دینامیکی رخداد چرخندی پرداختند و نتایج بیانگر شکل‌گیری چرخندهای مؤثر بر بارش‌های سنگین در منطقه شرق مدیترانه تا عراق می‌باشند و رطوبت این بارش‌ها به ترتیب از دریای سرخ و سپس خلیج فارس و دریای مدیترانه تأمین می‌شود. علاوه بر پژوهش‌های ذکر شده می‌توان به پژوهش‌های ناظم‌السادات و همکاران (۱۳۹۵)، مهرآور و همکاران (۱۳۹۷)، رزقی جهرمی و همکاران (۱۳۹۸)، سیدنژاد گل‌خطمی و همکاران (۱۳۹۸)، طهماسبی و همکاران (۱۴۰۰) در اهمیت تأثیر رخداد MJO بر بارش ایران و همچنین در ارتباط با تأثیر چرخندزایی بر بارش ایران به مطالعات موحدی و کاوسی (۱۳۹۳)، احمدی و جعفری (۱۳۹۷)، زینالی و همکاران (۱۴۰۰) و پورکریم و همکاران (۱۴۰۱) اشاره کرد.

بر اساس مطالب ذکر شده، پژوهش‌های متعددی در مورد رفتار پدیده MJO و نقش آن در شکل‌گیری پدیده‌های گوناگون جوی از جمله بارش در مناطق مختلف کره زمین صورت پذیرفته است، بدیهی است که گام اول در رخداد بارش در یک منطقه، تشکیل یک چرخند در بالادست و حرکت آن به‌سوی منطقه هدف می‌باشد. تمرکز بیشتر مطالعات مرتبط با MJO که در کشور ایران انجام شده بر بارش بوده است و تلاش شده است که منابع رطوبتی این بارش‌ها در فازهای مختلف این پدیده مورد کنکاش قرار



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه.

جدول ۱. طبقه‌بندی مناطق چرخندزایی منطقه مدیترانه.

ردیف	مناطق چرخندزایی	نام‌گذاری مناطق
۱	دریای مدیترانه، دریای سیاه، دریای آدریاتیک، دریای اژه، دریای تیرنی و کشور ایتالیا	حوزه مدیترانه
۲	کشورهای ترکیه، عراق و سوریه	غرب ایران
۳	ایالات متحده عربی، عمان، یمن و عربستان سعودی	جنوب خلیج فارس
۴	کشورهای مصر و لیبی	شمال آفریقا
۵	کشور سودان	غرب دریای سرخ
۶	کشورهای نیجر و چاد	نواحی استوایی آفریقا در حدود طول ۲۰ درجه شرقی

۲-۲. داده‌های پژوهش

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه متشکل از شاخص تابش موج بلند خروجی (Outgoing Longwave) OLR، شاخص (Radiation Real-time Multivariate) RMM، (MJO series 1 and 2) (ویلر و هندون، ۲۰۰۴) و میانگین فشار تراز دریا (MSLP) برای ماه‌های مارس، آوریل و مه می‌باشد. از داده‌های روزانه OLR به‌دست‌آمده از سری ماهواره‌های مدار قطبی سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA)، به‌عنوان شاخصی برای فعالیت همرفتی و بارش استوایی، استفاده می‌شود (لیمن و اسمیت، ۱۹۹۶). این داده‌ها برای اطمینان از درستی انتخاب دوره‌های منتخب MJO که در زیر به آن اشاره شده است بر اساس مطالعات گذشته نظیر نصر اصفهانی و همکاران (۱۳۹۶) استفاده شده است.

از داده‌های MSLP برای شناسایی موقعیت و پارامترهای چرخند و همچنین مسیرهای آنها تجزیه و تحلیل می‌شود (بوردانی‌دو و همکاران، ۲۰۱۴). در این مطالعه نیز داده‌های MSLP از مجموعه داده‌های بازتحلیل ERA5 با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه در بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۰ به‌دست آمد که با کاربست الگوریتم چرخندزایی دانشگاه ملبورن بر روی این داده‌ها وضعیت چرخندزایی مدیترانه و مسیر آنها مورد مطالعه قرار گرفت. هدف اصلی این مطالعه بر ماه‌های گرم سال (فصل بهار) که دارای بارش قابل ملاحظه هستند، بوده است از این‌رو تنها به ماه‌های مارس، آوریل و مه توجه شده است.

شاخص MJO مورد استفاده در این مطالعه، به‌صورت دو سری زمانی به نام‌های RMM1 و RMM2، در دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۲۰ می‌باشد. این شاخص از

یک جفت توابع متعامد تجربی (EOFs) میدان‌های ترکیبی باد مداری در ۲۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال و همچنین مقادیر OLR مشاهده شده توسط ماهواره بین عرض‌های ۱۵ درجه جنوبی تا ۱۵ درجه شمالی، محاسبه می‌شود ([http://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rm\(m.74toRealtime.txt](http://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rm(m.74toRealtime.txt)). معمولاً دوره‌های منتخب MJO با $\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2} > 1$ و با مشخصه گسترش شرق سو و پیوسته به عنوان MJO قوی در نظر گرفته می‌شود (پوهل و متیوس، ۲۰۰۷). در پژوهش حاضر تمرکز بر دوره‌های کامل پدیده MJO قوی که در آن فازهای یک الی هشت به طور پیوسته رخ داده‌اند، بوده است. با توجه به تعداد کم دوره‌های منتخب بر اساس شرایط ذکر شده، دوره‌هایی با اندازه شاخص بیش از ۰/۷۵ و دارای نقص یک فاز کمتر نیز انتخاب شدند. بر این اساس کل دوره‌های منتخب برای فصل بهار ۳۴ دوره می‌باشد.

۳-۲. روش کار

۳-۲-۱. الگوریتم دانشگاه ملبورن

یکی از مهم‌ترین عوامل اغتشاش در منطقه برون حاره، چرخندها هستند که عمدتاً با موج کوتاه در سطوح بالا، هسته رودباد و هوای گرم و مرطوب در یک طرف جبهه توأم هستند (کاویانی و علیجانی، ۱۳۹۱). مکانیسم چرخند را می‌توان با پارامترهای زیادی از جمله فشار، شدت، عمق، شعاع و سرعت انتشار آن توصیف کرد. این ویژگی‌ها اهمیت و تأثیر سیستم‌های چرخندی را تشکیل می‌دهند (سیموندز و کی، ۲۰۰۰).

در این بررسی به منظور شناسایی، مسیریابی و تحلیل ویژگی‌های چرخندهای منطقه مدیترانه در دوره گرم سال (فصل بهار) از الگوریتم تشخیص و مسیریابی چرخند دانشگاه ملبورن (MS) که بر اساس دیدگاه شبه لاگرانژی است، استفاده شده است (پینتو و همکاران، ۲۰۰۵؛ پزا و همکاران، ۲۰۰۷؛ ریبیل و همکاران، ۲۰۰۸). مرحله اولیه شناسایی چرخند، تبدیل فشار (P) شبکه‌بندی شده به شبکه‌های کوچک‌تر از طریق یک طرح‌پردازی ژئوستروفيکی قطبی با استفاده از روش درون‌یابی اسپلاین

مکعبی است. درون‌یابی P، جهت قرارگیری چرخندها در نقاط اصلی شبکه داده، ضروری است (پینتو و همکاران، ۲۰۰۵). با جستجوی گرادیان فشار حداکثر، مناطق احتمالی مورد نظر، شناسایی می‌شوند و بنابراین، حداقل فشار در مناطق انتخاب شده، تشخیص داده می‌شوند. با این روش، چرخندهای باز و بسته که از اهمیت بالایی برخوردارند، شناسایی می‌شوند، زیرا چرخندها در طول چرخه زندگی خود رشد می‌کنند. از این رو، از دست دادن پایین‌ترین حد باز می‌تواند منجر به شکست سری زمانی یک سیستم چرخندی شود. بعد از شناسایی چرخندها، ویژگی‌های آنها مانند شعاع، عمق و شدت نیز محاسبه می‌شوند.

شعاع چرخند (R) از طریق معادله زیر تخمین زده می‌شود:

$$R^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2 \quad (1)$$

که در آن r_i فاصله خط شعاعی از مرکز چرخند تا نقاطی است که لاپلاسین فشار در آنها صفر است. N مربوط به تعداد خطوط شعاعی ترسیم شده برای هر ۲۰ درجه است. عملگر لاپلاسین فشار مرکزی، $\nabla^2 P$ ، به طور مناسب شدت چرخند را توصیف می‌کند (سیموندز و همکاران، ۱۹۹۹؛ لیم و سیموندز، ۲۰۰۷).

