# Revealing The Synoptic Patterns of The Tropical Cyclone's Track in The Northwestern Indian Ocean Basin

**Gholam abbas Ahmadian Rad[1]*, Mohammad Baaghideh [2], Gholam abbas Fallah Ghalhari [3], Alireza Entezari[2], Abdolreza Kashki[2]**

1-PhD Student of Climatology, Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Razavi Khorasan, Iran.
2- Associate Professor, Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Razavi Khorasan, Iran.
3- Professor, Department of Geography and Tourism, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Kashan University, Kashan, Isfahan, Iran.

***Corresponding Author:** A.Ahmadianrad@gmail.com

نسخه پیش از انتشار

## Extended Abstract

### Introduction

Tropical cyclones are formidable atmospheric natural hazards with profound destructive capabilities, responsible for a significant portion of the damage and fatalities associated with natural disasters. Their impacts, including extreme winds, storm surges, and extensive flooding, pose a substantial threat to both human lives and economic stability. Globally, these events inflict considerable losses, with recent decades showing a high frequency of devastating cyclones. The growing vulnerability of coastal areas due to increased development and population density further amplifies the socio-economic repercussions, emphasizing the critical need for effective early warning systems. The Arabian Sea and its surrounding regions have experienced damaging tropical cyclones, such as Gonu and Fane, which have resulted in significant casualties and economic losses in countries like Oman and Iran. Given the strategic economic importance of the northwestern Indian Ocean basin, understanding and predicting the movement of these cyclones is paramount for effective disaster risk reduction, including safeguarding vital infrastructure and preventing environmental contamination. Despite the significance of this region, there remains a scarcity of research on the behavior of tropical cyclones within it. This study aims to bridge this knowledge gap by identifying synoptic patterns that influence the tracks of tropical cyclones in the northwestern Indian Ocean, thereby contributing to improved regional forecasting and disaster preparedness.

### Materials and Methods

1. Data Source and Extraction: Tropical cyclone data (dates, tracks, intensity) were obtained from the India Meteorological Department. Geopotential height data at 700 hPa (ERA5 reanalysis) were downloaded from ECMWF.
2. Study Area & Approach: The study focused on the northwestern Indian Ocean (0-27°N, 53-75°E) using a descriptive-analytical approach to identify synoptic patterns for track prediction.
3. Methodology (S-mode Factor Analysis): S-mode Factor Analysis was applied to 700 hPa geopotential height data for 169 active cyclone days, transforming daily data from multiple grid points into a database for pattern identification.
4. Pattern Identification & Visualization: MATLAB was used to identify 10 dominant synoptic patterns. These patterns were then visualized using R1 programming language (RStudio). The study analyzed cyclones from 1982 to 2022.

---

1- Team, R.C. (2025).

## Results and Discussion

This study identified ten dominant synoptic patterns that steer tropical cyclones in the northwestern Indian Ocean. The mid-level high over the Arabian Peninsula is the key player, with its position and strength dictating cyclone paths.

Key findings reveal how the interaction between the mid-level high over the Arabian Peninsula and other features, such as mid-latitude troughs (especially from the Mediterranean) and regional thermal lows (Pakistan/India), creates diverse tracks. These interactions result in:

Blocked: The mid-level high over the Arabian Peninsula often prevents westward/northwestward movement, forcing recurvature.

Steering: Thermal lows can draw cyclones northward/northeastward.

Recurvature: Mediterranean troughs can weaken the mid-level high over the Arabian Peninsula, enabling shifts to northward, northeastward, or even eastward tracks.

Complex Paths: The beta effect and evolving synoptic configurations lead to intricate, looping, or parabolic trajectories.

The ten patterns broadly categorize cyclones into westward/southwestward, northwestward, northward, northeastward, recurving, and complex-moving types, providing a crucial climatological framework for understanding and predicting these hazardous storms.

## Conclusion

Tropical cyclones in the northwestern Indian Ocean are significant atmospheric hazards impacting southern Iran, Oman, the UAE, Yemen, Pakistan, and western India, causing severe damage. Understanding their movement is crucial for disaster mitigation and sustainable development.

This study identified ten dominant synoptic patterns of 700 hPa geopotential height that govern cyclone tracks in the region. Six of these patterns were found to be most frequent, with peak cyclone activity observed in June, followed by May and November, consistent with regional climatology.

Dynamically, cyclone tracks are primarily determined by the interplay of:

1. The mid-level high over the Arabian Peninsula dictates the general direction.
2. Mid-latitude troughs and thermal lows over Pakistan/India, influencing steering.
3. The beta effect, contributing to track complexity.

