

An Investigation of the Characteristics of the Cold Season Cyclogenesis in Different Phases of the Madden-Julian Oscillation within the Mediterranean Region

Maryam Teymouri¹, Bromand Salahi^{2✉}, Mohammad Ali Nasr Esfahani³

1. PhD student of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: maryamteymouri@uma.ac.ir.

2. Corresponding author, Professor of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: salahi@uma.ac.ir

3. Assistant professor of Water Engineering, Shahr-e Kord University, Department of Hydraulic Engineering, Shahr-e Kord, Iran. E-mail: mnasr@sku.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	To study the cyclogenesis within the Mediterranean region in different phases of Madden-Julian Oscillation (MJO) during the cold season (November, December, January, and February) between 1989 and 2020, MJO index and mean sea level pressure data from the European Centre for Medium-Term Atmospheric Prediction, ERA5 section were utilized. For visualizing the frequency, depth, and tracking characteristics of cyclogenesis, the University of Melbourne method was used. The results showed that the strongest cyclones in the region formed in phases 8, 6, and 7, respectively, with a pressure less than 994 hPa. In terms of the frequency of cyclogenesis and the core of cyclones in the region, the highest and the lowest amount of cyclogenesis were related to phase 7 and 1, respectively. The results showed that phases 6 and 7 have the strongest central pressures, whereas phases 1, 3, and 5 have the weakest central pressures of the MJO phases. Phase 2 has the lowest value of central pressure and the highest average pressure is related to phase 5. The tracking of cyclones that formed within the Mediterranean region showed that most of the paths that ended in the western regions of Iran were in phases 2 and 8, whereas in other phases, these tracks had a southwest to northwest direction. These situations were the case during phases 3, 4, 6 and 7, which caused most of the cyclones formed in the cold season of the year to affect most of the north-western regions of Iran.
Article history: Received: 17 September 2024 Revised: 24 October 2025 Accepted: 29 October 2025 Published: 21 November 2025	
Keywords: Madden-Julian Oscillation, Cyclogenesis, Cyclone Tracking Algorithm of Melbourne University, Cold season, Mediterranean.	

Cite this article: Teymouri, M., Salahi, B., & Nasr Esfahani, M-A. (2025). An Investigation of the Characteristics of the Cold Season Cyclogenesis in Different Phases of the Madden-Julian Oscillation within the Mediterranean Region. *Journal of Geography and Planning*, 31 (93), 115-133. <http://doi.org/10.22034/gp.2024.63576.3305>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2024.63576.3305>

Publisher: University of Tabriz.

Introduction

The Madden-Julian Oscillation (MJO) is an intra-seasonal oscillation associated with a large-scale convective system (approximately 10,000 kilometers in its active phase) that propagates eastward with a temporal frequency of 30 to 90 days, moving at an average speed of about 5 meters per second across the tropical regions of the Indian Ocean and the western Pacific Ocean in the Northern Hemisphere. It significantly influences global precipitation and climate patterns. In addition to its effects on tropical climates, it has a wide-ranging impact on the extratropical climate. On the other hand, mid-latitude cyclones play an important role in the general atmospheric circulation due to the transfer of momentum, heat, and moisture between higher and lower latitudes. There are two major regions in the Northern Hemisphere where cyclones influence the hemisphere's climate, particularly in terms of the water cycle, extreme weather events, and on a synoptic scale. These regions are the North Atlantic, the Mediterranean, and the North Pacific. The Mediterranean basin is one of the world's key cyclone-generating regions. Mediterranean cyclones affect the climates in areas of central and eastern Europe, Asia, and northern India.

Materials and Methods

In this study, to examine cyclogenesis conditions during different phases of the Madden-Julian Oscillation (MJO) in the Mediterranean region during the cold season (November, December, January, and February), MJO index data and sea level pressure data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA5 section between 1989 and 2020 were utilized. Three aspects of cyclogenesis characteristics — 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, as well as phases one through eight where this amplitude was consecutively maintained, were extracted as the study period. Notably, due to the limited number of selected periods based on these specified conditions, phases that missed one cycle were also included, resulting in 42 selected periods for the cold season overall. Filters were applied to the extracted data using the Melbourne University algorithm, which included: a) cyclones located within the defined spatial and temporal boundaries (10-55°E / 10-45°N, during 1989-2020) were included; 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 pressure for the cold season set at 1010.87 hPa.

Results

The study of cyclogenesis in the eight phases of the Madden-Julian Oscillation (MJO) revealed that cyclogenesis nuclei in the Mediterranean region vary (from 993 to 1010 hPa). Among these, the strongest cyclones formed over the Mediterranean in phase 8. In terms of cyclone occurrence diversity, phases 8, 1, and 2 exhibited the highest diversity compared to other MJO phases. During the cold season, cyclogenesis regions are observed throughout the Mediterranean basin, western Iran, the southern Persian Gulf, the western Red Sea, northern Africa, and tropical Africa. Regarding the frequency of cyclonic nuclei and cyclogenesis in the region, phase 7, with 39 centers (19.40% of the long-term seasonal average), and phase 1, with 12 centers (5.97% of the long-term seasonal average), exhibited the highest and lowest numbers of cyclogenesis centers, respectively. Notably, phase 2 had the lowest central pressure in cyclonic nuclei, whereas the highest mean pressure in the cyclones formed in the region was related to phase 5. Furthermore, an analysis of the pressure depth of the cyclonic centers in the region showed that phases 6 and 7 had the most frequent low-pressure minima, whereas phases 1, 3, and 5 had the least. Most low-pressure nuclei formed over the Mediterranean, with some also forming in western Iran. February, January, and December recorded the strongest cyclones compared to other months of the cold season. Cyclone tracking over the Mediterranean region indicated that the most tracks ending in western Iran occurred in phases 2 and 8, whereas in other phases, the trajectories were northwesterly, ending in northwestern Iran, especially in phases 3, 4, 6, and 7. During the cold season, cyclone paths were more dense over the Mediterranean basin and western Iran, with less dense paths observed in the western Red Sea, tropical Africa, and the southern Persian Gulf.

Conclusion

The results indicated that the strongest cyclones in the region were formed in phases 8, 6, and 7, with pressures below 994 hPa. In terms of cyclone frequency and cyclogenesis in the region, phases 7 and 1 recorded the highest and lowest cyclogenesis, respectively. The analysis of central pressure depth in cyclones showed that phases 6 and 7 produced the strongest cyclones, while phases 1, 3, and 5 had the weakest cyclones during the Madden-Julian Oscillation. Phase 2 exhibited the lowest central pressure in cyclogenesis, whereas phase 5 had the highest average pressure within cyclones formed in the region. Cyclone tracking over the Mediterranean revealed that most paths ending in western Iran occurred in phases 2 and 8. In other phases, the tracking shifted from southwest to northwest, particularly in phases 3, 4, 6, and 7, causing most of the cyclones formed during the cold season to primarily impact northwestern Iran.

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

مریم تیموری^۱، برومند صلاحی^۲، محمدعلی نصر اصفهانی^۳

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: maryamteymouri@uma.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استاد آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: salahi@uma.ac.ir
۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mnasr@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰ کلیدواژه‌ها: مادن-جولیان، چرخندزایی، الگوریتم مسیریابی چرخند دانشگاه ملبورن، دوره سرد، منطقه مدیترانه.	در این مطالعه به منظور بررسی وضعیت چرخندزایی در فازهای مختلف مادن-جولیان در منطقه مدیترانه در دوره سرد سال از داده‌های شاخص مادن-جولیان (MJO) و داده‌های فشار تراز دریا مربوط به مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جو اروپا بخش ERA5 بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۰ در دوره سرد سال استفاده شده است. ویژگی‌های چرخندزایی در سه بخش فراوانی، عمق و ردیابی چرخندها از الگوریتم تشخیص و مسیریابی چرخند دانشگاه ملبورن در چرخه‌های کامل رخداد MJO در دوره مورد مطالعه به دست آمده و تحلیل شدند. نتایج نشان داد قوی‌ترین چرخندهای منطقه به ترتیب در فازهای ۸، ۶ و ۷ با فشاری کمتر از ۹۹۴ هکتوپاسکال تشکیل شده‌اند. از نظر فراوانی چرخندها در منطقه بیشترین و کمترین مقدار چرخندزایی به ترتیب مربوط به فاز ۷ و فاز ۱ رخداد MJO می‌باشد. نتایج حاصل از عمق فشار مرکزی چرخندها نشان داد دو فاز ۶ و ۷ دارای قوی‌ترین و فازهای ۱، ۳ و ۵ دارای ضعیف‌ترین چرخندها در طی فازهای مادن-جولیان می‌باشند. فاز ۲ کمترین مقدار فشار مرکزی را در هسته‌های چرخندی به خود اختصاص داده و بیشترین میانگین فشار نیز در چرخندهای تولید شده در منطقه مربوط به فاز ۵ است. مسیریابی چرخندهای تشکیل شده در منطقه مدیترانه نشان داد که عمده مسیرهای ختم شده به مناطق غربی ایران در دو فاز ۲ و ۸ بوده و در سایر فازها مسیری جنوب غرب به شمال شرق به خود گرفته که این وضعیت در فازهای ۳، ۴، ۶ و ۷ سبب شده تا عمده چرخندهای تشکیل شده در دوره سرد سال بیشتر مناطق شمال غرب ایران را متأثر سازد.

استناد: تیموری، مریم؛ صلاحی، برومند؛ و نصر اصفهانی، محمدعلی (۱۴۰۳). بررسی ویژگی‌های چرخندزایی منطقه مدیترانه در فصل سرد در فازهای مختلف مادن-جولیان. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۱ (۹۳)، ۱۱۵-۱۳۳.