D (عمق چرخند) که از تناسب گرادیان فشار و شعاع چرخند از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$D = 0.25 \nabla^2 P R^2 \quad (2)$$

در مرحله ردیابی، الگوریتم موقعیت بعدی و فشار هسته را برای هر چرخند پیش‌بینی می‌کند. این طرح از ترکیب وزنی حرکت قبلی چرخند و سرعت برداری مقیاس‌یافته برای پیش‌بینی موقعیت‌های بعدی چرخندها استفاده می‌کند. سرعت بردار به صورت ژئوستروفيکی، از داده‌های فشار به دست می‌آیند. گرایش فشار قبلی برای پیش‌بینی فشار هسته چرخند پیش‌بینی شده، استفاده می‌شود (عمار و همکاران، ۲۰۱۴).

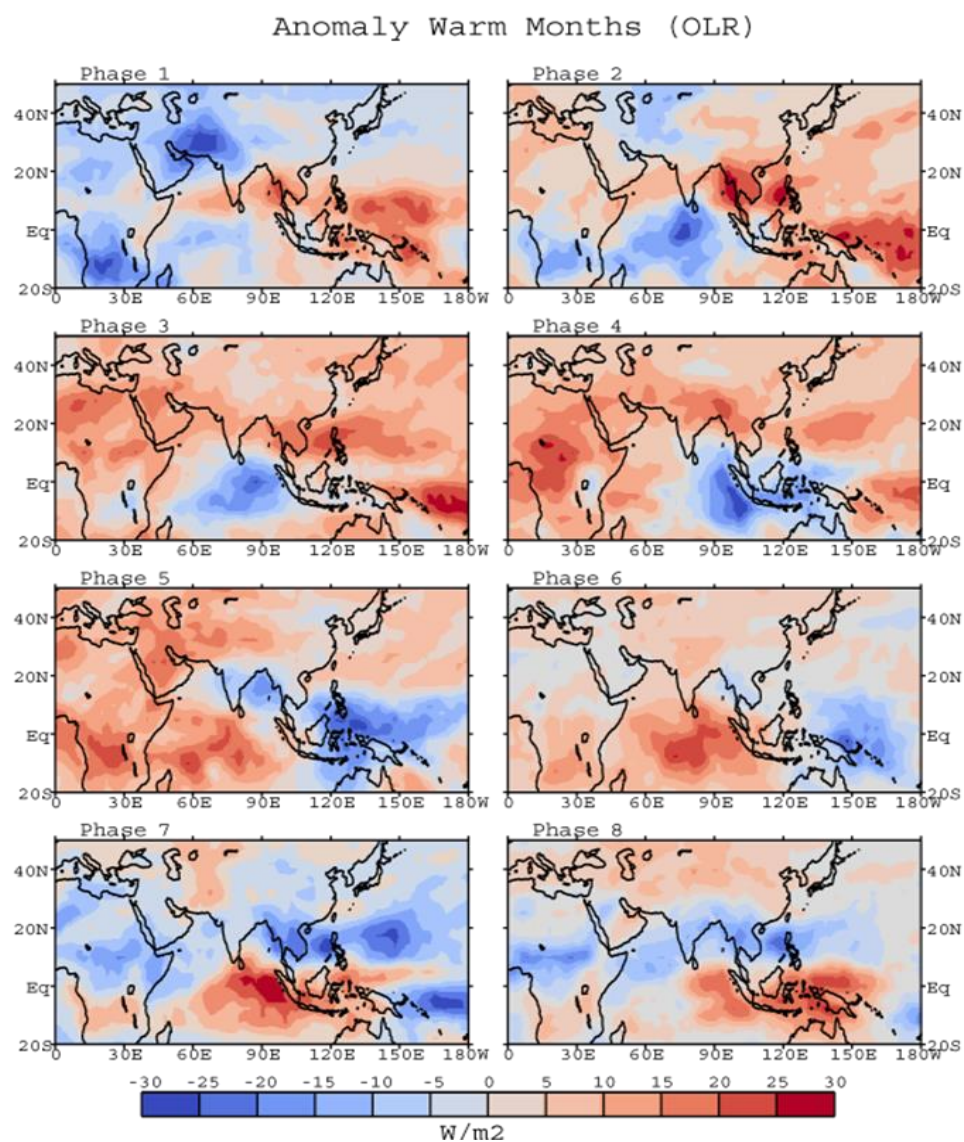
در این بررسی فیلترهایی بر روی داده‌های استخراج شده با استفاده از الگوریتم دانشگاه ملبورن اعمال شد، از جمله: ۱- چرخندهایی که در محدوده تعیین شده مکانی و زمانی (۱۰-۵۵ شرقی / ۱۰-۴۵ شمالی، بازه زمانی ۲۰۲۰-۱۹۸۹) قرار داشتند، در نظر گرفته شدند. ۲- چرخندهایی که کمتر

از ۲۴ ساعت دوام داشتند، حذف شدند. ۳- چرخندهایی که در چند گام زمانی شناسایی شده بودند (دارای شماره یکسان بودند) بررسی شدند و تنها حالتی که کمترین فشار برای آن ثبت شده بود، در نظر گرفته شد. ۴- میانه فشار هوا (P)، به دست آمده از طریق الگوریتم (MS)، در روزهای منتخب فازهای مختلف MJO محاسبه شد. برای فصل بهار حداکثر فشار در مرکز کم فشار برابر با مقدار این میانه (۱۰۰۵/۸) در نظر گرفته شد.

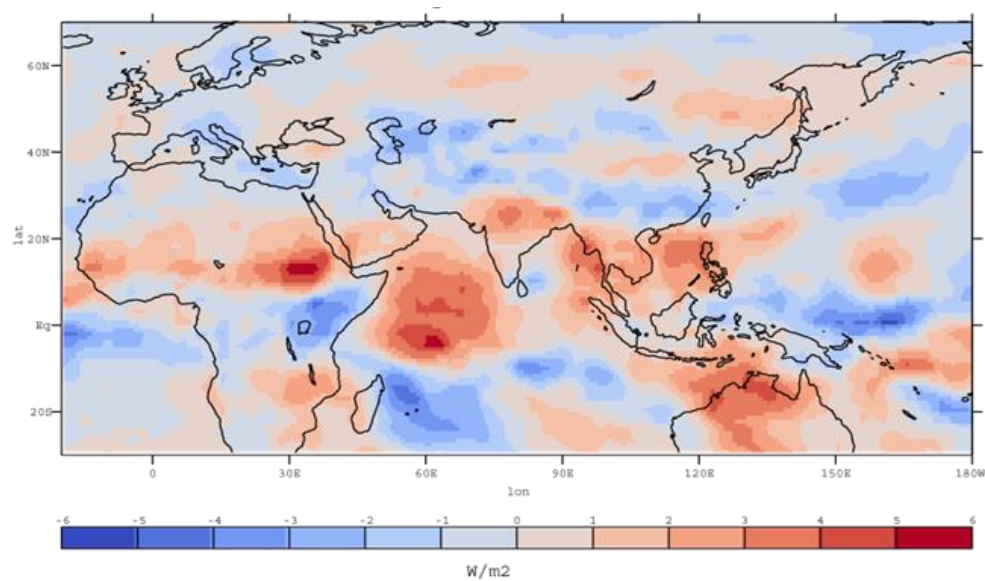
۳. نتایج و بحث

شکل ۲، بی‌هنجاری OLR برای هر یک از فازهای هشت گانه دوره گرم (فصل بهار) را نشان می‌دهد که منظور از بی‌هنجاری OLR در دوره گرم (فصل بهار)، اختلاف میانگین این کمیت در روزهای منتخب هر فاز دوره مورد مطالعه با میانگین آن در کل روزهای منتخب مورد مطالعه این دوره (۲۸۹ روز) می‌باشد. با توجه به این نقشه، در فاز ۱، کمیت OLR بر روی آفریقا، سواحل غربی اقیانوس هند و همچنین ایران، بی‌هنجاری منفی دارد که نشانگر وجود ابرناکی در منطقه است (حدود ۱۰- الی ۳۰- وات بر مترمربع). در فاز ۲، بی‌هنجاری منفی تقویت شده، به سمت شرق حرکت کرده و قسمت‌های مرکزی اقیانوس هند را پوشش داده است (تا مقدار ۳۰- وات بر مترمربع)؛ و بی‌هنجاری منفی ضعیفی بر روی ایران قابل رؤیت است (۵- وات بر مترمربع). در فاز بعدی (فاز ۳) در حالی که هسته همرفتی به سمت مرکز و شرق اقیانوس هند کشیده شده است بر روی منطقه مورد مطالعه مقادیر مثبت بی‌هنجاری OLR (حدود ۲۰ وات بر مترمربع) دیده می‌شود که نشان از آسمانی صاف و بدون ابر بر روی ایران دارد. بر پایه شکل ۴، هسته بی‌هنجاری منفی OLR به سمت شرق اقیانوس هند حرکت کرده و به محدوده قاره دریایی نزدیک شده است که افزایش فعالیت‌های همرفتی را به دنبال خواهد داشت؛ و بی‌هنجاری‌های شرق اقیانوس هند تقویت شده و همچنان بر روی ایران مقادیر مثبت بی‌هنجاری وجود دارد که در تطابق کامل با نتایج به دست آمده توسط محمدپور و