Based on these analyses, tropical cyclone tracks in the northwestern Indian Ocean can be broadly categorized into six main types:

1.Westward/Southwestward: Towards Yemen, Oman, southern Arabia, and northern Somalia.
2. Northwestward: Towards Oman, Iran, and the UAE.
3. Northward: Towards Pakistan and Gujarat, India.
4. Northeastward: Towards India and eastern Pakistan.
5.Recurving/Turning: Exhibiting significant changes in direction.
6.Unusual/Looping: Characterized by complex, non-linear trajectories.

**Keywords:** Pattern Track, Cyclone, Arabian Sea, Geopotential height

# آشکارسازی الگوهای همدیدی مسیر چرخندهای حاره‌ای حوضه شمال غربی اقیانوس هند

غلامعباس احمدیان راد[1*]، محمد باعقیده[2]، غلامعباس فلاح قالهری[3]، علیرضا انتظاری[2]، عبدالرضا کاشکی[2]

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، خراسان رضوی، ایران.
۲- دانشیار گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، خراسان رضوی، ایران.
۳- استاد گروه جغرافیا و گردشگری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول: A.Ahmadianrad@gmail.com

## چکیده

**توفان‌ها به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی با منشأ جوی، اهمیت ویژه‌ای دارند. چرخندهای حاره‌ای مسئول نیمی از خسارات ناشی از این توفان‌ها هستند. هدف این پژوهش شناسایی الگوهای همدیدی مسیر چرخندهای حاره‌ای حوضه شمال غربی اقیانوس هند با روش توصیفی ـ تحلیلی است. ابتدا مشخصات چرخندهای حاره‌ای حوضه شامل: تاریخ، طبقه، موقعیت چرخندها، از تارنمای دپارتمان هواشناسی هند [1] (IMD) برای محدود ۰ تا ۲۷ درجه عرض و ۵۳ تا ۷۵ درجه طول جغرافیایی استخراج گردید. در مرحله بعدی، داده‌های رقومی ژئو پتانسیل سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال ERA5 با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از تارنمای مرکز داده‌های اروپا [2] (CMWF)) برای یک دوره زمانی ۴۱ ساله از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۲ اخذ شد. ۱۶۹ روز چرخندی انتخاب گردید. روش تحلیل عاملی با آرایش S مورد استفاده قرار گرفت. هر روز چرخندی به ماتریسی ۸۹×۱۰۹ با مجموع ۹۷۰۱ سلول مکانی تبدیل شد. این مقدار سلول برای ۱۶۹ روز به دست آمد. تمامی مراحل کار با داده‌ها تا شناسایی الگوها با متلب (MATLAB) انجام شد. ۱۰ الگوی ژئوپتانسیل سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال به دست آمد. این الگوها، در واقع بیان کننده، الگوهای غالب مسیر چرخندهای حاره‌ای هستند. در گام آخر نقشه‌های این ۱۰ الگو با استفاده از زبان برنامه نویسی R ترسیم شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، اصلی‌ترین عامل در تعیین مسیر چرخندهای منطقه مورد مطالعه، پر ارتفاع شبه جزیره عربستان است. عوامل موثر بعدی عبارتند از: کم‌ارتفاع‌ها و سرد چاله‌ها و فرودهای عرض‌های میانه وارده به منطقه (شرق دریای مدیترانه و دریای سرخ و پاکستان و شمال غرب هند) و کم‌فشارهای حرارتی پاکستان و شمال و شمال غرب هند و پر ارتفاع غرب هند و حرکت تراف (فرود) مانسون به عرض‌های بالای است.**