<http://doi.org/10.22034/gp.2024.63576.3305>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

نوسانِ مادن-جولیان (مادن و جولیان؛ ۱۹۷۱، ۱۹۷۲) یک نوسان درون فصلی همراه با یک سیستم همرفتی بزرگ‌مقیاس (تقریباً ۱۰۰۰۰ کیلومتر در فاز فعال آن) است که با بسامد زمانی ۹۰-۳۰ روزه به سمت 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 ویکمن؛ ۱۹۸۷؛ ژانگ؛ ۲۰۰۵) و به‌طور معناداری الگوهای بارش و اقلیمی جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (لائو و والیسر؛ ۲۰۱۱؛ ژانگ، ۲۰۱۳). علاوه بر اقلیم مناطق گرمسیری، تأثیر گسترده‌ای بر اقلیم مناطق برون‌حاره‌ای نیز دارد (فرانتی؛ ۱۹۹۰). همچنین از عوامل اصلی و مستقل کنترل‌کننده هوا، سامانه‌های فشار هستند که ویژگی‌های رطوبت، دما و فشار را با تغییرات زمانی و مکانی خود، تعیین می‌کنند. بیشتر این سامانه‌های فشار، مقیاس متوسط یا همدید دارند (جهانبخش، اشرفی و عساکره، ۱۴۰۰). چرخندهای عرض‌های میانی از جمله سامانه‌های فشاری هستند که نقش مهمی در گردش عمومی جو به دلیل انتقال گشتاوری، گرما و رطوبت مابین عرض‌های بالایی و پایینی دارند (بارتولی؛ ۲۰۰۹). عرض‌های میانی اقیانوس اطلس و اقیانوس آرام به‌عنوان دو ناحیه اصلی و دریای مدیترانه به‌عنوان یک منطقه ثانویه به شمار می‌روند که چرخندهای این مناطق، اقلیم این نیمکره را بخصوص در زمینه چرخه آب و فرین‌های اقلیمی و در ابعاد سینوپتیک تحت تأثیر قرار می‌دهد. حوزه دریای مدیترانه یکی از مناطق مهم چرخندزایی دنیا است (رومه، زیو و سارونی؛ ۲۰۰۷). چرخندهای مدیترانه اقلیم مناطقی از مرکز و شرق اروپا، آسیا و هند شمالی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (لیونلا، ریزولی و بوسکولو؛ ۲۰۰۶)

پیشینه پژوهش

مطالعات داخلی

مطالعات خارجی

از تحقیقات بین‌المللی اخیر می‌توان به پژوهش‌های دو و همکاران^۱ (۲۰۲۴) اشاره کرد که با بررسی شرایط MJO از دیدگاه تغییر اقلیم دریافتند که روند رو به رشدی در شدت این پدیده در منطقه حاره‌ای به وقوع پیوسته است و شدت یافتن فازهای MJO سبب شده تا گردش جو منطقه و فرامنطقه‌ای بیش از پیش به‌خصوص در مناطق جنب حاره متأثر گردد. این در حالی است که با توسعه امواج کلین و راسبی در درون این سامانه، گردش جو و امواج غربی در عرض‌های میانه نیز دستخوش تغییرات شده است. ویتارت و بالماسدا^۲ (۲۰۲۴) در یک بررسی سعی داشتند تا به درکی از خطاهای ناشی از پیش‌بینی MJO و اثرات آن در عرض‌های جنب حاره با استفاده از داده‌های مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جو اروپا دست یابند. ایشان دریافتند که خطاها در پیش‌بینی این دورپیوند، حاصل نادیده گرفتن پدیده‌های جوی اقیانوسی به‌مانند NINO و SOI می‌باشد که با اضافه نمودن آن به مدل‌های پیش‌بینی می‌توان تغییرات MJO را با دقت بالاتری مورد بررسی قرار داد و واداشتهای ناشی از آن در مناطق جنب حاره با تأخیر زمانی دقیق‌تری مشاهده گردد. ایلی، کروتورو و من^۳ (۲۰۲۲) به بررسی مسیرهای چرخندهای مدیترانه در اروپا به‌ویژه رومانی پرداختند. ایشان دریافتند که بیشترین منطقه در مسیر چرخندها، مناطق مدیترانه مرکزی و شرقی هستند، ۴ درصد از چرخندهای شکل گرفته در حوزه مدیترانه از منطقه رومانی عبور کرده‌اند. از نظر فصلی، بیشترین فراوانی وقوع مختص زمستان

1Madden & Julian

2Knutson & Weickmann

3Zhang

4Lau & Waliser

5Ferranti

6Bartholy

7Romem, Ziv, & Saaroni

8Lionello, Malanotte-Rizzoli, & Boscolo

9Du et al.

10Vitart & Balmaseda

11Ilie, Croitoru, & Man

و کمترین آن به تابستان است. هیچ تغییر قابل توجهی در وقوع سالانه یا فصلی مشاهده نشد. سوماتسو و میورا^۱ (۲۰۲۲) به بررسی تغییرات در سرعت حرکت شرق‌سوی نوسان مادر-جولیان با نوسان گردش واکر پرداختند. نتایج نشان داد زمانی که گردش منطقه‌ای در مقیاس بزرگ با جریان غربی تراز بالا و جریان شرقی تراز پایین، گرایش به سمت خشکی‌های مجاور داشته، همین امر سبب تقویت جریانات همرفتی در مناطق ساحلی و هم‌جوار با MJO می‌شود. از طرفی نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد که MJO جزء جدایی‌ناپذیر گردش واکر است و حرکت شرق‌سوی آن توسط وضعیت جریان بزرگ‌مقیاس گردش واکر تعدیل می‌شود. برینگتون و همکاران^۲ (۲۰۲۲) به بررسی روابط بین حرکت نوسان MJO به سمت شرق و ساختار گردش آن پرداختند. نتایج گویای این امر بود که علت اصلی گردش شرق‌سوی MJO، انتشار امواج کلون می‌باشد. گردش موج کلون در شرق همرفت MJO، رطوبت را برای تقویت حرکت مداوم شرق‌سو افزایش می‌دهد. MJO، عمدتاً از طریق فرارفت رطوبت نصف‌النهاری به دلیل جفت شدن بین موج کلون و اختلالات شبه راسبی در ناحیه شرق همرفت فعال می‌باشد. هارتل^۳ (۲۰۲۲) در تحقیقی به اثر مشترک بین موج کلون و راسبی در توسعه مکانیسم MJO پرداخت. نتایج نشان داد موج راسبی سبب گردش افقی رطوبت قبل از وقوع شدیدترین همرفت‌ها بوده و از سویی به توسعه جریانات سطحی کمک کرده و شرایط را برای افزایش تبخیر در نزدیکی مرکز MJO فراهم می‌سازد. از طرفی شارهای سطحی مرتبط با موج کلون به حفظ گردش آن در خارج از ناحیه فعال همرفتی MJO کمک می‌کند و نقش تعادلی را در حفظ گسترش MJO بر عهده دارد. مایلر، جنسینی و بارت^۴ (۲۰۲۲) به اثر MJO بر فراوانی وقوع گردبادها و بارش تگرگ در نتیجه تشکیل چرخندهای قوی پرداختند. نتایج نشان از آن داشت که وقوع MJO با تأخیری ۳ الی ۴ هفته‌ای سبب افزایش منطقه واگرایی فوقانی بر روی آمریکا شده و از سویی همبستگی مثبتی با افزایش فراوانی این دو مخاطره با تأخیرهای زمانی در منطقه به ثبت رسیده است. آراگائو و پورکو^۵ (۲۰۲۱) به بررسی فعالیت‌های چرخندی در منطقه مدیترانه پرداختند. نتایج نشان داد که مناطق اصلی چرخندزایی شامل دریای اژه، سواحل تونس و لیبی می‌باشند و همچنین دریافته‌اند که چرخندها در فصل سرد، تعداد کمتر، عمق بیشتر و کمترین مقدار MSLP را دارند.

مهرآور، قائد امینی و ناظم‌السادات (۱۳۹۷)، پیوند بین نوسان‌های مادر-جولیان با النینو-نوسان‌های جنوبی و بازخورد آن را بر بارش‌های پاییزه ۹ ایستگاه همدیدی استان فارس در بازه زمانی (۲۰۱۳-۱۹۷۴) مورد بررسی قرار دادند و دریافته‌اند که در دوران النینو، بارش و احتمال رخداد آن در فاز منفی MJO در همه ایستگاه‌های بررسی شده به گونه معنی‌داری بیشتر از مقادیر مشابه در دوران فاز مثبت MJO است. در دوران لانینا، در زمان چیرگی رخداد فاز مثبت یا منفی MJO، ویژگی‌های بارش فارس، نوسان درخور توجهی نداشت. رزقی چهارمی (۱۳۹۵) در تحلیل آماری خود بر اساس نتایج ایستگاه‌های هیدرومتری نشان داد که فازهای ۱ و ۸ MJO بیشترین تأثیر مثبت و فازهای ۴ و ۵ بیشترین تأثیر منفی را بر رواناب دارند. از طرفی تحلیل نتایج ایستگاه‌های باران‌سنجی فاز ۷ و ۸ بیشترین تأثیر مثبت و فاز ۳ و ۵ بیشترین تأثیر منفی را بر بارش این مناطق نشان داد. سیدنژاد گل خطمی و همکاران (۱۳۹۸) به تحلیل مکانی احتمال رخداد بارش در ایران در فازهای مختلف سیگنال اقلیمی مادر-جولیان پرداختند. تحلیل هم‌زمانی وقوع بارش‌ها و فازهای مختلف MJO نشان داد که در فاز منفی احتمال رخداد بارش متناسب با عرض جغرافیایی از جنوب به شمال کشور کاهش می‌یابد. همه نقاط در محدوده مطالعاتی حداقل ۴۵ درصد بارش خود را در فاز منفی دریافت کرده‌اند. این مقدار در عرض‌های ۲۵ درجه جنوب کشور به حدود ۷۵ درصد می‌رسد. به عکس، احتمال رخداد بارش در فاز مثبت به صورت تقریباً منظم از جنوب به شمال افزایش می‌یابد و همه نقاط محدوده مورد بررسی حداقل ۲۵ درصد بارش خود را در این فاز دریافت کرده‌اند. این مقدار در شمال و به‌ویژه شمال غرب کشور حداکثر مقدار ۶۰ درصد دارد که نسبت به فاز منفی تقریباً ۲۰ درصد افزایش یافته است. کمترین احتمال بارش در فاز مثبت، مربوط به جنوب کشور و عرض‌های ۵ درجه است که احتمال رخداد بارش نسبت به فاز منفی ۵۰ درصد کاهش یافته است. محمدی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه خود بر روی

1Suematsu & Miura

2Berrington et al.