همکاران (۱۴۰۲) می‌باشد. در فاز ۵، بی‌هنجاری‌های منفی به سمت شرق حرکت کرده و به خط زمان می‌رسد (فعالیت‌های همرفتی به شرق اندونزی و استرالیا کشیده شده است). در سراسر اقیانوس هند بی‌هنجاری‌های مثبت قابل مشاهده می‌باشد؛ و در فاز ۶ بی‌هنجاری‌های مثبت OLR، نیمه شرقی اقیانوس هند و قاره دریایی را تحت تأثیر قرار داده است (۲۵ الی ۲۰ وات بر مترمربع) و فعالیت‌های همرفتی با بی‌هنجاری‌های منفی OLR در قسمت‌های غرب اقیانوس آرام همراه می‌باشد. در فاز ۷ بی‌هنجاری‌های منفی OLR (حدود ۵- وات بر مترمربع) تا حدودی در قسمت‌های شمالی و شرقی اقیانوس هند به چشم می‌خورد که هسته اصلی همرفتی در قسمت‌های غرب اقیانوس آرام به سمت مرکز آن قرار دارند. بی‌هنجاری‌های مثبت این کمیت در محدوده ۱۰- الی ۳۰- وات بر مترمربع بر روی نیمه شرقی ایران قابل مشاهده است و نیمه غربی ایران بی‌هنجاری‌های منفی را نشان می‌دهد. در فاز آخر این پدیده هسته همرفت در مرکز اقیانوس آرام قرار گرفته که وجود بی‌هنجاری‌های منفی و هسته همرفت در قسمت‌های غرب اقیانوس هند، نشانگر انحلال یک دوره کامل از این پدیده و شروع دوره جدید در غرب اقیانوس هند می‌باشد. در این فاز نیز ایران همچنان با وجود بی‌هنجاری‌های مثبت این متغیر، دارای آسمان صاف و بدون ابرناکی می‌باشد. منظور از بی‌هنجاری میانگین طولانی مدت OLR، اختلاف بین میانگین این کمیت در روزهای منتخب دوره گرم (فصل بهار) (۲۸۹ روز) با میانگین آن در دوره گرم (فصل بهار) (۲۰۲۰-۱۹۸۰ سال) می‌باشد که در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۳، بی‌هنجاری‌های منفی OLR و هسته همرفت در قسمت‌های غرب و مرکز اقیانوس آرام قرار دارد (۲- الی ۶- وات بر مترمربع) و کمینه بی‌هنجاری‌های منفی این کمیت (بین ۰ الی ۱- وات بر مترمربع) بر روی کشور ایران قابل مشاهده است که نشان می‌دهد به طور میانگین در دوره مورد مطالعه ابرناکی غالب بوده است که می‌تواند با بارش بیشتر هم همراه باشد.



شکل ۲. بی‌هنجاری OLR دوره گرم (فصل بهار) هر یک از فازهای هشت‌گانه نسبت به روزهای منتخب دوره گرم (فصل بهار) کل فازها.

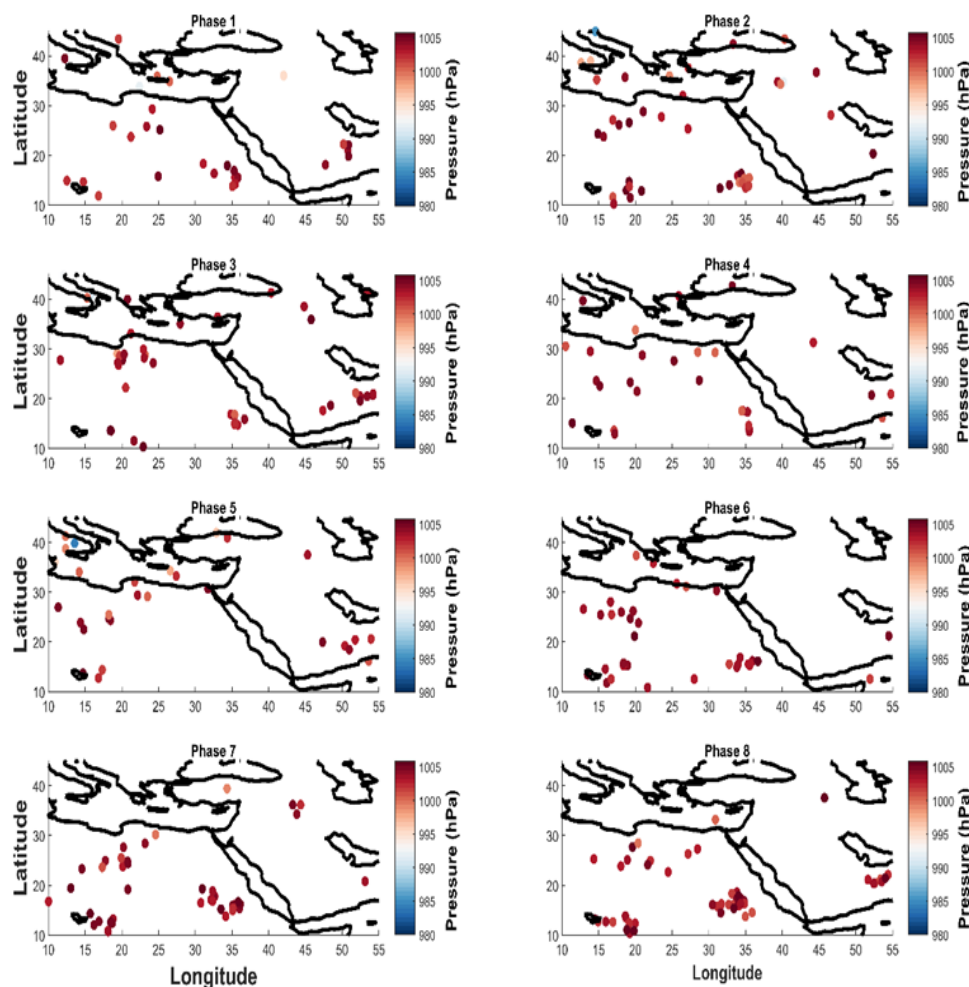


شکل ۳. بی‌هنجاری OLR روزهای منتخب دوره گرم (فصل بهار) نسبت به دوره گرم (فصل بهار) ۱۹۸۰-۲۰۲۰

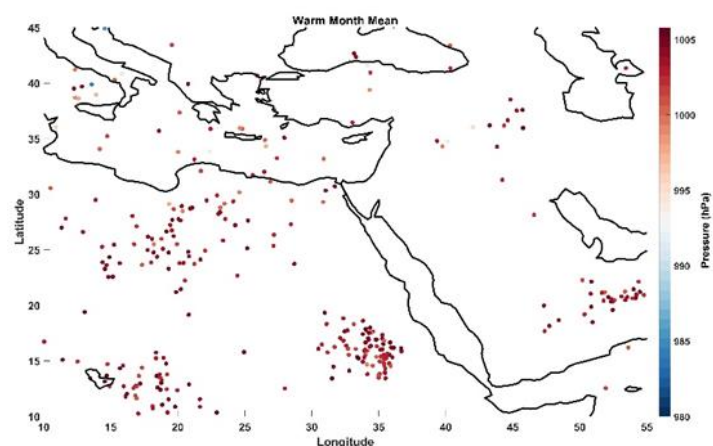
شکل ۴، پراکندگی مراکز چرخندزایی منطقه مدیترانه، در روزهای منتخب دوره گرم (فصل بهار) هر یک از فازهای هشت گانه MJO در طول دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۸۹ را نشان می‌دهد. با توجه به این نقشه در فاز ۱، کمینه مرکز فشار با فشار ۹۹۲/۲ هکتوپاسکال در محدوده حوزه مدیترانه قرار دارد و مراکز چرخندزایی با فشارهای مختلف تا سطح ۱۰۰۵/۸ هکتوپاسکال در حوزه مدیترانه، غرب ایران، جنوب خلیج فارس، شمال آفریقا، غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا مشاهده می‌شود. در فاز ۲، مرکز فشار کمینه با فشار ۹۹۱/۹ هکتوپاسکال در غرب ایران دیده می‌شود و همچنین بقیه مراکز چرخندزایی روی حوزه مدیترانه، غرب ایران، جنوب خلیج فارس، شمال آفریقا، غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا گسترده شده‌اند. در فاز بعدی (۳)، مرکز چرخندزایی با فشار کمینه ۹۹۱/۳ هکتوپاسکال بر روی حوزه مدیترانه قابل مشاهده است و بقیه مراکز چرخندزایی همچنین بر روی حوزه مدیترانه، غرب ایران، جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا دیده می‌شود. در فاز ۴، کمینه فشار با مرکز ۹۹۸/۹ هکتوپاسکال بر روی حوزه مدیترانه دیده می‌شود و بقیه مراکز نیز بر روی حوزه مدیترانه، غرب ایران، جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا قابل مشاهده است. در فاز ۵، مرکز فشار کمینه با فشار ۹۹۱/۲ هکتوپاسکال بر روی حوزه مدیترانه قابل مشاهده است. بقیه مراکز چرخندزایی نیز همچنین روی حوزه مدیترانه، غرب ایران، جنوب خلیج فارس، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا به چشم می‌خورد. در فاز ۶، کمینه فشار مرکز چرخندزایی فشار ۱۰۰۱/۲ هکتوپاسکال