**واژگان کلیدی:** الگوی مسیر، چرخند، دریای عرب، ارتفاع ژئوپتانسیل

## مقدمه

توفان‌ها به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی با منشأ جوی اهمیت ویژه‌ای دارند چرخندهای حاره‌ای بخشی از این توفان‌ها هستند. چرخندهای حاره‌ای مسئول نیمی از خسارات ناشی از این توفان‌ها هستند (Mohammadi, 2011). اثرات چرخندهای حاره‌ای شامل نیروی تخریبی باد، امواج حاصل از چرخند و سیلاب‌های عظیم که اغلب تأثیرات ویرانگر دارند را شامل می‌شود و در واقع چرخندهای حاره‌ای فجایع طبیعی است که بخش مهمی از خسارت، صدمات مخاطرات طبیعی را شکل می‌دهند (Ghavidel Rahimi et al., 2017). طبق گزارش تارنمای سازمان هواشناسی جهانی در سال ۲۰۲۶، هر ساله، چرخندهای حاره‌ای منجر به تلفات متعدد، مرگ و میر و خسارات قابل توجه به اموال و زیرساخت‌ها در کوتاه‌مدت می‌شوند. در طول ۵۰ سال گذشته، ۱,۹۴۵ فاجعه به چرخندهای حاره‌ای نسبت داده شده است که منجر به مرگ ۷۷۹,۳۲۴ نفر و خسارات اقتصادی به ارزش ۱.۴ تریلیون دلار آمریکا شده است که به طور متوسط، روزانه ۴۳ مرگ و میر و ۷۸ میلیون دلار خسارت را شامل می‌شود. چرخندهای حاره‌ای ۱۷٪ از فجایع مرتبط با آب‌وهوا، اقلیم و آب را به خود اختصاص داده‌اند و مسئول یک سوم از کل مرگ و میرها (۳۸٪) و خسارات اقتصادی (۳۸٪) در این

[1] India Meteorological Department
[2] European Center for Medium-Range Weather Forecasts

دوره ۵۰ ساله بوده‌اند در بلندمدت، چرخندهایی مانند، کاترینای سال ۲۰۰۵، یان در سال ۲۰۱۳، ایرما و ماریا در سال ۲۰۱۷ و هارولد در سال ۲۰۲۰ می‌توانند خساراتی برجای بگذارند که تأثیرات آن برای سال‌ها ادامه یابد و جوامع همچنان در تلاش برای بهبود از ویرانی و جابه‌جایی ناشی از این رویدادها هستند. تأثیرات اقتصادی-اجتماعی مرتبط با چرخندهای حاره‌ای در سراسر جهان به دلیل افزایش زیرساخت‌های فیزیکی ساحلی و سکونت افراد در مناطق ساحلی، رو به افزایش است. افزایش قدرت تخریبی چرخندهای حاره‌ای، اهمیت اطمینان از حفاظت همه مردم و اموال توسط سیستم‌های هشدار اولیه را برجسته می‌کند (wmo,2026). در میان چرخندهای ثبت شده در دریای عرب، چرخند گونو با چهار میلیارد دلار خسارت بیشترین خسارت را به سواحل عمان وارد کرده است (Ghavidel Rahimi et al., 2017). در ایران موجب کشته‌شدن ۲۳ نفر شد. در واقع بعد از سال ۱۹۴۵ این قوی‌ترین چرخند ایجاد شده از این سری چرخندها در دریای عرب بوده است (Khosravi and Pudineh, 2010). همین طور چرخند فت، یکی دیگر از مخرب‌ترین چرخندهای حاره‌ای است که به دریای عمان وارد شده و کشورهای واقع در حاشیه دریای یاد شده را تحت تأثیر خود قرار داده است (Ghavidel Rahimi et al., 2017). در ایران خسارت‌های سنگینی به بخش‌های مختلف از جمله صید و صیادی و راه در شهرستان چابهار وارد کرد (Ghavidel Rahimi, 2010). از آنجا که حوضه شمال غربی اقیانوس هند، موقعیت اقتصادی مهمی دارد. شناسایی مسیر حرکت چرخندها منطقه برای پیش‌بینی مسیر و در نهایت هشدار و پیشگیری از آسیب و خسارت فراوان جانی و مالی بسیار حائز اهمیت است. در واقع با پیش بینی رخ داد چرخندها و مسیر حرکت چرخندها، علاوه بر جلوگیری از آسیب به بنادر و سواحل منطقه و نفت کش‌ها و کشتی‌های تجاری و مسافربری می‌توان از آلودگی زیست محیطی و افزایش تلفات جلوگیری کرد. هدف این پژوهش، شناسایی الگوهای همدیدی مسیر چرخندهای حاره‌ای حوضه شمال غربی اقیانوس هند (دریای عرب و عمان و بخشی از اقیانوس هند) برای پیش‌بینی مسیر چرخندهای حاره‌ای منطقه است، متأسفانه پژوهش‌های کمی برای این منطقه صورت گرفته است و هنوز مجهولاتی در مورد رفتار چرخندهای حاره‌ای این منطقه وجود دارد.