3Haertel

4Miller, Gensini, & Barrett

5Aragão & Porcu

بارش‌های سنگین دوره سرد سال بر غرب ایران، به بررسی همدیدی-دینامیکی رخداد چرخندی پرداختند و دریافتند که بیشترین بارش‌های سنگین ناشی از چرخندهایی است که در منطقه شرق مدیترانه تا عراق شکل گرفته‌اند. همچنین بیشترین رطوبت به ترتیب از دریای سرخ و سپس خلیج فارس و دریای مدیترانه تأمین می‌شود. طهماسبی، میرزایی و محب‌الحجه (۱۴۰۰) به بررسی ارتباط شاخص‌های همرفتی و دورپیوندی در منطقه غرب آسیا پرداختند. نتایج نشان داد که فاز مثبت (منفی) دو شاخص MJO و IOD با افزایش (کاهش) گستردگی مکانی توزیع مقدار شاخص‌های ناپایداری در بیشتر نواحی منطقه مورد مطالعه همراه است. ابطی و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی نقش رودخانه‌های جوی در شکل‌گیری بارش‌های سنگین غرب و شمال غرب ایران، دریافتند که این پدیده، در منطقه مورد مطالعه از سه الگوی کلی تبعیت می‌کند. دو الگوی کم‌فشار سودانی و الگوی ترکیبی کم‌فشار سودان و چرخند مدیترانه‌ای به ترتیب بیشترین نقش را در ایجاد رودخانه‌های جوی منجر با بارش سنگین بر عهده داشته‌اند. محمدپور و همکاران (۱۴۰۲) به پهنه‌بندی بی‌هنجاری بارش‌های فصل سرد ایران را تحت تأثیر MJO در دوره آماری ۱۹۸۰ الی ۲۰۲۰ پرداختند. نتایج نشان داد که فازهای ۷، ۸، ۲، ۱ به‌عنوان فازهای مؤثر بارش (MJO قوی) و فازهای ۳، ۴، ۵، ۶ به‌عنوان فازهای تضعیف‌کننده بارش‌های ایران در پهنه‌بندی، مشخص شدند (MJO ضعیف). وطن‌پرست قلعه‌جوق، صلاحی و زینالی (۱۴۰۴) در پژوهشی اثر دو شاخص OMI و RMM نوسان مادن جولیان بر فراوانی رخداد توفان‌های گرد و غبار ایستگاه‌های واقع در استان خوزستان را در فصل گرم دوره آماری (۲۰۲۱-۱۹۸۷) بررسی کردند. نتایج پژوهش حاکی از ارتباط بین نوسان مادن جولیان با گرد و غبار نشان داد که توفان‌های گردوغبار در فاز منفی شاخص‌های RMM و OMI نسبت به فاز مثبت آن‌ها بیشتر اتفاق افتاده‌اند و همچنین فاز منفی شاخص RMM، درصد بیشتری از رخداد توفان‌های گرد و غباری را نسبت به فاز منفی شاخص OMI به خود اختصاص داده است. طبق نتایج آزمون مونت‌کارلو جابجایی فازهای مثبت و منفی شاخص RMM، به‌گونه‌ای معنی‌دار رخداد توفان‌های گرد و غبار را برای بیشتر ایستگاه‌های استان خوزستان در پی دارد. مطالعات زیاد دیگری در زمینه MJO توسط پژوهشگران ایرانی صورت گرفته است (ناظم‌السادات و قائد امینی اسدآبادی، ۱۳۸۷؛ ناظم‌السادات، مهرآور و قائد امینی، ۱۳۹۲؛ ناظم‌السادات و شاهقلیان، ۱۳۹۳).

همان‌طور که بیان شد پژوهش‌های متنوعی بر روی رفتار 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 گیرد؛ اما تاکنون مطالعه جامعی در مورد تأثیرپذیری ناحیه چرخندزای مدیترانه که نقش مهمی در شکل‌گیری سامانه‌های بارش‌زایی که کشور ایران را متأثر می‌کنند، انجام نشده است. از آنجایی 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 سرد پدیده MJO مورد بررسی قرار گیرد.

روش پژوهش

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه متشکل از شاخص MJO و میانگین فشار تراز دریا (MSLP) برای ماه‌های سرد سال شامل نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه می‌باشد. شاخص MJO مورد استفاده در این مطالعه، به‌صورت دو سری زمانی شامل RMM1 و RMM2^۱ در دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۰ است که توسط ویلر و هندون^۲ (۲۰۰۴) پیشنهاد شده است. این شاخص از یک جفت توابع متعامد تجربی (EOFs) میدان‌های ترکیبی باد مداری در ۲۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال و همچنین میانگین داده‌های OLR مشاهده شده توسط ماهواره بین عرض‌های ۱۵ درجه جنوبی تا ۱۵ درجه شمالی، محاسبه می‌شود (شاخص MJO به‌صورت آنالین در RMM موجود است: <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rmm.74toRealtime.txt>). همچنین برای

داده‌های MSLP از مجموعه داده‌های بازتحلیل ERA5 با تفکیک مکانی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ درجه در بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۰ استفاده شد.

شاخص MJO

با توجه به میزان و گسترش شاخص RMM، MJO قوی را می‌توان از MJO ضعیف تشخیص داد. دوره‌های MJO با $1 > \sqrt{RMM1^2 + RMM2^2}$ و با مشخصه گسترش شرق سو و پیوسته، به‌عنوان MJO قوی در نظر گرفته می‌شود (پوهل و متیوس، ۲۰۰۷) و MJO ضعیف به‌صورت $0.9 < \sqrt{RMM1^2 + RMM2^2}$ در نظر گرفته می‌شود.

در این بررسی، روزهای وقوع این پدیده با دامنه 0.75° و بیشتر و همچنین در صورتی که فازهای یک الی هشت این پدیده به‌صورت متوالی، این دامنه را دارا بودند، به‌عنوان محدوده مطالعاتی در طول دوره مورد مطالعه، استخراج گردیدند (لازم به ذکر است با توجه به کم بودن دوره‌های منتخب بر اساس شرایط ذکر شده در بالا، دوره‌هایی با یک فاز کمتر نیز انتخاب شدند) که در کل دوره‌های منتخب برای فصل سرد ۴۲ دوره می‌باشد.

الگوریتم دانشگاه ملبورن

در این بررسی به‌منظور شناسایی، مسیریابی و تحلیل ویژگی‌های چرخندهای منطقه مدیترانه در دوره گرم سال از الگوریتم تشخیص و مسیریابی چرخند دانشگاه ملبورن (MS) که بر اساس دیدگاه شبه لاگرانژی است، استفاده شده است (پیتو و همکاران، ۲۰۰۵؛ پزا، سیموندز و رنویک، ۲۰۰۷؛ ریبیل و همکاران، ۲۰۰۸). لاپلاسی، متوسط اندازه‌گیری متناوبی از عمق D است که برای فرورفتگی‌های بیضی‌شکل شعاع R در یک میدان مسطح از رابطه زیر استفاده می‌کند.

(۱)

$$D = 0.25 \nabla^2 P R^2$$

R (شعاع چرخند) به‌عنوان فاصله میانگین وزنی از مرکز گردباد تا نقاطی که ∇P در اطراف لبه یک چرخند صفر است، در نظر گرفته می‌شود (سیموندز، موری و لایتون، ۱۹۹۹). شعاع چرخند به‌صورت رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

(۲)

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

که در آن r_i فاصله خط شعاعی از مرکز چرخند تا نقاطی است که لاپلاسی فشار در آن‌ها صفر است. N مربوط به تعداد خطوط شعاعی ترسیم شده برای هر 20° درجه است. عملگر لاپلاسی فشار مرکزی، $\nabla^2 P$ ، به‌طور مناسب شدت چرخند را توصیف می‌کند (لیم و سیموندز، ۲۰۰۷).

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 برداری به‌صورت ژئوستروفیکی، 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 (55° – 10° شرقی / 45° – 10° شمالی، بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۲۰) قرار داشتند، در نظر گرفته شدند.

1Pohl & Matthews

2Pinto et al.

3Pezza, Simmonds, & Renwick

4Raible et al.

5Simmonds, Murray, & Leighton

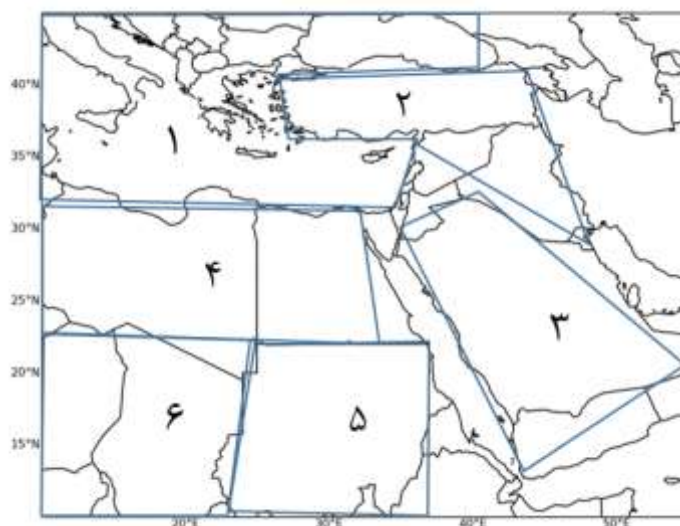
6Lim and Simmonds.

7Ammar et al.

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 گردید. برای فصل سرد حداکثر فشار ۱۰۱۰/۸۷ در نظر گرفته شد.

محدوده منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل منطقه مدیترانه با محوریت کشور ایران که در محدوده عرض جغرافیایی ۱۰° الی ۴۵° تا ۵۵° درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۰° تا ۵۵° درجه شرقی قرار گرفته است، 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^۱ در نظر گرفته شده است. در مطالعات قبلی نیز از جمله کار کوروتزاولو و همکاران^۲، ۲۰۱۱؛ عمار و همکاران^۳، ۲۰۱۴، منطقه‌بندی مشابهی صورت گرفته است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه.