در روی حوزه مدیترانه قرار دارد و بقیه مراکز نیز همچنین بر روی حوزه مدیترانه، جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا گسترده شده‌اند. در فاز ۷، کمینه فشار با مرکز ۹۹۸/۹ هکتوپاسکال در غرب ایران واقع شده است. هیچ مرکز چرخندزایی در روی حوزه مدیترانه دیده نمی‌شود و بقیه مراکز بر روی غرب ایران، جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا گسترده شده‌اند. در آخرین فاز (۸)، کمینه فشار با مرکز ۹۹۹/۳ هکتوپاسکال بر روی شمال آفریقا قرار گرفته است. تنها یک مرکز چرخندزا در روی حوزه مدیترانه به چشم می‌خورد و بقیه مراکز بر روی غرب ایران، جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا قابل مشاهده هستند.

شکل ۵، پراکندگی مراکز چرخندزایی منطقه مدیترانه، در روزهای منتخب دوره گرم (فصل بهار) MJO در طول دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۸۹ را نشان می‌دهد. با توجه به این نقشه، مناطق چرخندزایی در سرتاسر حوزه مدیترانه، غرب ایران، جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا گسترده شده‌اند. کمینه مراکز فشار با فشار زیر ۹۹۵/۱ هکتوپاسکال که در نقشه به رنگ آبی نمایش داده شده است، در روی حوزه مدیترانه (مرکز دریای مدیترانه، محدوده شمال غرب حوزه مدیترانه بر روی کشور ایتالیا، دریای آدریاتیک و دریای تیرنی) و همچنین غرب ایران (روی کشور ترکیه) قرار دارند و بیشترین مراکز چرخندزایی با فشارهای بالاتر بر روی مناطق غرب دریای سرخ، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا قابل مشاهده هستند که با یافته موحدی و کاوسی (۱۳۹۳) مطابقت دارد.



شکل ۴. چرخندزایی منطقه مدیترانه در روزهای منتخب دوره گرم (فصل بهار) هر یک از فازهای هشت گانه MJO در طول دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۸۹



شکل ۵. میانگین طولانی مدت چرخندزایی مدیترانه در روزهای منتخب دوره گرم (فصل بهار) در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰.

مرکز چرخندزایی (۱۷/۳۹ درصد) بیشترین و فاز ۱ و ۴ با ۲۸ مرکز (۹/۳۶ درصد) کمترین مراکز چرخندزایی را دارا می باشند. میانگین فشار مراکز چرخندی در کل دوره گرم (فصل بهار) ۱۰۰۲/۸ هکتوپاسکال بوده است و کمترین

در این پژوهش شمار مراکز چرخندزا هم زمان با چیرگی فازهای گوناگون پدیده MJO و همچنین سهم آنها از رخداد چرخندهای دوره گرم (فصل بهار)، برآورد شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. بر این پایه، فاز ۸ با ۵۲

نمی‌باشد. بیشترین کمینه‌های فشار در دوره گرم (فصل بهار)، بر روی حوزه مدیترانه گسترده شده‌اند (از ۲۶ مورد، ۱۶ مورد مربوط به حوزه مدیترانه) و بقیه مربوط به منطقه غرب ایران با ۴ مورد، شمال آفریقا با ۳ مورد و غرب دریای سرخ با ۲ مورد می‌باشند. مرکز چرخندزایی با کمترین فشار ثبت شده مربوط به فاز ۵ با فشار ۹۹۱/۲ هکتوپاسکال می‌باشد که در روی حوزه مدیترانه (دریای سیاه) قرار دارد. از ۲۵ مورد کمینه فشار این فصل، ۱۷ مورد مربوط به ماه آوریل، ۶ مورد مربوط به ماه مارس و ۲ مورد مربوط به ماه مه بوده است (جدول ۳) که لیونلا و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی خود دریافتند که بیشترین چرخندهای مدیترانه، مربوط به ماه آوریل می‌باشند.

میانگین فشار مربوط به فاز ۵ (۳۰ مرکز چرخندزایی) با فشار ۱۰۰۱ هکتوپاسکال به‌دست آمد. بیشترین میانگین فشار مربوط به فاز ۷ (۴۲ مرکز چرخندزایی) با میانگین فشار ۱۰۰۳/۶ هکتوپاسکال می‌باشد. همچنین کمینه فشار با مرکز ۹۹۱/۲ هکتوپاسکال مربوط به فاز ۵ می‌باشد (جدول ۲).

مراکز چرخندزایی با فشار زیر ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، ماه وقوع آنها و همچنین موقعیت مکانی این مراکز در فازهای مختلف فصل بهار نیز استخراج و مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). کمینه‌های فشار در فازهای ۲ و ۵ (۸ مورد فشار زیر ۱۰۰۰ هکتوپاسکال) بیشترین شمار را داشتند و در فاز ۶ هیچ مورد فشار زیر ۱۰۰۰ هکتوپاسکال قابل مشاهده

جدول ۲. تعداد مراکز چرخندزایی فازهای مختلف MJO در فصل بهار و نسبت آنها به مجموع مراکز.

فاز	تعداد مراکز چرخندزایی	کمینه فشار (هکتوپاسکال)	میانگین فشار (هکتوپاسکال)	تعداد چرخند هر فاز به کل (درصد)	میانگین فشار (هکتوپاسکال)
فاز ۱	۲۸	۹۹۲/۲	۱۰۰۲/۴	۹/۳۶	۱۰۰۲/۸
فاز ۲	۴۲	۹۹۱/۹	۱۰۰۲	۱۴/۰۴	
فاز ۳	۴۲	۹۹۱/۳	۱۰۰۲/۷	۱۴/۰۴	
فاز ۴	۲۸	۹۹۸/۹	۱۰۰۳/۱	۹/۳۶	
فاز ۵	۳۰	۹۹۱/۲	۱۰۰۱	۱۰/۰۳	
فاز ۶	۳۵	۱۰۰۱/۲	۱۰۰۳/۴	۱۱/۷۰	
فاز ۷	۴۲	۹۹۸/۹	۱۰۰۳/۶	۱۴/۰۴	
فاز ۸	۵۲	۹۹۹/۳	۱۰۰۳/۲	۱۷/۳۹	

جدول ۳. فشار زیر ۱۰۰۰ هکتوپاسکال مراکز چرخندزایی فازهای مختلف MJO در فصل بهار.

نام فاز	تعداد مراکز کمینه فشار چرخند	مقدار فشار چرخند	موقعیت مراکز چرخندزا	ماه وقوع
فاز ۱	۲	۹۹۲/۲	حوزه مدیترانه	مارس
		۹۹۵/۱	غرب ایران	آوریل
فاز ۲	۸	۹۹۷/۲	حوزه مدیترانه	مارس
		۹۹۹/۱	حوزه مدیترانه	مارس
		۹۹۸/۱	غرب دریای سرخ	آوریل
		۹۹۹/۹	غرب دریای سرخ	آوریل
		۹۹۱/۹	غرب ایران	مارس
		۹۹۹/۴	غرب ایران	آوریل
		۹۹۷/۷	حوزه مدیترانه	آوریل
		۹۹۶/۸	حوزه مدیترانه	آوریل
فاز ۳	۳	۹۹۱/۳	حوزه مدیترانه	آوریل
		۹۹۷/۶	شمال آفریقا	می
		۹۹۲/۴	حوزه مدیترانه	مارس

ادامه جدول ۳.