ایوان و کامارگو (Evan and Camargo, 2011) در مطالعه آب و هواشناسی چرخندهای حاره‌ای دریای عرب اذعان داشتند که چرخندهای ماه می، با شروع زودرس مانسون جنوب غربی یا تابستانه مرتبط هستند و چرخندهای حاره‌ای نوامبر زمانی شکل می‌گیرند که خلیج بنگال فشار زیادی را تجربه می‌کند. کیم و همکاران (Kim et al., 2012) در بررسی اجمالی فصلی و پیش‌بینی، با استفاده از مدل مبتنی بر الگوی مسیر چرخندهای حاره‌ای شمال غربی اقیانوس آرام به این نکته اشاره کرده‌اند که مکان‌های پیدایش کلی چرخندهای حاره‌ای به شمال و غرب منتقل شده‌اند. وی و همکاران (Vigh et al., 2012) در مطالعه آب و هواشناسی شکل گیری چشم چرخند بیان داشتند که در ۶۷٪ از چرخندهای حاره‌ای، چشم چرخندها بعد از گذشت ۴۸ ساعت از تبدیل شدن به چرخند حاره‌ای، شکل می‌گیرد. سینگ (Singh et al., 2020) در پژوهشی در مورد مسیر غیرمعمول و طولانی و تشدید سریع چرخند بسیار شدید اوکهی با استفاده از داده‌های بازتحلیل و خروجی مدل‌ها بیان می‌کند: که ترکیب دمای بالای سطح دریا، دمای بالای اقیانوس و برش عمودی ضعیف باد، محیطی بسیار مساعد برای تشدید سریع و حفظ شدت چرخند حتی پس از عبور از روی شبه قاره هند فراهم می‌کند. هونت و همکاران (Hunt et al., 2021) در مطالعه‌ای به بررسی چگونگی تأثیر فازهای مختلف نوسان مادن جولین، بر پیدایش، شدت و توزیع مکانی چرخند حاره‌ای در حوضه شمال اقیانوس هند می‌پردازند. به طور خلاصه، این مقاله تأیید می‌کند که نوسان مادون جولیان، یک عامل کنترلی مهم بر فعالیت چرخندهای حاره‌ای در شمال اقیانوس هند است. سیمپکینز (Simpkins ,2021) در بررسی خود، بیان می‌کنند که شواهد اخیر، افزایش فراوانی و شدت چرخندهای شدید در دریای عرب را نشان می‌دهد در ادامه نتیجه رسیده است که این حوضه از یک منطقه فرعی به یکی از کانون‌های مهم چرخندهای شدید تبدیل شده است. نویسنده با مرور کارهای عددی و مشاهداتی، نقش گرمایش سطح دریا، تغییرات الگوهای همدیدی و برهم‌کنش با سامانه‌های مونسونی را در این تغییرات برجسته می‌کند. همچنین بر پیامدهای مخاطره‌ای برای سواحل عمان، پاکستان و ایران و نیاز به بررسی بیشتر ارزیابی‌های ریسک تأکید می‌کند. لی و همکاران (Li et al., 2021) نشان دادند که مسیر حرکت چرخندهای حاره‌ای در شمال اقیانوس هند طی دهه‌های اخیر به دلیل تغییر در جریانات هدایت‌کننده جوی دچار تغییرات معناداری شده است. بر اساس این مطالعه، الگوی مسیر این چرخندها تمایل بیشتری به انحراف به سمت غرب و برخورد با مناطق ساحلی حاشیه دریای عرب پیدا کرده