(منبع: نگارندگان)

جدول ۱. طبقه‌بندی مناطق چرخندزایی منطقه مدیترانه (منبع: نگارندگان)

ردیف	مناطق چرخندزایی	نام‌گذاری مناطق
۱	دریای مدیترانه، دریای سیاه، دریای آدریاتیک، دریای اژه، دریای تیرنی و کشور ایتالیا	حوزه مدیترانه ^۱
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

1Mediterranean Region

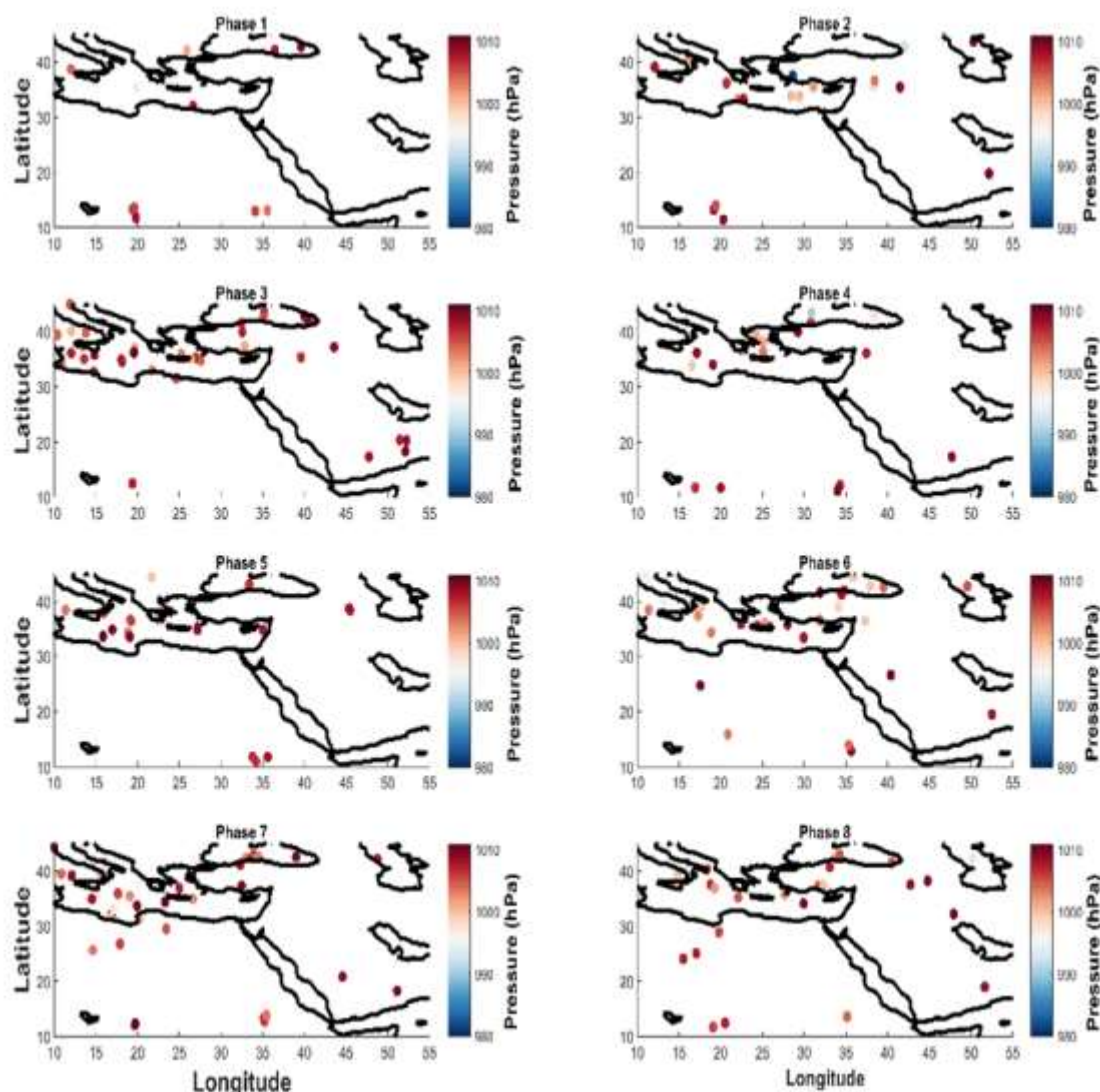
2Kouroutzoglou et al.

3Mediterranean Basin

نتایج

چرخندزایی منطقه مدیترانه در فازهای هشت‌گانه MJO

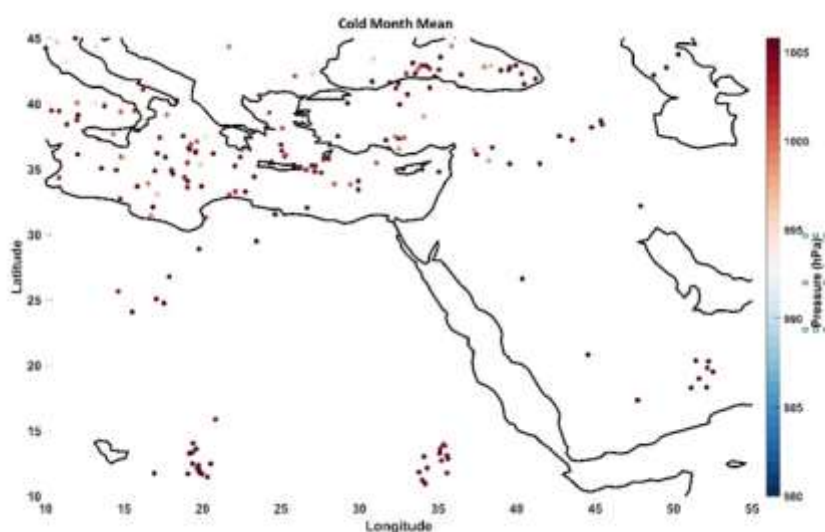
شکل ۲، پراکندگی مراکز چرخندزایی منطقه مدیترانه، در روزهای منتخب دوره سرد هر یک از فازهای هشت‌گانه MJO در طول دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۸۹ را نشان می‌دهد. با توجه به این نقشه در فاز ۱، کمینه فشار با مقدار ۹۹۶/۴ هکتوپاسکال در محدوده حوزه مدیترانه قرار دارد و مراکز چرخندزایی با فشارهای مختلف تا سطح ۱۰۱۰/۷ هکتوپاسکال در نواحی مختلف از جمله حوزه مدیترانه، غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا مشاهده می‌شود. در فاز ۲، کمینه فشار با مقدار ۹۸۱/۴ هکتوپاسکال در منطقه غرب ایران دیده می‌شود و بقیه مراکز چرخندزایی نیز علاوه بر غرب ایران در حوزه مدیترانه، جنوب خلیج فارس و نواحی استوایی آفریقا قابل مشاهده است. در فاز بعدی (۳)، مرکز چرخندزایی با کمینه فشار ۹۹۹/۸ هکتوپاسکال در حوزه مدیترانه قابل رؤیت است و همچنین بقیه مراکز فشار بر روی مناطق جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا دیده می‌شود. تنها مرکز چرخندزایی با فشار کمینه ۹۹۰/۱ هکتوپاسکال در فاز ۴، بر روی حوزه مدیترانه (روی دریای سیاه) به چشم می‌خورد و بقیه مراکز چرخندزایی همچنین در حوزه مدیترانه، غرب ایران، جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا قابل مشاهده است. در فاز ۵، کمینه فشار با مرکز ۹۹۹/۶ هکتوپاسکال در حوزه مدیترانه قرار دارد و بقیه مراکز چرخندزایی همچنین در مناطق حوزه مدیترانه و غرب دریای سرخ دیده می‌شوند. در فاز ۶، ۹۹۴/۴ هکتوپاسکال کمینه فشار مشاهده شده در حوزه مدیترانه در این فاز می‌باشد و بقیه مراکز چرخندزایی در سرتاسر حوزه مدیترانه، غرب ایران، جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ و شمال آفریقا قابل مشاهده هستند. در فاز ۷، مرکز چرخندزایی با فشار کمینه ۹۹۴/۶ هکتوپاسکال بر روی حوزه مدیترانه به چشم می‌خورد و همچنین بقیه مراکز چرخندزایی نیز در سرتاسر حوزه مدیترانه، جنوب خلیج فارس، شمال آفریقا، غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا گسترده شده‌اند. بر اساس روند کلی گستردگی مراکز چرخندزایی در فازهای قبلی، در فاز ۸ نیز، این مراکز در روی حوزه مدیترانه و غرب ایران، جنوب خلیج فارس، شمال آفریقا، غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا قابل مشاهده هستند و همچنین کمینه فشار با مقدار ۹۹۳/۱ هکتوپاسکال بر روی حوزه مدیترانه قرار دارد. همچنین عمار و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه خود دریافتند که بیشترین تکرار کمینه‌های فشار مربوط به منطقه مدیترانه غربی می‌باشد. با توجه به شکل، دو نوار چرخندزایی در فازهای مختلف MJO قابل تشخیص است. یک مورد از غرب مدیترانه به‌سوی شرق تا غرب ایران است. کمترین فعالیت این مسیر در فاز یک مشاهده می‌شود و به‌تدریج با ورود MJO به فازهای بالاتر، میزان چرخندزایی در منطقه مدیترانه نیز افزایش یافته است. بیشترین فعالیت چرخندزایی مدیترانه در عرض‌های میانی و بالاتر دیده می‌شود و نکته قابل ملاحظه این است که در غرب کشور ایران تنها در فاز انتهایی (فاز هشت) چرخندزایی قابل مشاهده است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که فازهای هشت و یک (سه و چهار) بیشترین تأثیر مثبت (منفی) را بر بارش کشور به‌ویژه نیمه جنوبی دارد (ناظم‌السادات و شاهقلیان، ۱۳۹۳؛ رزقی جهرمی و همکاران، ۱۳۹۸). نواحی حاره‌ای قاره آفریقا به‌ویژه در غرب و شرق، نوار دیگری است که محل تشکیل چرخندهای متعدد در فازهای مختلف MJO بوده است. عدم تفاوت قابل ملاحظه در تعداد چرخندهای تشکیل شده در این مسیر احتمالاً به این معنی است که رخداد MJO بر چرخندزایی در این ناحیه خیلی مؤثر نیست. به‌علاوه باید توجه داشت که معنی و مفهوم چرخندزایی در نواحی حاره‌ای اساساً با آنچه در عرض‌های میانی و نواحی جنب‌حاره‌ای معمول است تفاوت اساسی دارد. با این حال تنها در فاز سه است که در جنوب خلیج فارس تعدد چرخندها مشاهده می‌شود و در فازهای انتهایی در جنوب حوزه مدیترانه و شمال غرب آفریقا فعالیت چرخندزایی تشدید شده است.