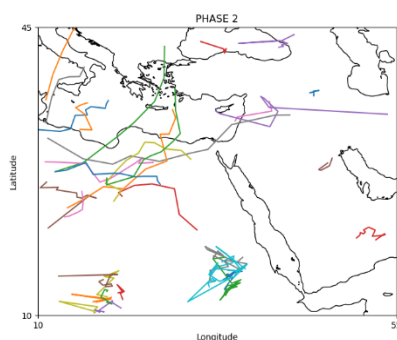
نام فاز	تعداد مراکز کمینه فشار چرخند	مقدار فشار چرخند	موقعیت مراکز چرخندزا	ماه وقوع
فاز ۴	۱	۹۹۸/۹	حوزه مدیترانه	آوریل
فاز ۵	۸	۹۹۸/۹	حوزه مدیترانه	آوریل
		۹۹۷/۴	حوزه مدیترانه	آوریل
		۹۹۶/۷	حوزه مدیترانه	آوریل
		۹۹۶	حوزه مدیترانه	آوریل
		۹۹۹/۶	حوزه مدیترانه	آوریل
		۹۹۱/۲	حوزه مدیترانه	آوریل
		۹۹۹/۵	حوزه مدیترانه	آوریل
		۹۸۴/۳	حوزه مدیترانه	مارس
فاز ۶	۰	-		
فاز ۷	۲	۹۹۸/۹	غرب ایران	آوریل
		۹۹۹/۷	شمال آفریقا	می
فاز ۸	۱	۹۹۹/۳	شمال آفریقا	آوریل

شکل های ۶ و ۷، مسیرهای چرخندهای منطقه مورد مطالعه در روزهای منتخب فصل بهار در فازهای هشت گانه MJO در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰، از زمان تشکیل تا مرگ چرخند را به نمایش می گذارد (تراکم مسیرها). با توجه به شکل ۵-الف در فاز یک، بیشترین تراکم این مسیرها را می توان روی مناطق شمال آفریقا و نواحی استوایی آن، غرب دریای سرخ و جنوب خلیج فارس مشاهده کرد. منشأ بیشتر مسیرهایی که به سمت دریای مدیترانه امتداد پیدا کرده اند، نواحی ساحلی شمال آفریقا است که عمار و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهش خود، بیان کردند که نواحی ساحلی شمال آفریقا (لیبی و مصر) دومین منطقه اصلی تشکیل چرخند در منطقه مدیترانه می باشند. همچنان مسیرهایی که در غرب دریای سرخ وجود دارند به صورت منحنی های بسته هستند. مسیرهایی نیز در غرب منطقه مدیترانه و غرب ایران قابل رؤیت هستند. در شکل ۵-ب که نمایشگر فاز دو می باشد، تراکم مسیرهای چرخندی به مراتب بیشتر از فاز قبلی است. این مسیرها در منطقه شمال آفریقا تراکم بیشتری داشته و بعضی از این مسیرها که منشأ ساحلی دارند به سمت دریای مدیترانه کشیده شده اند و همچنین مسیرهایی در غرب دریای مدیترانه قابل مشاهده است. مسیرهایی نیز در روی دریای مدیترانه شکل گرفته اند و به سمت منطقه غرب ایران امتداد پیدا کرده اند. در مناطق

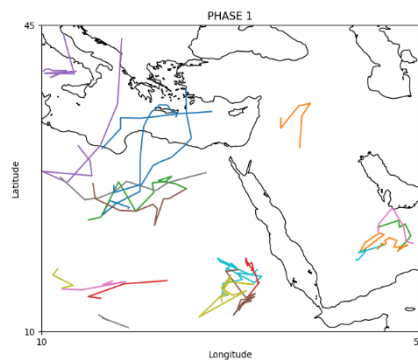
غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا همچنان مسیرها به صورت منحنی های بسته با تراکم بالا، به چشم می خورند و مسیری نیز در جنوب خلیج فارس قابل مشاهده است. در فاز ۳ (شکل ۶-ج) مسیرهایی دیده می شود که از نواحی ساحلی آفریقا و غرب مدیترانه نشأت گرفته و با عبور از دریای مدیترانه به دریای سیاه رسیده اند و همچنان تراکم زیاد مسیرهای چرخندی در منطقه شمال آفریقا و امتداد بعضی از آنها به سمت دریای مدیترانه دیده می شود. مسیرهایی نیز به صورت منحنی های بسته در مناطق غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا به چشم می خورد. مسیرهایی نیز با تراکم بیشتر نسبت به فازهای قبل در جنوب خلیج فارس امتداد یافته اند. در قسمت د این شکل فاز ۴ به نمایش گذاشته شده است. در این فاز از فصل بهار نیز همچنان تراکم مسیرها در عرض های پایین تر بیشتر است، مسیرهایی با تراکم بالا در منطقه شمال آفریقا به چشم می خورد که بیشتر آنها به سمت دریای مدیترانه امتداد پیدا کرده و در آنجا از بین می روند. مسیرهایی نیز با منشأ شمال و شمال غرب منطقه مدیترانه قابل رؤیت هستند. در مناطق غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا مسیرهایی دیده می شود که برخلاف فازهای قبلی به صورت منحنی نبوده و یک سری خطوطی با طول کم را در بر می گیرند و مسیرهایی نیز در جنوب خلیج فارس

در غرب دریای سرخ دیده می‌شوند با تراکم بالا همچنان به صورت منحنی‌های بسته به چشم می‌خورند ولی مسیرهای نواحی استوایی در این فاز، به صورت خطوط ممتد در آمده‌اند. در فاز ۷ این فصل که در قسمت (ز) این شکل مشاهده می‌شود، تراکم این مسیرها در مناطق شمال و نواحی استوایی آفریقا و غرب دریای سرخ در حداکثر هستند. در چند مورد از این مسیرها از نواحی ساحلی آفریقا به سمت دریای مدیترانه کشیده شده و در روی آن از بین رفته‌اند. مسیرهایی نیز با تراکم کم در مناطق غرب ایران و جنوب خلیج فارس به چشم می‌خورند. شکل ۵-ح نشان می‌دهد که در فاز ۸ نیز همچون فازهای قبلی تراکم مسیرها در مناطق شمال و نواحی استوایی آفریقا و غرب دریای سرخ در میزان حداکثری خود قرار دارند. چندین مسیر از قسمت‌های ساحلی آفریقا به سمت دریای مدیترانه کشیده شده و در روی منابع آبی از بین رفته‌اند. مسیرهای غرب دریای سرخ و نواحی استوایی همچنان به صورت منحنی‌های بسته با طول کم به جز چند مسیر امتداد دارند.

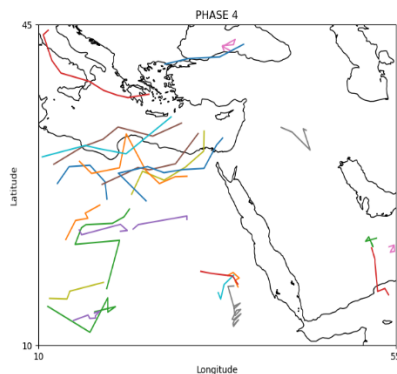
قابل مشاهده هستند. فاز ۵ در قسمت در شکل ۶-ه به نمایش گذاشته شده است. در این فاز مسیرهایی در غرب و شمال غرب منطقه مدیترانه قابل مشاهده است که اکثراً منشأ آبی داشته و همچنین در روی منابع آبی از بین رفته‌اند. مسیرهایی نیز در منطقه شمال آفریقا به چشم می‌خورد که بعضی از آنها با منشأ ساحلی به سمت دریای مدیترانه امتداد یافته و در آنجا از بین رفته‌اند و بعضی نیز با دریافت رطوبت به سمت این منطقه امتداد یافته‌اند. یک مسیر چرخندی بسیار طولانی در این فاز به چشم می‌خورد که از نواحی ساحلی آفریقای شمالی منشأ گرفته از روی دریای مدیترانه و کشور ترکیه عبور کرده و در روی دریای سیاه به پایان رسیده است. مسیرهایی نیز در نواحی استوایی آفریقا و جنوب خلیج فارس به چشم می‌خورند که همچنان با طول کمی امتداد داشته‌اند. در قسمت (و) این شکل، فاز ۶ قابل مشاهده می‌باشد. مسیرهای چرخندی تراکم حداکثری را در مناطق شمال و نواحی ساحلی آفریقا و غرب دریای سرخ دارند. چند مسیر از نواحی ساحلی آفریقا به سمت دریای مدیترانه امتداد یافته و در آنجا از بین رفته‌اند. مسیرهایی که