است. دشپند و همکاران (Deshpande et al., 2021) در مطالعه‌ای با استفاده از آمار چند دهه‌ای چرخندهای حاره‌ای نشان می‌دهد که در دریای عرب، فراوانی، مدت‌زمان و شدت چرخندها به طور معنی‌داری افزایش یافته، در حالی که در خلیج بنگال کاهش خفیف در فراوانی مشاهده می‌شود. شدت خیلی شدید چرخندها در دریای عرب حدود ۱۵۰٪ بیشتر شده است، همچنین مدت‌زمان سامانه‌ها تا حدود ۸۰ درصد و انرژی تجمعی چرخندها تقریباً سه برابر شده است. نویسندگان این تغییرات را به گرمایش سطح دریا و افزایش رطوبت در چارچوب گرمایش جهانی نسبت می‌دهند. اسمیت و همکاران (Smith et al., 2022) در پژوهشی به بررسی تغییرات اخیر در مسیر چرخندهای حاره‌ای بر فراز دریای عرب پرداخته و پیامدهای آن را بر آسیب‌پذیری مناطق ساحلی ارزیابی می‌کند. یافته‌ها نشان‌دهنده الگوهای جابه‌جایی مسیر و اهمیت درک این پدیده‌ها برای مدیریت ریسک در سواحل است. چرخندهای، کیار و ماها در اکتبر ۲۰۱۹ در دریای عرب، توسط اخیلا و همکاران (Akhila et al., 2022) نتایج جالبی آشکار می‌کند: توزیع مکانی گرمای نهان، ساختار مونسون، و آرایش میدان فشار در تروپوسفر میانی، امکان شکل‌گیری دو هسته چرخندی شدید در یک حوضه محدود را فراهم می‌کند. این پژوهش بر اهمیت در نظر گرفتن برهم‌کنش چند چرخند در تحلیل مسیر و پیش‌آگاهی مسیر تأکید می‌کند. کومار و همکاران (Kumar et al., 2024) به بررسی موردی چرخندهای منتقل شده از خلیج بنگال که پس از عبور از روی شبه‌قاره هند در دریای عرب دوباره تشدید شده‌اند پرداختند. با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل شده، نشان دادند که اگر چه عبور از خشکی منجر به تضعیف سامانه می‌شود، اما ورود مجدد به آب‌های گرم و شرایط برشی مناسب می‌تواند، تقویت و تشدید دوباره چرخند را در دریای عرب رقم بزند. این یافته برای پیش‌بینی مسیر و شدت سامانه‌هایی که از یک حوضه به حوضه مجاور منتقل می‌شوند اهمیت ویژه دارد. نجاه و همکاران (Najah et al., 2024) در پژوهشی تحت عنوان مروری بر عوامل مؤثر بر چرخندهای دریای عرب غربی و عمان، بیان می‌کنند مجموعه‌ای از عواملی می‌توانند بر رفتار و شدت چرخندها اثر بگذارند؛ از جمله دماهای سطح دریا، جریان‌های اقیانوسی، فعالیت، موقعیت محور جت مانسون و نیز نوسان دو قطبی اقیانوس هند. پاول و همکاران (Paul et al., 2025) به بررسی آشفتگی‌های چرخندی هم‌زمان در بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۱ که به طور هم‌زمان بر فراز دریای عرب و خلیج بنگال در شمال اقیانوس هند شکل گرفته است، پرداختند. در ادامه بیان می‌کنند که همه این هم‌زمانی‌ها در ماه‌های بعد از مانسون تابستانه، به‌ویژه در ماه‌های اکتبر و نوامبر رخ داده است. راو و همکاران (Rao et al., 2025) در تحقیق خود در مورد فیزیک چرخندهای حاره‌ای شمال اقیانوس هند برای بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ در دو فصل پیش مانسون تابستانی (آوریل و مه) و بعد از مانسون تابستانی (اکتبر و نوامبر) دریافتند که برخی فاکتورهای فیزیکی در دریای عرب در فصل پیش از مانسون تابستانه و برخی فاکتورها در فصل بعد از مانسون فعال است. یک تحلیل در مورد ویژگی‌های چشم چرخندهای حاره‌ای شمال اقیانوس هند برای بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ توسط کومار و همکاران (Kumar et al., 2025) انجام شد. در این تحلیل نشان می‌دهند که حدود ۶۰٪ چرخندهای حاره‌ای در دریای عرب و ۴۰٪ در خلیج بنگال چشم تشکیل داده‌اند. در ادامه بیان می‌کنند که چشم چرخندهای حاره‌ای بیشترین فراوانی را حدود ۳۶ ساعت (۱/۵ روز) پس از آغاز تشکیل را نشان می‌دهند. ناگالاکشمی و همکاران (Nagalakshmi et al., 2025) در پژوهشی تحت عنوان، عوامل کلیدی شکل‌گیری ابر چرخند گونو (۱ تا ۷ جون ۲۰۰۷)، بیان می‌کنند که دمای بالای سطح دریا، رطوبت بالای لایه‌های میانی تا فوقانی تروپوسفر و برش عمودی کم تا متوسط باد، فضایی به‌شدت مساعد برای یک محیط ترمودینامیکی مطلوب فراهم کردند. المهری با همکاران (Almahri et al., 2026) به مطالعه تغییرپذیری فضای-زمانی، مسیرها و شاخص‌های انرژی و زمان چرخندهای حاره‌ای روی دریای عرب پرداخته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند که مسیرهای چرخندهای حاره‌ای در طول زمان و نیز بین فصل‌های مختلف دستخوش تغییرات محسوسی شده است. در فصل پیش مانسون تابستانه، مسیرهای غالب به‌ترتیب شمال غربی و شمال شرقی هستند، درحالی‌که در فصل پس از مانسون تابستانه، مسیرهای غالب به شمال غربی و غرب سو گرایش پیدا می‌کنند. پردهان و همکاران (Pradhan et al., 2026) به یافته جالبی رسیدند. آن‌ها دریافتند که نوسانات دمای سطحی آب شمال اقیانوس اطلس در زمان بعد از مانسون تابستانه بر روی چرخندهای دریای عرب تأثیر می‌گذارد. در واقع نوسانات دمای سطحی آب شمال اقیانوس اطلس بر روی برش عمودی باد تأثیر می‌گذارد و برش عمودی باد در زایش و تشدید چرخندها مؤثر است. در مطالعه‌ای که توسط ژنا و همکاران (Jena et al., 2026) در مورد تحریک پشت به پشت چرخندهای حاره‌ای در دوره‌ای که نوسان