شکل ۲. چرخندزایی منطقه مدیترانه در روزهای منتخب دوره سرد هر یک از فازهای هشت‌گانه MJO در طول دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۸۹.

مجموع چرخندزایی منطقه مدیترانه

در شکل ۳ پراکندگی مراکز چرخندزایی حوزه مدیترانه، در روزهای منتخب دوره سرد 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 قابل مشاهده می‌باشد. کمینه مراکز فشار با فشار زیر ۹۹۵/۱ هکتوپاسکال که در نقشه به رنگ آبی نمایش داده شده است، در محدوده حوزه مدیترانه و غرب ایران قرار دارند؛ و مراکز فشار حداکثری در مناطق جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا دیده می‌شود که با نتایج پژوهش محمدی و همکاران (۱۳۹۹) و زارعی و یزدان پناه (۱۳۹۱) که نشان دادند بیشترین منطقه چرخندزایی در زمستان بر روی منطقه مدیترانه و عراق می‌باشد، همخوانی دارد.



شکل ۳. مجموع چرخندزایی مدیترانه در روزهای منتخب دوره سرد در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰.

تعداد مراکز فشار چرخندزایی

تعداد مراکز چرخندزایی منطقه مورد مطالعه و میانگین فشار این مراکز، در فازهای مختلف پدیده MJO در فصل سرد و همچنین نسبت آن‌ها به میانگین طولانی‌مدت فصل مورد نظر، مورد بررسی قرار گرفت؛ که در این بررسی فاز ۷ با ۳۹ مرکز چرخندزایی (۱۹/۴۰ درصد میانگین طولانی‌مدت این فصل) و فاز ۱ با ۱۲ مرکز (۵/۹۷ درصد میانگین طولانی‌مدت این فصل) به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مراکز چرخندزایی می‌باشند. کمترین میانگین فشار مربوط به فاز ۲ (۱۸ مرکز چرخندزایی) با فشار ۱۰۰۳/۱ هکتوپاسکال (میانگین فشار کل دوره سرد، ۱۰۰۴/۵ هکتوپاسکال) و بیشترین میانگین فشار مربوط به فاز ۵ (۲۲ مرکز چرخندزایی) می‌باشد. همچنین کمینه فشار با مرکز ۹۸۱/۴ هکتوپاسکال مربوط به فاز ۲ می‌باشد (جدول ۲).

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

نام فاز	تعداد مراکز فشار چرخندزایی هر فاز	کمینه فشار هر فاز به هکتوپاسکال	میانگین فشار هر فاز به هکتوپاسکال	نسبت هر فاز به مجموع آن‌ها به درصد	میانگین فشار کل به هکتوپاسکال
فاز ۱	۱۲	۹۹۶/۴	۱۰۰۵/۱	۵/۹۷	۱۰۰۴/۵
فاز ۲	۱۸	۹۸۱/۴	۱۰۰۳/۱	۸/۹۵	
فاز ۳	۳۷	۹۹۹/۸	۱۰۰۵/۷	۱۸/۴۰	
فاز ۴	۱۷	۹۹۰/۱	۱۰۰۴/۵	۸/۴۵	
فاز ۵	۲۲	۹۹۹/۶	۱۰۰۶/۹	۱۰/۹۴	
فاز ۶	۲۹	۹۹۴/۴	۱۰۰۴/۲	۱۴/۴۲	
فاز ۷	۳۹	۹۹۴/۶	۱۰۰۴/۴	۱۹/۴۰	
فاز ۸	۲۷	۹۹۳/۱	۱۰۰۴/۲	۱۳/۴۳	

عمق فشار مراکز چرخندزایی فازهای مختلف MJO در فصل سرد

مراکز چرخندزایی با فشار زیر ۱۰۰۰ هکتوپاسکال و ماه وقوع آن‌ها، در فازهای مختلف فصل سرد استخراج و همچنین موقعیت مکانی این مراکز مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین تکرار کمینه‌های فشار در فازهای ۶ و ۷ (۸ مورد فشار زیر ۱۰۰۰ هکتوپاسکال) قابل مشاهده است و کمترین آن مربوط به فازهای ۱، ۳، ۵ (۱ مورد فشار زیر ۱۰۰۰ هکتوپاسکال) می‌باشد. تمامی کمینه‌های فشار مشاهده شده در حوزه مدیترانه و غرب ایران گسترده شده‌اند که از سی مورد کمینه فشار ثبت شده، ۲۴ مورد در روی حوزه مدیترانه و ۶ مورد در منطقه غرب ایران می‌باشد. مرکز چرخندزایی با کمترین فشار ثبت شده مربوط به فاز ۲ با فشار ۹۸۱/۴ هکتوپاسکال می‌باشد که در غرب ایران (کشور ترکیه) شکل گرفته است. در بررسی ماه وقوع کمینه فشار این فصل، از سی مورد، ۱۳ مورد مربوط به ماه فوریه، ۱۲ مورد ماه ژانویه و ۵ مورد ماه دسامبر می‌باشند (جدول ۳). بر اساس مطالعه عمار و همکاران (۲۰۱۴)، نیز کمترین کمینه‌های فشار بر روی حوزه مدیترانه (غرب مدیترانه و رشته‌کوه‌های اطلس) قرار دارند.

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

نام فاز	تعداد مراکز کمینه فشار چرخند	مقدار فشار چرخند	موقعیت مراکز چرخندزا	ماه وقوع
فاز ۱	۱	۹۹۶/۴	حوزه مدیترانه	ژانویه
فاز ۲	۳	۹۹۸/۴	غرب ایران	دسامبر
		۹۸۱/۴	غرب ایران	ژانویه
		۹۹۲	حوزه مدیترانه	ژانویه
فاز ۳	۱	۹۹۹/۸	حوزه مدیترانه	دسامبر
فاز ۴	۳	۹۹۹/۶	حوزه مدیترانه	فوریه
		۹۹۰	حوزه مدیترانه	ژانویه
		۹۹۷/۱	حوزه مدیترانه	ژانویه
فاز ۵	۱	۹۹۹/۶	حوزه مدیترانه	ژانویه
فاز ۶	۸	۹۹۹/۶	حوزه مدیترانه	دسامبر
		۹۹۴/۷	حوزه مدیترانه	فوریه
		۹۹۹/۳	غرب ایران	فوریه
		۹۹۶/۶	حوزه مدیترانه	فوریه
		۹۹۹/۷	حوزه مدیترانه	دسامبر
		۹۹۸/۶	غرب ایران	فوریه
		۹۹۹/۹	حوزه مدیترانه	فوریه
		۹۹۴/۴	حوزه مدیترانه	ژانویه
		۹۹۵/۵	حوزه مدیترانه	فوریه
		۹۹۸	حوزه مدیترانه	ژانویه
فاز ۷	۸	۹۹۸/۹	حوزه مدیترانه	ژانویه
		۹۹۷/۳	حوزه مدیترانه	فوریه
		۹۹۵	حوزه مدیترانه	ژانویه
		۹۹۴/۶	حوزه مدیترانه	ژانویه
		۹۹۴/۹	حوزه مدیترانه	ژانویه
		۹۹۵/۱	حوزه مدیترانه	فوریه
		۹۹۸/۷	غرب ایران	فوریه
		۹۹۴/۸	حوزه مدیترانه	فوریه
		۹۹۳/۱	حوزه مدیترانه	فوریه
		۹۹۹/۴	حوزه مدیترانه	دسامبر
فاز ۸	۵	۹۹۹/۴	غرب ایران	فوریه

مسیریابی چرخندهای منطقه در فازهای هشت گانه

شکل‌های ۴ و ۵، مسیرهای چرخندهای منطقه مورد مطالعه در روزهای منتخب فصل سرد در فازهای هشت گانه MJO در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰، از زمان تشکیل تا انحلال را نشان می‌دهند (تراکم مسیرها). مطابق با دو نوار چرخندزایی که در بخش قبلی به آن اشاره شد، در اینجا نیز دو مسیر عمده برای حرکت چرخندها مشاهده می‌شود. یک مسیر در غرب دریای سرخ و نواحی حاره‌ای قاره آفریقا قابل رؤیت است که در همه فازهای MJO دیده می‌شود بیشتر آن‌ها یک مسیر بسته را نشان می‌دهند. این نکته با توجه به ماهیت چرخندها در این مناطق که همرفتی بوده و دینامیکی نمی‌باشند دور از ذهن نیست و به همین دلیل در همه فازها به صورت ساکن وجود دارند و تحت تأثیر فازهای MJO قرار ندارند.

اما در نواری که از غرب مدیترانه آغاز می‌شود و به سوی شرق امتداد می‌یابد وضعیت با توجه به ساختار دینامیکی چرخندهای این مناطق به کلی متفاوت است. فاز یک کمترین تراکم مسیر حرکتی سامانه‌های چرخندی را نشان می‌دهد که بیانگر فعالیت کم چرخندزایی در حوزه مدیترانه در این فاز است. چند مورد از مسیرهایی که در این فاز در حوزه مدیترانه حضور دارند، از مناطق دیگر از جمله شمال آفریقا و غرب ایران شروع شده و در این منطقه امتداد پیدا کرده‌اند (در روی دریای مدیترانه و دریای سیاه). در فاز دو مسیرهای چرخندی با تراکم بیشتر از غرب تا شرق منطقه مدیترانه (کشور ایتالیا، دریای مدیترانه و دریای سیاه) گسترده شده‌اند و به سمت منطقه غرب ایران (جنوب کشور ترکیه، شمال عراق و سوریه) امتداد دارند. بیشتر این مراکز چرخندی پس از تشکیل در غرب دریای مدیترانه بر روی همین دریا نیز از بین رفته‌اند. دو موردی که مسیر آن‌ها تا غرب ایران امتداد پیدا کرده است در شرق دریای مدیترانه (از ناحیه چرخندزای دریای اژه و قبرس) نشأت گرفته‌اند. همچنین مسیری در منطقه جنوب خلیج فارس به چشم می‌خورد. این فاز از تراکم مسیرهای چرخندی و همچنین طول خطوط بیشتری نسبت به فاز قبلی برخوردار است. در فاز سه، تراکم مسیرهای چرخندی در منطقه مدیترانه زیاد به نظر می‌رسد که تا سواحل جنوبی آن و نوار شمالی قاره آفریقا گسترش یافته است. این مسیرها از غرب این دریا آغاز شده و در مرکز و شرق مدیترانه از بین رفته‌اند. با این حال تنها یک مورد چرخندزایی در شرق مدیترانه دیده می‌شود که تا غرب ایران ادامه داشته است. در جنوب خلیج فارس نیز یک مورد چرخند دیده شود که حرکت قابل‌ذکری نداشته است.