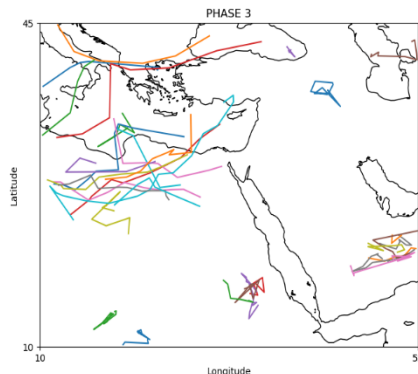
(ب) فاز ۲



(الف) فاز ۱

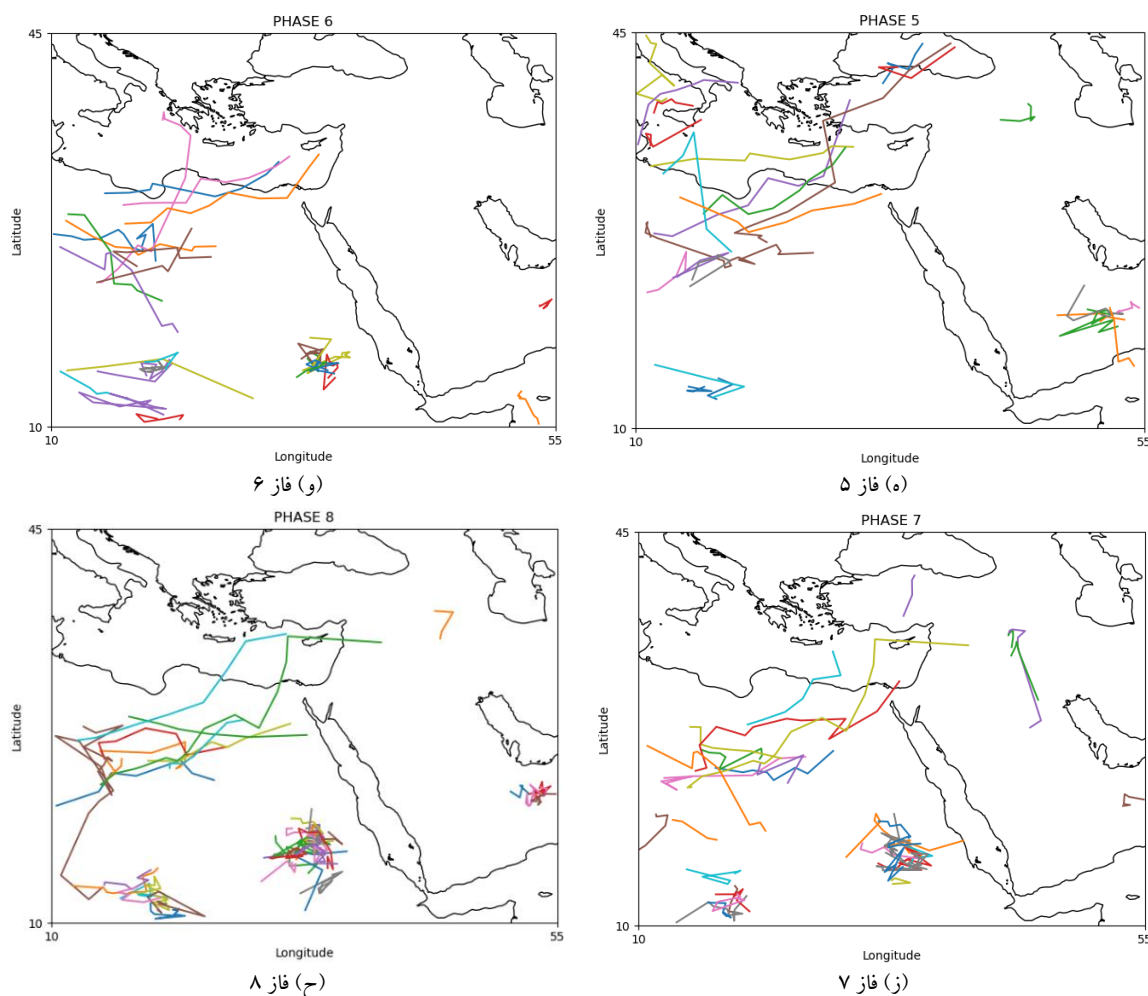


(د) فاز ۴



(ج) فاز ۳

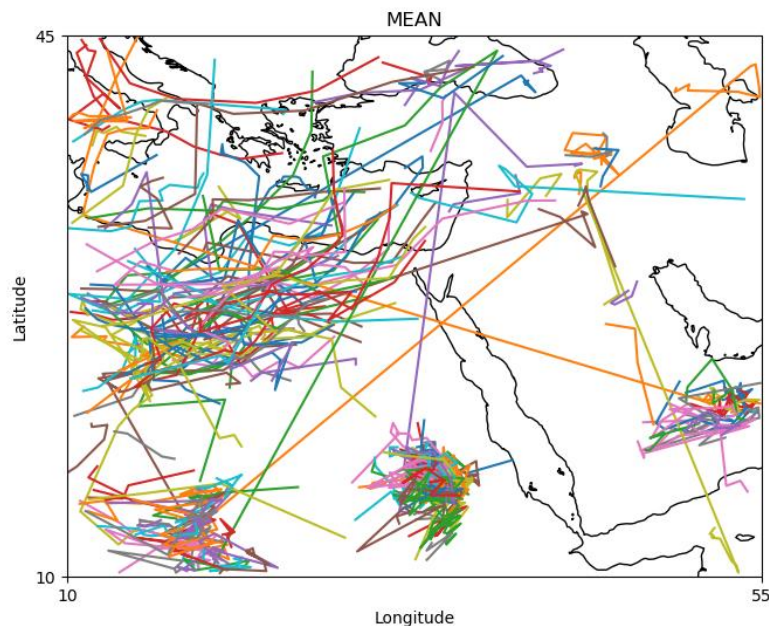
شکل ۶. مسیریابی چرخندهای منطقه مورد مطالعه در روزهای منتخب فصل بهار در فازهای هشت گانه MJO در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰ (الف: فاز ۱، ب: فاز ۲، ج: فاز ۳، د: فاز ۴).



شکل ۷. مسیریابی چرخندهای منطقه مورد مطالعه در روزهای منتخب فصل بهار در فازهای هشت گانه MJO در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰ ه: فاز ۵، و: فاز ۶، ز: فاز ۷، ح: فاز ۸.

می گیرند به سمت شرق یا مرکز حوزه مدیترانه کشیده شده و در آنجا انحلال پیدا می کنند. همچنین مسیرهایی با تراکم بالا به صورت منحنی های بسته و یا خطوطی با امتداد خیلی کم، در مناطق غرب دریای سرخ، نواحی استوایی آفریقا و خلیج فارس قابل مشاهده است که نشان از حضور چرخندهای ساکن و یا شبه ساکن در این مناطق دارد. مسیرهایی روی حوزه مدیترانه، به نسبت مناطق ذکر شده، شمار کمتری دارند ولی در پهنه بیشتری امتداد پیدا کرده و مسیر مستقیم تری را طی کرده اند. در غرب ایران نیز مسیرهایی با تراکم نسبتاً کم دیده می شود.

شکل ۸، مجموع مسیرهایی چرخندی روزهای منتخب فصل بهار در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰ را نشان می دهد. با توجه به این شکل، هر خط نمایشگر مسیر یک چرخند می باشد. بررسی تراکم مسیرهایی چرخندی در منطقه مورد مطالعه، نشانگر حضور حداکثری مسیرهایی چرخندی در شمال آفریقا می باشد که یافته های فلوکاس و همکاران (۲۰۱۰)، هاسکینز و هاجز (۲۰۱۹)، مؤید این مطلب می باشد؛ و این امر گویای افزایش جو کثرفشار در سطح پایین می باشد (تریگو و همکاران، ۱۹۹۹). با توجه به شکل مورد بحث، بیشتر مسیرهایی که از شمال آفریقا منشأ



شکل ۸. مسیریابی چرخندهای منطقه مورد مطالعه در مجموع روزهای منتخب فصل بهار در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های چرخندزایی فصل بهار در فازهای مختلف مادن-جولیان در حوزه دریای مدیترانه نشان داد که بیشترین مقدار بی‌هنجاری منفی شاخص OLR در منطقه مورد مطالعه در فاز ۱ این نوسان مشاهده می‌شود که تمرکز اصلی آن بر روی ایران می‌باشد. پس از آن فازهای ۲ و ۷ به ترتیب پس از فاز ۱ مناطقی از ایران را متأثر ساخته و تمرکز بی‌هنجاری منفی بر روی قسمت‌های شرقی و جنوب غربی ایران نشان از ابرناکی بیشتر از میانگین و در نهایت وقوع بارش در منطقه است.