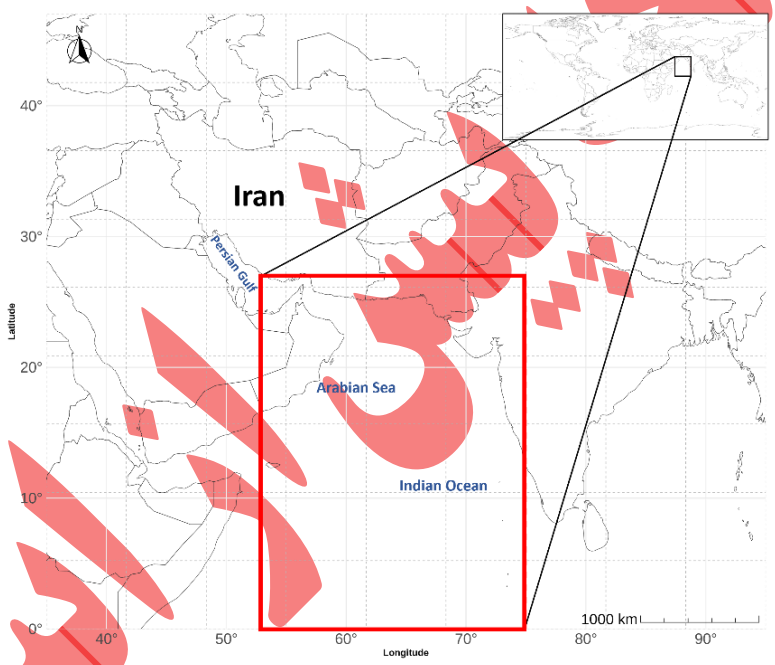
دوقطبی اقیانوس هند مثبت است، نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۹ که نوسان دوقطبی اقیانوس هند بسیار مثبت بوده است، تعداد چرخندها در آن سال افزایش چشمگیری داشتند. خسروی و پودینه (Khosravi and Pudineh, 2010) در پژوهشی بر روی چرخندهای حاره‌ای گونو که با استفاده از تصاویر آنالوگ ماهواره‌ای و نقشه‌های سطوح مختلف جو نشان داد که با افزایش قدرت گونو، محور مراکز پر فشار جنب حاره‌ای در سطوح پایینی جو به سمت شرق و در سطوح میانی به سمت شمال جابه‌جا شده است . در پژوهشی دیگر، لشکری و کیخسروی (Lashkari and Kaykhosravi, 2010) به تحلیل همدیدی چرخند گونو بر روی جنوب شرق پرداختند. یافته‌های آنها نشان داد: در تراز سطح دریا در روز ۶ جون ۲۰۰۷ واچرخند (آنتی‌سیکلون) شمال اروپا به ۲ بخش تقسیم شده است: یکی بر روی دریای خزر که زبانه جنوبی آن بخش اعظم ایران در بر گرفته و تداوم ریزش هوای سرد بر روی ایران انجام می‌دهد و دیگری در شرق دریای مدیترانه که تا سودان ادامه داشته و باعث تقویت چرخند (سیکلون) شده است. قویدل رحیمی (Ghavidel Rahimi, 2010) همگرایی جریان رطوبت جو طی بارش فوق سنگین ناشی از چرخندهای حاره‌ای فت را تحلیل کرده و به این نتیجه رسیده است که: منابع رطوبتی بارش بارش‌های چابهار در سطوح ۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال از خلیج عدن، دریای سرخ، دریاهای عمان و دریای عرب تأمین شده است. غفاریان و همکاران (Qaffarian et al., 2011) با استفاده از مدل عددی وضع هوا WRF[1] وقوع این چرخند و قدرت آن را راستی‌آزمایی کرده‌اند. سلمانیان و همکاران (Salmanian et al., 2012) در واکاوی همدید پیدایش و گسترش چرخندهای حاره‌ای فت در جنوب غرب آسیا، اذعان داشتند که با تحلیل ارتباط میان این دو مؤلفه یعنی، تغییرات امگا و فشار، می‌توان گذرگاه چرخند فت را تعیین نمود. نتایج واکاوی سازوکار چرخند حاره‌ای نیلوفر توسط قویدل رحیمی و همکاران (Ghavidel Rahimi et al., 2015) نشان داد که افزایش سرعت رودباد تراز پایینی جو نسبت به ترازهای بالایی، سبب تغییر منبع انرژی حرکتی چرخند از