در فاز چهار، مسیرهای چرخندی را در تمام قسمت‌های منطقه مدیترانه به صورت مستقیم می‌توان مشاهده کرد که نقاط شروع به عبارتی مناطق ایجاد متفاوتی دارند. بعضی از این مسیرها از قسمت‌های شمال مدیترانه (بوسنی هرزگوین) شروع شده و روی دریای مدیترانه از بین رفته و بعضی با عبور از دریای سیاه قوی شده و به سمت منطقه غرب ایران حرکت کرده و در آنجا از بین رفته است. نقاط شروع دیگر این مسیرها، از غرب دریای مدیترانه، مناطق ساحلی شمال آفریقا و شرق دریای مدیترانه و خود دریای مدیترانه می‌باشد که بر روی دریای مدیترانه از بین رفته‌اند. تنها موردی که در این فاز به سمت منطقه غرب ایران کشیده شده است در شرق دریای مدیترانه شکل گرفته و به سوی شرق حرکت کرده است. در این فاز تراکم مسیرها بر روی دریای مدیترانه نسبت به فاز قبل کاهش چشمگیری یافته است. این کاهش به‌ویژه در قسمت غربی دریای مدیترانه آشکار است که نشان می‌دهد در فاز چهار پدیده MJO شرایط برای شکل‌گیری و حرکت چرخندها در غرب دریای مدیترانه مناسب نیست.

در فاز ۵ مسیر حرکت چرخندها به سوی جنوب دریای مدیترانه متمایل شده است. در این فاز مشابه با فاز قبلی، تراکم مسیرهای چرخندی به‌ویژه در غرب دریای مدیترانه کم بوده و بیشتر آن‌ها بر روی منطقه مدیترانه قابل مشاهده است و چند مورد هم در مناطق غرب دریای سرخ و ایران به چشم می‌خورد. بیشتر این مسیرها از نواحی ساحلی شمالی سرچشمه می‌گیرند. در فاز شش تراکم مسیرهای چرخندی در روی منطقه مدیترانه سهم حداکثری را دارد. منشأ بعضی از آن‌ها مناطق غربی مدیترانه بوده و در مرکز مدیترانه از بین رفته‌اند. برخی دیگر از مرکز دریای مدیترانه و دریای سیاه شروع شده و به سمت شمال شرق حرکت می‌کنند و در حوالی دریای سیاه از بین می‌روند.

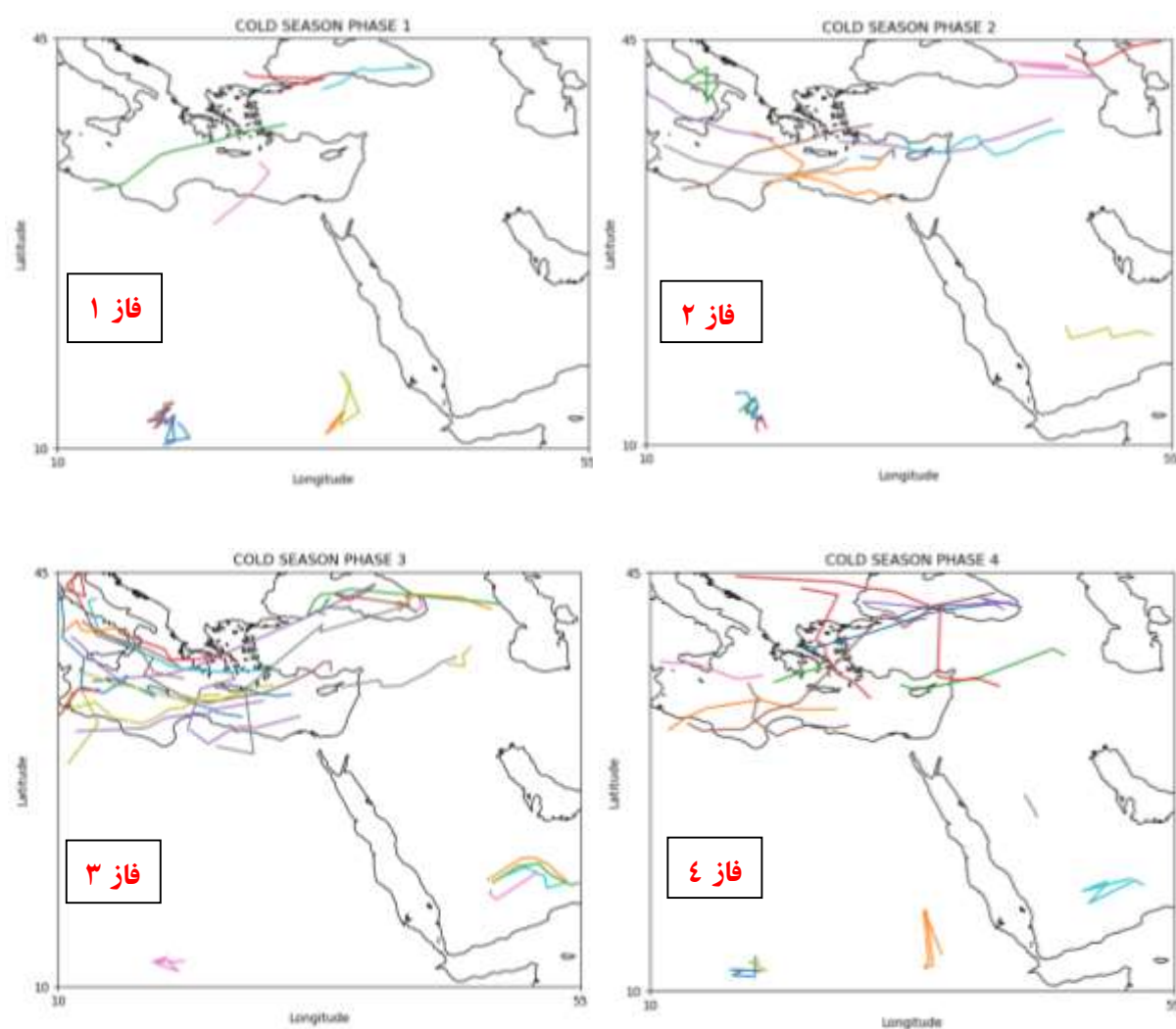
در فاز ۷ تراکم مسیرهای چرخندی مشاهده شده نسبتاً بیشتر شده و موضوع قابل توجه افزایش مسیرهایی است که از شمال آفریقا (کشورهای لیبی و مصر) نشأت می‌گیرند و به سمت دریای مدیترانه حرکت کرده و در آنجا ناپدید می‌شوند. مسیرهایی نیز از سمت غرب مدیترانه به سوی شرق دیده می‌شوند که در مرکز دریای مدیترانه ناپدید می‌شوند. در این فاز در شرق مدیترانه

برخلاف فازهای پیشین چندان مسیری برای شکل‌گیری و حرکت چرخندها مشاهده نمی‌شود و بیشتر فعالیت در غرب دریای مدیترانه مشاهده می‌شود. همچنین مسیرهایی به‌صورت منحنی‌های بسته در مناطق غرب دریای سرخ و نواحی استوایی آفریقا به چشم می‌خورند و چند مسیر نیز در جنوب خلیج فارس قابل رؤیت است که قبلاً به‌صورت کلی تفسیر شدند.