بررسی مناطق چرخندزایی حاکی از تشکیل یک چرخند بر روی عراق در بازه زمانی مورد مطالعه در فاز ۱ می‌باشد، اما در فاز ۲ به شمار تشکیل چرخندها بر روی عراق و نواحی غربی ایران به شدت افزوده شده است. این وضعیت در فاز ۳ و ۷ نیز مشهود است که بیانگر توزیع نامتقارن فعالیت چرخندها در دوره گرم (فصل بهار) می‌باشد. هسته‌های چرخندی در هر یک از فازها علی‌رغم بالا بودن بی‌هنجاری منفی OLR به مانند فاز ۱ از فراوانی کمتری برخوردارند. در فازهای مختلف MJO و در دوره گرم سال (فصل بهار) بیشتر چرخندها متمرکز بر روی عراق و نواحی غرب و

شمال غرب ایران بوده و سایر هسته‌های چرخندی در جنوب دریای خلیج فارس و بر روی شبه‌جزیره عربستان تشکیل شده‌اند.

نتایج حاصل از شمار مراکز چرخندزایی نشانگر رخداد بیشینه چرخندزایی هم‌زمان با چیرگی فاز ۸ (۱۷٪) و کمینه آن با چیرگی فازهای ۱ و ۴ (۹٪) می‌باشد. بیشترین کمینه‌های فشار در این فصل، بر روی حوزه مدیترانه گسترده شده‌اند و بقیه مربوط به منطقه غرب ایران، شمال آفریقا و غرب دریای سرخ می‌باشند. مرکز چرخندزایی با کمترین فشار ثبت شده مربوط به فاز ۵ با فشار ۹۹۱/۲ هکتوپاسکال می‌باشد که در روی حوزه مدیترانه (دریای سیاه) قرار دارد. توزیع فصلی نشان داد که از ۲۵ مورد کمینه فشار در دوره گرم (فصل بهار)، ۱۷ مورد مربوط به ماه آوریل، ۶ مورد مربوط به ماه مارس و ۲ مورد مربوط به ماه مه است.

مسیریابی چرخندها در منطقه بیان داشت که در فازهای مختلف فصل بهار تراکم مسیرها در منطقه شمال آفریقا در حداکثر میزان خود می‌باشد که از طریق دریای مدیترانه به سمت ایران گسترده شده‌اند. در فازهای ۱ الی ۵ مسیرهای چرخندی در کل منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده هستند ولی در فازهای ۶ الی ۸ هیچ مسیر چرخندی بر روی حوزه

مدیترانه به چشم نمی‌خورد و بیشتر به سمت عرض‌های پایین کشیده شده‌اند و در کل چرخندهای تشکیل شده بر روی حوزه مدیترانه تعداد کمتری داشته ولی مسیرهای طولانی‌تری را نسبت به چرخندهای تشکیل شده بر روی شمال آفریقا، طی کرده‌اند. همچنین مسیرهایی با تراکم بالا در مناطق غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا قابل مشاهده است. روی حوزه مدیترانه، خلیج فارس و غرب ایران نیز مسیرهایی با تراکم نسبتاً کم دیده می‌شود. در مقایسه نتایج به دست آمده در این مطالعه با سایر پژوهش‌های انجام شده از جمله مجلسی راد (۱۴۰۳) مشخص شد که گردش جو منطقه سبب شده تا فازهای ۱ و ۲ و ۷ و ۸ در اغلب ایام سال چرخندهای قوی را از مسیر مدیترانه تا نواحی غرب و جنوب غرب ایران طی کنند که در تحقیق حاضر نیز قابل مشاهده بودند. در تحقیقی که هارتل (۲۰۲۲) انجام داد مشاهده شد که در فازهای MJO همرفت‌های عمیق در خشکی به وقوع می‌پیوندد که در تحقیق حاضر نیز این جریانات همرفتی در مناطق مختلف ایران با کاهش شدید مقدار OLR مشهود بود که با افزایش چرخندزایی شرایط ترکیبی را در افزایش ناپایداری‌ها در منطقه رقم زده‌اند.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر، مستخرج از رساله دکتری و تحت حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد. لذا نویسندگان، از پشتیبانی معاونت محترم پژوهشی و دانشکده علوم اجتماعی دانشگاه محقق اردبیلی کمال تشکر را دارند.

مراجع

احمدی، م. و جعفری، ف. (۱۳۹۷). مسیریابی کامل و تحلیل سینوپتیک یک نمونه مطالعاتی از سامانه‌های منجر به بارش‌های سنگین بیش از ۵۰ میلی‌متر در جنوب ایران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۵(۳)، ۸۳-۱۰۲

پورکریم، ر.؛ عساکره، ح.؛ فرجی، ع. و خسروی، م. (۱۴۰۱). واکاوی روند تغییرات شمار مراکز چرخندی

دریای مدیترانه در بازه زمانی (۲۰۱۸-۱۹۷۹). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۹(۴)، ۲۱۱-۲۲۲.

رزقی جهرمی، زهرا؛ نصر اصفهانی، محمدعلی؛ محمدی، جهانگرد، قاسمی، احمدرضا (۱۳۹۸). بررسی میزان تأثیر فازهای پدیده نوسان مادن جولیان بر بارش و رواناب سه رودخانه مهم استان فارس. پژوهش آب ایران، ۱۳(۱): ۷۹-۹۰.

زینالی، ب.؛ صلاحی، ب.؛ نوروزپرست، ه. و مینایی، س. (۱۴۰۰). بررسی ارتباط نوسانات چرخندگی تغییرات اقلیمی بارش‌های شمال غرب ایران (مطالعه موردی: ایستگاه سردشت). *پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی*. ۲(۸)، ۵۴-۳۵.

سیدنژاد گل خطمی، ن.؛ بذرافشان، ج.؛ نازی قمشلو، آ. و ایران‌نژاد، پ. (۱۳۹۸). تحلیل مکانی احتمال رخداد بارش در ایران در فازهای مختلف سیگنال اقلیمی مادن-جولیان. *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۲(۳)، ۱۹۲-۲۰۱.

طهماسبی پاشا، ا.؛ میرزایی، م. و محب‌الحجه، ع. ر. (۱۴۰۰). بررسی ارتباط شاخص‌های همرفتی و دورپیوندی در منطقه غرب آسیا. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۵(۳)، ۱-۲۶.

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

علیجانی (۱۳۸۲). کتاب *آب‌وهوای ایران*. انتشارات پیام نور، تهران.

کاویانی، م. ر. و علیجانی، ب. (۱۳۹۱). *مبانی آب‌وهواشناسی*. انتشارات سمت، تهران، ۵۳۲.

مجلسی راد، م. (۱۴۰۳). تحلیل همدیدی ارتباط نوسان مادن جولیان (MJO) با بارش و دما در نواحی جنوبی کشور، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، دانشگاه تهران. استاد راهنما: قاسم عزیزی.

محمدرپور، ک.؛ حجازی‌زاده، ز.؛ سلیقه، م. و قائمی، ه. (۱۴۰۲). واکاوی بی‌هنجاری بارش‌های ایران تحت تأثیر نوسان مادن جولیان طی دوره (۱۹۸۰-۲۰۲۰). *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*. ۱۴۰۱(۵۵)، ۱-۱۴.