ترازهای فوقانی به ترازهای زیرین جو شده است، همچنین اندرکنش زبانه‌ها و مراکز واچرخندی مستقر بر روی دریای عرب، مسیر حرکت و جابه‌جایی چرخند را تا از بین رفتن آن، شکل داده است. قویدل رحیمی و همکاران ( Ghavidel Rahimi et al., 2017) در مقاله‌ای با عنوان تحلیلی از ویژگی‌های مخاطره چرخندهای حاره‌ای مؤثر بر سواحل جنوبی ایران به این نتیجه رسیده‌اند که: در طی سال‌های ۲۰۱۵-۱۸۷۱ در مجموع ۳۱ چرخندهای حاره‌ای سواحل جنوبی ایران را به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم تحت تأثیر قرار داده است. بیشترین فراوانی ماهانه مربوط به ماه جون با ۲۱ رخداد و پس از آن ماه ژوئیه با ۷ مورد است. از نظر فراوانی مکانی تمامی چرخندهای حاره‌ای شناسایی شده دریای عرب و عرض‌های تقریبی ۱۵درجه شمالی را جهت تکوین و در نهایت توسعه خود برگزیده‌اند و در ادامه بیان می‌کنند، بیشترین تعداد رخداد چرخند که در ماه جون اتفاق افتاده است. از نظر حرکت و جابه‌جایی مسیر جنوب شرق-شمال غرب را انتخاب کرده‌اند. شجاع و همکاران (Shoja et al., 2020) در تحلیل شرایط همدید چرخندهای ساگار و مکیونو که در سال ۲۰۱۸ رخ داده‌اند، نشان دادند که مسیر حرکت چرخندها انطباق کاملی با نواحی بیشینه نم نسبی و تاوایی مطلق دارد. توزیع فضایی متغیرهای جوی، دما و فشار سطح دریا و برش عمودی باد بیانگر این بود که مقدار مطلوب این پارامترها، در نواحی تحت تأثیر چرخندها، در هر سه زمان شکل‌گیری و شدت و خاتمه آن‌ها متمرکز گردیده است. اسدی و همکارانش (Asadi et al., 2021) در بررسی ماهیت ساختاری چرخند حاره‌ای آشوبا بر روی دریای عرب، بیان می‌کنند که در تراز میانی جو ضمن تشکیل هسته کم ارتفاعی با چرخندگی مثبت بسیار قوی، شرایط برای تشکیل چرخند حاره‌ای در منطقه فراهم آمده است. سازمان هواشناسی جهانی در گزارشی در مورد چرخندهای حاره‌ای بیان می‌کند که اوج فعالیت‌های چرخندهای دریای عرب در پیش از فصل مانسون تابستانی (به‌ویژه در ماه‌های می و جون) و پس از فصل مانسون تابستانی (اکتبر و نوامبر) رخ می‌دهد و سهم دریای عرب در چند دهه اخیر در مقایسه با دوره‌های پیشین افزایش یافته است (Das, 2022).