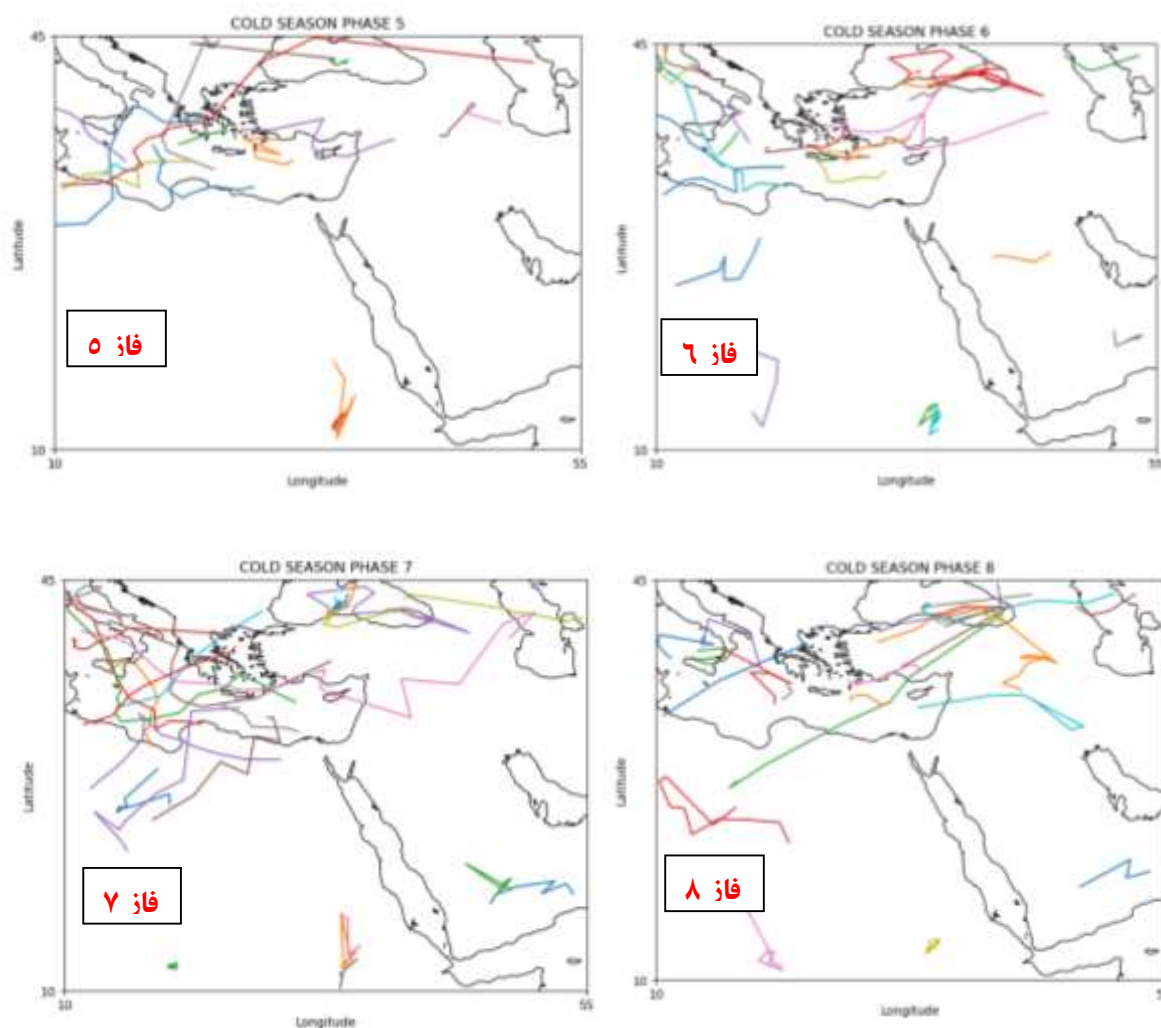
در فاز هشت تراکم مسیرها افزایش یافته است. مسیرها در این فاز نیز بر روی دریای مدیترانه تراکم حداکثری خود را دارند. چند مورد از مسیرهایی که بر روی دریای مدیترانه قابل مشاهده است از نواحی ساحلی آفریقای شمالی و همچنین نواحی غربی منطقه مدیترانه منشأ می‌گیرند. مسیرهای با منشأ دریای مدیترانه و کشور ترکیه به سمت غرب ایران و دریای سیاه کشیده شده‌اند و در مواردی با کسب رطوبت دریای سیاه به سمت غرب ایران حرکت کرده‌اند. تعداد چرخندی که در فاز هشت از مدیترانه به‌سوی ایران حرکت کرده‌اند به‌مراتب بیشتر است که نتیجه درخور توجهی می‌باشد. این نتایج با بخشی از نتایج بیات، سلیقه و اکبری (۱۳۹۶) که نشان دادند عمده چرخندهای باران‌زای ایران در فصل سرد بر روی دریای مدیترانه و سپس منطقه دریای سرخ، سودان و کشور عراق تشکیل می‌شوند، مطابقت دارد. خوش‌اخلاق، نبوی و عباسی (۱۳۹۰) الگوی غالب جو را در دوره سرد سال، ناوه ژرف مدیترانه که محور فرود آن بر شرق دریای مدیترانه و بر روی دریای سرخ، قرار گرفته، معرفی می‌کنند. همچنین آیر و مولیناری^۱ (۲۰۰۸) دریافتند که تغییر فازهای MJO می‌تواند در رشد و بلوغ چرخندها نقش مهمی را ایفا کند و هریک از فازهای این دورپیوند می‌توانند بر روی آب‌های گرم در دوره سرد سال چرخندهایی با ویژگی‌های متفاوت را به وجود آورند. نتیجه مهم اینکه هریک از فازهای MJO در نوع و منطقه تشکیل چرخندها تأثیرگذار هستند.

در بررسی نتایج مربوط به مسیریابی چرخندها لازم به ذکر است که اگرچه عملکرد الگوریتم مسیریابی چرخند به کار گرفته شده در مطالعه حاضر بر روی دریای مدیترانه قابل قبول است ولی به نظر می‌رسد این الگوریتم در زمانی که چرخندها به کشور ایران و توپوگرافی پیچیده آن در مرز غربی می‌رسند، دچار خطا می‌شوند. شرط اساسی در مسیریابی درست چرخند توسط این نرم‌افزار پیوستگی حرکت و برقراری شروط چرخند با زمان است و احتمالاً با رسیدن چرخند به توپوگرافی پیچیده زاگرس دچار لغزش در شرایط می‌شود که الگوریتم مسیریابی قادر به شناسایی ادامه حرکت آن نمی‌باشد. از این رو لازم است برای کاربرد این الگوریتم برای مناطق با توپوگرافی پیچیده تمهیدات و شرایط اضافه‌ای برای الگوریتم تعیین شود.

در همه فازهای منتخب MJO، در غرب دریای سرخ سامانه‌های چرخندی مشاهده می‌شود که در یک مسیر بسته حرکت کرده و یا در مواردی در محل خود ساکن هستند. این کم‌فشارها که در برخی مطالعات از آن‌ها به نام کم‌فشارهای سودانی نام برده می‌شود در شرایط خاصی که عمدتاً در ماه‌های گرم سال رخ می‌دهد، با ناوه مدیترانه ترکیب شده و به‌صورت یک سامانه دینامیکی فعال درمی‌آیند. در این مطالعه آثار وجودی این کم‌فشارها توسط الگوریتم مسیریابی دانشگاه ملبورن تشخیص داده شده است ولی چون تمرکز این مطالعه بر ماه‌های سرد سال بوده است و از روزهای منتخب بر اساس شرایط خاص MJO انتخاب شده‌اند موردی که در آن تقویت کم‌فشار سودان رخ بدهد، مشاهده نشده است.



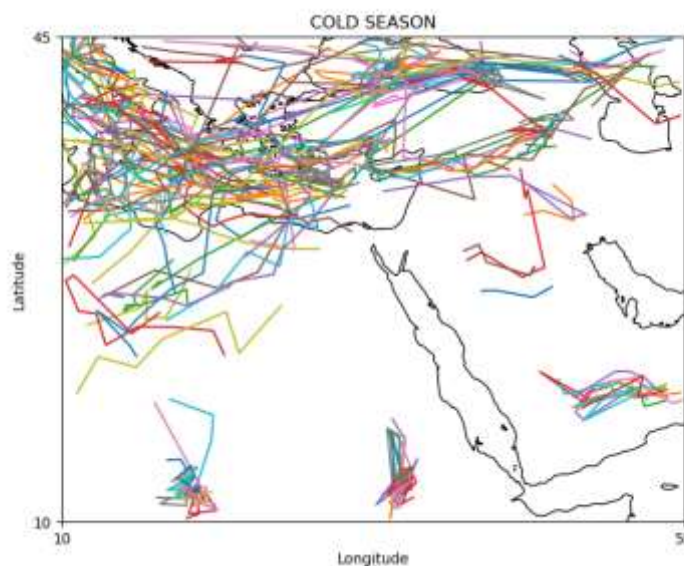
شکل ۴. مسیرابی چرخندهای منطقه مورد مطالعه در روزهای منتخب فصل سرد در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰ (فازهای ۱ تا ۴).



شکل ۵. مسیریابی چرخندهای منطقه مورد مطالعه در روزهای منتخب فصل سرد در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰ (فازهای ۵ تا ۸).

مجموع مسیرهای چرخندی

با توجه به شکل ۶ که یک نمای کلی از مسیرهای چرخندها در فصل سرد را به نمایش گذاشته است، نشان‌دهنده این است که مسیرهای چرخندی در روی حوزه مدیترانه و غرب ایران، بالأخص بر روی منابع آبی، تراکم بیشتری دارند و همچنین سواحل منطقه آفریقای شمالی تراکم مسیرهای چرخندی نسبتاً بالایی دارند که اکثراً به سمت دریای مدیترانه کشیده شده و از آنجا یا به سمت دریای سیاه و یا به سمت منطقه غرب ایران (ترکیه و عراق) حرکت کرده و از بین رفته‌اند که کوروتزاولو و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه خود بیان داشتند که چرخندهای شمال آفریقا تمایل دارند به سمت شرق مدیترانه حرکت کنند و پس از خروج از مدیترانه، یا به سمت شمال شرق (دریای سیاه و اروپای شرقی) یا به سمت شرق (سمت ترکیه و خاورمیانه) با سرعت زیاد حرکت کرده و در آنجا از بین می‌روند. مسیرهایی نیز با تراکم کمتر در مناطق غرب دریای سرخ، نواحی استوایی آفریقا و جنوب خلیج فارس قابل مشاهده هستند.



شکل ۶. مسیریابی چرخندهای منطقه مورد مطالعه در مجموع روزهای منتخب فصل سرد در طول دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۲۰.

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی‌های حاصل از نقش واداشتهای نوسان مادر-جولیان در دوره سرد سال بر روی حرکت چرخندهای منطقه مدیترانه نتایج زیر را نشان داد. چرخندزایی در فازهای هشتگانه مادر-جولیان نشان داد که تغییرات هسته‌های چرخندزایی در محدوده منطقه مدیترانه متنوع است. به‌طوری‌که در فصل سرد سال مقادیر کمینه فشار در چرخندهای تشکیل شده بین ۹۹۳ تا ۱۰۱۰ هکتوپاسکال متغیر است. در این بین در فاز ۸ قوی‌ترین چرخندها بر روی حوزه مدیترانه تشکیل شده و پس از آن در فاز ۶ و ۷ به ترتیب این وضعیت برقرار است که هسته‌های چرخندزایی با مقادیر ۹۹۴ هکتوپاسکال به وجود آمده‌اند. از نظر تنوع رخداد چرخندها به ترتیب فازهای ۸، ۱ و ۲ دارای بیشترین تنوع نسبت به سایر فازهای مادر-جولیان می‌باشند. در دوره سرد سال مناطق چرخندزایی در سرتاسر حوزه مدیترانه، غرب ایران، جنوب خلیج فارس، غرب دریای سرخ، شمال آفریقا و نواحی استوایی آفریقا قابل مشاهده است.

از نظر فراوانی هسته‌های چرخندی و وقوع چرخندزایی در منطقه فاز ۷ با ۳۹ مرکز چرخندزایی (۱۹/۴۰ درصد میانگین طولانی‌مدت این فصل) و فاز ۱ با ۱۲ مرکز (۵/۹۷ درصد میانگین طولانی‌مدت این فصل) به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مرکز چرخندزایی می‌باشند. در این بین فاز ۲ کمترین مقدار فشار مرکزی را در هسته‌های چرخندی به خود اختصاص داده و بیشترین میانگین فشار نیز در چرخندهای تولید شده در منطقه، مربوط به فاز ۵ است. می‌توان نتیجه گرفت که در دوره سرد سال چرخندهای تشکیل شده در فاز ۲ مادر-جولیان از قدرت بالاتری در محدوده مورد مطالعه برخوردارند.