- (۱۳۹۵). الگوهای همدیدی در دوران همراه و بدون بارش هم‌زمان با چیرگی فاز ۱ پدیده MJO: مطالعه موردی جنوب باختری ایران. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۰(۱)، ۸۷-۷۳.
- نصر اصفهانی، م. ع.؛ محب‌الحجه، ع. ر. و احمدی گیوی، ف. (۱۳۹۶). آثار فازهای مختلف نوسان مدن-جولین بر برخی کمیت‌های هواشناختی و ردسپهر در جنوب غرب آسیا. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۳(۳)، ۵۳۹-۵۵۲.
- Akhtar, N., Brauch, J., Dobler, A., Béranger, K., & Ahrens, B. (2014). Medicanes in an ocean-atmosphere coupled regional climate model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8), 2189-2201.
- Ammar, K., El-Metwally, M., Almazroui, M., & Abdel Wahab, M. M. (2014). A climatological analysis of Saharan cyclones. *Climate dynamics*, 43, 483-501. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2025-0>
- Aragão, L., & Porcù, F. (2022). Cyclonic activity in the Mediterranean region from a high-resolution perspective using ECMWF ERA5 dataset. *Climate Dynamics*, 58(5), 1293-1310.
- Befort, D. J., Wild, S., Kruschke, T., Ulbrich, U., & Leckebusch, G. C. (2016). Different long-term trends of extra-tropical cyclones and windstorms in ERA-20C and NOAA-20CR reanalyses. *Atmospheric Science Letters*, 17(11), 586-595.
- Catto, J.L., Ackerley, D., Booth, J.F., Champion, A.J., Colle, B.A., Pfahl, S., Pinto, J.G., Quinting, J.F. and Seiler, C. (2019). The future of midlatitude cyclones. *Curr Clim Change Rep*, 5, 407-420.
- Du, D., Subramanian, A. C., Han, W., Chapman, W. E., Weiss, J. B., & Bradley, E. (2024). Increase in MJO predictability under global warming. *Nature Climate Change*, 14(1), 68-74.
- Flocas, H. A., Simmonds, I., Kouroutzoglou, J., Keay, K., Hatzaki, M., Bricolas, V., & Asimakopoulos, D. (2010). On cyclonic tracks over the eastern Mediterranean. *Journal of Climate*, 23(19), 5243-5257.
- Haertel, P. (2022). Kelvin and Rossby Wave Contributions to the Mechanisms of the Madden-Julian Oscillation. *Geosciences*, 12(9), 314.
- Hoskins, B. J., & Hodges, K. I. (2019). The annual cycle of Northern Hemisphere storm tracks. Part I: Seasons. *Journal of Climate*, 32(6), 1743-1760. <https://doi.org/10.1175/2010EI370.1>.
- مهرآور، ص.؛ قائد امینی، ح. و ناظم‌السادات، س. م. ج. (۱۳۹۷). بررسی پیوند نوسان‌های مادر-جولیان با النینو-نوسان‌های جنوبی و بازخورد آن بر بارش‌های پاییزه استان فارس. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۲(۲)، ۱۲۶-۱۰۹.
- موحدی، س. و کاوسی، ر. (۱۳۹۳). بررسی همدید کنش‌های چرخندی بر روی ایران. *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۹(۱۱۵)، ۹۷-۱۱۲.
- ناظم‌السادات، س. م. ج.؛ رستم‌پور، آ. و شاهقلیان، ک. Ilie, V. A., Croitoru, A. E., & Man, T. C. (2021). Mediterranean Cyclones Tracks in Europe with Special View over Romania (1985-2015). Scientific Research & Education in the Air Force-AFASES, 2021.
- Iordanidou, V., Koutroulis, A. G., & Tsanis, I. K. (2014). A probabilistic rain diagnostic model based on cyclone statistical analysis. *Advances in Meteorology*, 2014(1), 498020.
- Jamshidi Khezeli, T., Ranjbar Saadat Abadi, A., Nasr-Esfahany, M. A., Tajbakhsh Mosalman, S., & Mohebalhojeh, A. R. (2022). Autumn and Winter Extreme Precipitation Events and their Relationship with ENSO, NAO and MJO Phases over the West of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(1), 201-218.
- Jia, X., Chen, L., Ren, F., & Li, C. (2011). Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28, 521-533. doi: 10.1007/s00376-010-9118-z
- Knutson, T. R., & Weickmann, K. M. (1987). 30-60 day atmospheric oscillations: Composite life cycles of convection and circulation anomalies. *Monthly Weather Review*, 115(7), 1407-1436.
- Kouroutzoglou, J., Flocas, H. A., Keay, K., Simmonds, I., & Hatzaki, M. (2011). Climatological aspects of explosive cyclones in the Mediterranean. *International Journal of Climatology*, 31(12), 1785-1802.
- Lau, W. K. M., & Waliser, D. E. (2011). Intraseasonal variability in the atmosphere-ocean climate system. 2nd ed., 613 pp., Springer Science & Business Media, Heidelberg, Germany.
- Liebmann, B., & Smith, C. A. (1996). Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(6), 1275-1277.
- Lim, E. P., & Simmonds, I. (2007). Southern Hemisphere winter extratropical cyclone characteristics and vertical organization observed with the ERA-40 data in 1979-2001.

- Journal of Climate*, 20(11), 2675-2690. DOI:10.1175/JCLI4135.1.
- Lionello, P., Trigo, I.F., Gil, V., Liberato, M.L., Nissen, K.M., Pinto, J.G., Raible, C.C., Reale, M., Tanzarella, A., Trigo, R.M., & Ulbrich, S., (2016). Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region: a consensus view among methods with different system identification and tracking criteria. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68(1), 29391.
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1994). Observations of the 40–50-day tropical oscillation—A review. *Monthly Weather Review*, 122(5), 814-837.
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1972). Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. *Journal of the atmospheric sciences*, 29(6), 1109-1123.
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1971). Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the atmospheric sciences*, 28(5), 702-708.
- Miller, D. E., Gensini, V. A., & Barrett, B. S. (2022). Madden-Julian oscillation influences United States springtime tornado and hail frequency. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1), 37. doi:10.1038/s41612-022-00263-5.
- Mylonas, M. P., Douvis, K. C., Polychroni, I. D., Politi, N., & Nastos, P. T. (2019). Analysis of a mediterranean tropical-like cyclone. Sensitivity to WRF parameterizations and horizontal resolution. *Atmosphere*, 10(8), 425.
- Nazemosadat, M. J., & Shahgholian, K. (2017). Heavy precipitation in the southwest of Iran: association with the Madden–Julian Oscillation and synoptic scale analysis. *Climate Dynamics*, 49, 3091-3109.
- Nissen, K. M., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., & Ulbrich, U. (2014). Mediterranean cyclones and windstorms in a changing climate. *Regional environmental change*, 14, 1873-1890.
- Pezza, A. B., Simmonds, I., & Renwick, J. A. (2007). Southern Hemisphere cyclones and anticyclones: Recent trends and links with decadal variability in the Pacific Ocean. *International Journal of Climatology*, 27(11), 1403-1420. DOI: 10.1002/joc.1477.
- Pinto, J. G., Spanghel, T., Ulbrich, U., & Speth, P. (2005). Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: individual tracks and climatology. *Meteorologische Zeitschrift*, 14(6), 823-838. Doi: 10.1127/0941-2948/2005/0068
- Pinto, J. G., Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., Spanghel, T., Reyers, M., & Zacharias, S. (2007). Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Climate Dynamics*, 29, 195-210.
- Pohl, B., & Matthews, A. J. (2007). Observed changes in the lifetime and amplitude of the Madden–Julian oscillation associated with interannual ENSO sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 20(11), 2659-2674. <https://doi.org/10.1175/JCLI4230.1>
- Pourasghar, F., Tozuka, T., Ghaemi, H., Oettli, P., Jahanbakhsh, S., & Yamagata, T. (2015). Influences of the MJO on intraseasonal rainfall variability over southern Iran. *Atmospheric Science Letters*, 16(2), 110-118. <https://doi.org/10.1002/asl2.531>
- Ragone, F., Mariotti, M., Parodi, A., Von Hardenberg, J., & Pasquero, C. (2018). A climatological study of western mediterranean medicanes in numerical simulations with explicit and parameterized convection. *Atmosphere*, 9(10), 397.
- Raible, C. C., Della-Marta, P. M., Schwierz, C., Wernli, H., & Blender, R. (2008). Northern Hemisphere extratropical cyclones: A comparison of detection and tracking methods and different reanalyses. *Monthly Weather Review*, 136(3), 880-897. DOI: <https://doi.org/10.1175/2007MWR2143.1>
- Simmonds, I., Murray, R.J., & Leighton, R.M. (1999). A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. *Aust. Meteor. Mag.*, Special Issue, 35–49.
- Simmonds, I., & Keay, K. (2000). Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP–NCAR reanalysis. *Journal of Climate*, 13(5), 873-885.
- Trigo, I. F., Davies, T. D., & Bigg, G. R. (1999). Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. *Journal of climate*, 12(6), 1685-1696.
- Trigo, I.F., Liberato, M.L., Nissen, K., Pinto, J.G., Lionello, P., Trigo, R.M., Ulbrich, S., Ulbrich, U., & Ordóñez, P. (2013). A multi-method analysis of cyclone activity in the Mediterranean Region. In EGU General Assembly Conference Abstracts, EGU2013-9689
- Wheeler, M. C., & Hendon, H. H. (2004). An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly weather review*, 132(8): 1917-1932. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2)
- Yulihastin, E., Satyawardhana, H., & Nugroho, G. A. (2017). MJO modulation on diurnal rainfall over West Java during pre-monsoon and strong El Niño periods. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 54(1), 012029. IOP Publishing.
- Zhang, C. (2005). Madden–Julian oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(2), 1-36.

- Zhang, C. (2013). Madden–Julian oscillation: Bridging weather and climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(12): 1849-1870. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00026.1>
- Zhang, L., Wang, B., & Zeng, Q. (2009). Impact of the Madden–Julian oscillation on summer rainfall in southeast China. *Journal of Climate*, 22(2), 201-216. doi: 10.1175/2008JCLI1959.1.