نتایج حاصل از بررسی عمق فشار مراکز چرخندی در منطقه نشان داد که دو فاز ۶ و ۷ دارای بیشترین تکرار کمینه‌های فشار است و کمترین آن مربوط به فازهای ۱، ۳، ۵ می‌باشد. اکثر هسته‌های کم‌فشار بر روی حوزه مدیترانه تشکیل شده و برخی از آن‌ها نیز در مناطق غربی ایران تشکیل شده‌اند. قوی‌ترین چرخندزایی در فاز ۲ بوده که مقدار آن به کمتر از ۹۸۲ هکتوپاسکال می‌رسد که محدوده فعالیت آن بین ترکیه و مناطق غربی ایران می‌باشد. بر این اساس به ترتیب ماه‌های فوریه، ژانویه و دسامبر دارای قوی‌ترین چرخندها نسبت به سایر ماه‌های سرد سال می‌باشد.

مسیریابی چرخندهای تشکیل شده بر روی منطقه مدیترانه حاکی از آن بود که عمده مسیرهای ختم شده به مناطق غربی ایران در دو فاز ۲ و ۸ بوده و در سایر فازها مسیری شمال غربی به خود گرفته و به مناطق شمال غرب ایران منتهی می‌شود که

این وضعیت در فازهای ۳، ۴، ۶ و ۷ برقرار است. در دوره سرد سال مسیرهای چرخندی در روی حوزه مدیترانه و غرب ایران، تراکم بیشتری دارند مسیرهایی نیز با تراکم کمتر در مناطق غرب دریای سرخ، نواحی استوایی آفریقا و جنوب خلیج فارس قابل مشاهده هستند.

منابع

- ابطحی، وحیده؛ جهانبخش، سعید؛ رستم‌زاده، هاشم؛ لشکری، حسن (۱۴۰۲). الگوهای همدیدی رودخانه‌های جوی منجر در بارش‌های سنگین غرب و شمال غرب ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، doi: 10.22034/gp.2024.57342.3165.
- بیات، علی؛ سلیقه، محمد؛ اکبری، مهری (۱۳۹۶). اقلیم‌شناسی سیکلون‌های باران‌زای زمستانه ایران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۴(۲): ۱-۱۸.
- جهانبخش، سعید؛ اشرفی، سعیده؛ عساکره، حسین (۱۴۰۰). بررسی تغییرات دهه‌ای سامانه‌های باران‌زای مؤثر بر حوضه آبریز رود زرد. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵(۷۵): ۱۰۱-۱۱۲.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ نبوی، سید امید؛ عباسی، اسماعیل (۱۳۹۱). تحلیل سامانه‌های همدید بارش‌های شدید دوره سرد سال در استان‌های خراسان رضوی و شمالی. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۶(۴۰): ۹۷-۱۱۸.
- رزقی جهرمی، زهرا. (۱۳۹۵). تأثیرات پدیده مادر جولیان (MJO) بر رواناب رودخانه‌های بزرگ استان فارس با استفاده از روش‌های داده‌کاوی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب.
- رزقی جهرمی، زهرا؛ نصر اصفهانی، محمدعلی؛ محمدی، جهانگرد، قاسمی، احمدرضا (۱۳۹۸). بررسی میزان تأثیر فازهای پدیده نوسان مادر جولیان بر بارش و رواناب سه رودخانه مهم استان فارس. *پژوهش آب/ایران*، ۱۳(۱): ۷۹-۹۰.
- زارعی، سمیه؛ یزدان پناه، حجت اله (۱۳۹۱). شناسایی و بررسی توزیع مکانی و زمانی چرخندهای برون حاره. *فضای جغرافیایی*، ۱۲ (۳۸): ۷۷-۹۸.
- سیدنژاد گل خطمی، نفیسه؛ بذرافشان، جواد؛ نازی قمشلو، آرزو؛ ایران‌نژاد، پرویز (۱۳۹۸). تحلیل مکانی احتمال رخداد بارش در ایران در فازهای مختلف سیگنال اقلیمی مادر-جولیان. *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۲(۳): ۱۹۲-۲۰۱.
- طهماسبی پاشا، امیر؛ میرزایی، محمد؛ محب‌الحجه، علیرضا. (۱۴۰۰). بررسی ارتباط شاخص‌های همرفتی و دورپیوندی در منطقه غرب آسیا. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۵(۳): ۲۶-۱.
- محمدرپور، کورش؛ حجازی زاده، زهرا؛ سلیقه، محمد؛ قائمی، هوشنگ (۱۴۰۲). واکاوی بی‌هنجاری بارش‌های ایران تحت تأثیر نوسان مادر-جولیان طی دوره (۱۹۸۰-۲۰۲۰). *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۴۰۲(۵۵): ۱-۱۴.
- محمدی، رستگار؛ سلیقه، محمد؛ ناصرزاده، محمدحسین؛ اکبری، مهری (۱۳۹۹). واکاوی همدیدی-دینامیکی رخ داد چرخندی بر روی بارش‌های سنگین دوره سرد غرب ایران. *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۳(۳): ۲۲۴-۲۴۱.
- مهرآور، صدیقه؛ قائد امینی، حبیب‌اله؛ ناظم‌السادات، سیدمحمدجعفر. (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.
- ناظم‌السادات، سید محمدجعفر؛ مهرآور، صدیقه؛ قائد امینی، حبیب اله (۱۳۹۲). ارزیابی برهمکنش هم‌زمان پدیده‌های ENSO و MJO بر رخداد دوران‌های تر و خشک در ایران. *تحقیقات منابع آب/ایران*، ۹(۱): ۴۸-۶۰.
- ناظم‌السادات، سیدمحمدجعفر؛ قائد امینی اسدآبادی، حبیب اله (۱۳۸۷). بررسی تأثیر نوسانات مادر جولیان بر وقوع کرانه بالایی و پایینی بارش (سیلاب و خشکی) ماه‌های بهمن تا فروردین در استان فارس. *نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۱۲ (۴۶): ۴۷۷-۴۸۹.
- ناظم‌السادات، سیدمحمدجعفر؛ شاهقلیان، کوکب (۱۳۹۳). چگونگی پدیداری سامانه‌های بارش‌زای سنگین در جنوب غربی ایران و پیوند آن با پدیده MJO. *آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۸(۵): ۱۰۷۲-۱۰۸۳.
- وطن‌پرست قلعه‌جوق، فاطمه؛ صلاحی، برومند؛ زینالی، بتول (۱۴۰۴). بررسی نقش نوسان مادر-جولیان (MJO) بر فراوانی رخداد توفان‌های گرد و غبار در ایستگاه‌های منتخب استان خوزستان و ردیابی مسیرهای ورود گرد و غبار به آن. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۵ (۷۷).

- Aiyyer, A., & Molinari, J. (2008). MJO and tropical cyclogenesis in the Gulf of Mexico and eastern Pacific: Case study and idealized numerical modeling. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(8), 2691-2704.
- Ammar, K., El-Metwally, M., Almazroui, M., & Abdel Wahab, M. M. (2014). A climatological analysis of Saharan cyclones. *Climate dynamics*, 43, 483-501.
- 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.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., & Pattantyús-Ábrahám, M. (2009). Analyzing the genesis, intensity, and tracks of western Mediterranean cyclones. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, 133-144.
- Berrington, A. H., Sakaeda, N., Dias, J., & Kiladis, G. N. (2022). Relationships between the Eastward Propagation of the Madden-Julian Oscillation and Its Circulation Structure. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(16), e2021JD035806.
- 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.
- Ferranti, L., Palmer, T. N., Molteni, F., & Klinker, E. (1990). Tropical-extratropical interaction associated with the 30–60 day oscillation and its impact on medium and extended range prediction. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(18), 2177-2199.
- Haertel, P. (2022). Kelvin and Rossby Wave Contributions to the Mechanisms of the Madden-Julian Oscillation. *Geosciences*, 12(9), 314. Haertel, Patrick. Kelvin and Rossby Wave Contributions to the Mechanisms of the Madden-Julian Oscillation. *Geosciences* 12, no. 9 (2022): 314.
- 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.
- 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*.
- Liang, S., Wang, D., Ziegler, A. D., Li, L. Z., & Zeng, Z. (2022). Madden-Julian Oscillation-induced extreme rainfalls constrained by global warming mitigation. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1), 67.
- 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.
- Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., & Boscolo, R. (Eds.). (2006). *Mediterranean climate variability*. Elsevier.
- 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.
- 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. (1994). Observations of the 40–50-day tropical oscillation—A review. *Monthly Weather Review*, 122(5), 814-837.

- 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.
- Mohammadi, R., Saligheh, M., Naserzadeh, M. H., & Akbari, M. (2020). Synoptic and dynamical analysis of the cyclonic occurrence of heavy rains during the cold period of western Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 3(3), 224-241.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Romem, M., Ziv, B., & Saaroni, H. (2007). Scenarios in the development of Mediterranean cyclones. *Advances in Geosciences*, 12, 59-65.
- Sena, A. C., Peings, Y., & Magnusdottir, G. (2022). Effect of the Quasi-Biennial Oscillation on the Madden Julian Oscillation Teleconnections in the Southern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 49(6), e2021GL096105.
- Simmonds, I., Murray, R.J., & Leighton, R. (1999). A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. *Australian Meteorological Magazine*.
- Suematsu, T., & Miura, H. (2022). Changes in the eastward movement speed of the Madden-Julian oscillation with fluctuation in the Walker circulation. *Journal of Climate*, 35(1), 211-225.
- Tsuboi, A., & Takemi, T. (2014). The interannual relationship between MJO activity and tropical cyclone genesis in the Indian Ocean. *Geosci Lett* 1: 9. Doi: 10.1186.
- Vitart, F., & Balmaseda, M. A. (2024). Sources of MJO teleconnection errors in the ECMWF extended-range forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(761), 2028-2044.
- 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.
- Zhang, C. (2005). Madden-Julian oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(2).
- Zhang, C. (2013). Madden-Julian oscillation: Bridging weather and climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(12): 1849-1870.