1 - Weather Research and Forecasting model

## مواد و روش‌ها

برای شناسایی الگوهای همدیدی مسیر چرخندهای حاره‌ای، ابتدا مشخصات چرخندهای حاره‌ای حوضه شمال غربی اقیانوس هند شامل: تاریخ، طبقه، موقعیت (زایش و مسیر و اضمحلال) چرخندها، از گزارش‌های سالانه و گزارش هر مورد چرخند، از تارنمای دپارتمان هواشناسی هند[1] استخراج گردید. در گام بعدی داده‌های رقومی ۰/۲۵ درجه ژئوپتانسیل سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال، ERA5 از تارنمای مرکز داده‌های اروپا (ECMWF) دریافت شد.

این تحقیق از نوع بنیادی بوده و از روش توصیفی -تحلیلی در راستای رسیدن به اهداف استفاده می‌کند. هدف این تحقیق شناسایی الگوهای همدیدی مسیر چرخندهای حاره‌ای، حوضه شمال غربی اقیانوس هند برای پیش‌بینی مسیر چرخندهای حاره‌ای منطقه است. محدوده مورد مطالعه شامل حوضه شمال غربی اقیانوس هند (دریای عرب، دریای عمان و بخش‌هایی از شمال اقیانوس هند) در مختصات جغرافیایی صفر تا ۲۷ درجه عرض شمالی و ۵۳ تا ۷۵ درجه طول شرقی است (شکل ۱).




**شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه**

**Fig 1. Map of the study area**

در این پژوهش از روش تحلیل عاملی با آرایش S، برای طبقه‌بندی الگوهای همدیدی استفاده شده است. در حالت S، ژئوپتانسیل سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال، تک فاکتور یا تک عامل است و زمان (چند زمان) و مکان (چند ایستگاه) متغیر هستند. هر روزی که چرخند در محدود مورد مطالعه فعالیت داشته است، ساعت اوج آن روز، انتخاب شده است. به تعداد روزهای فعالیت هر چرخند، داده جمع‌آوری شد. در واقع ۱۶۹ روز گزینش شد. هر گرید یک ایستگاه یا مکان است. ارقام ژئوپتانسیل سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال ساعت انتخاب شده، نماینده یک روز شد. داده‌های هر روز به ماتریسی با ابعاد، ۱۰۹×۸۹ سطر و ستون با مجموع ۹۷۰۱ سلول مکانی تبدیل شد. ۱۶۹ ردیف (تعداد روزها) در ۹۷۰۱ سلول (مجموع سلول‌های هر روز)، مجموعاً به ۱۶۳۹۴۶۹ سلول تبدیل شد. تمامی مراحل کار با داده‌ها تا شناسایی الگوها با متلب (MATLAB) انجام شد. ۱۰ الگوی ژئوپتانسیل سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال به دست آمد. این الگوها، در واقع بیان‌کننده، الگوهای همدیدی غالب مسیر چرخندهای حاره‌ای هستند. در گام آخر، نقشه‌های این ۱۰ الگوی به دست

1- www.imd.gov.com

آمده با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R[1] (در محیط توسعه نرم‌افزاری Rstudio) ترسیم شد. جامعه آماری این پژوهش، چرخندهای حاره‌ای تشکیل شده در حوضه شمال غربی اقیانوس هند برای دوره ۲۰۲۲ – ۱۹۸۲ یعنی دوره ۴۱ ساله است.

**مبانی نظری**

اولین‌بار گری پیرامون اقلیم‌شناسی پیدایش چرخندهای حاره‌ای چندین وضعیت محیطی مطلوب برای رخداد این پدیده را شناسایی کرد که شامل دو گروه شرایط ترمودینامیکی (دمای سطح دریا، ناپایداری شرطی و رطوبت نسبی و سطوح میانی جو) و دینامیکی (پارامتر کوریولیس، برش عمودی باد و تاوایی نسبی در سطوح پایین جو) می‌شدند. این شرایط برای رخداد چرخندهای حاره‌ای لازم است (Shoja et al., 2018). سازمان هواشناسی جهانی در گزارشی در تارنمای خود شرایط حیاتی برای توسعه چرخندهای حاره‌ای را به این صورت بیان می‌کند: ۱- انرژی حرارتی کافی در اقیانوس (دمای سطح آب اقیانوس بالاتر از ۲۶/۵ درجه سلسیوس و ادامه‌داشتن این دما تا عمق حداقل ۶۰ متر) ۲- رطوبت نسبی بالا در تراز میانی جو (وجود رطوبت نسبی رو به افزایش در ترازهای ۶۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال) ۳- ناپایداری شرطی (برای امکان صعود هوا و توسعه عمودی سامانه‌های همرفتی) ۴- چرخندگی نسبی افزایشی در تراز پایین تروپوسفر (منبع چرخش چرخندی) ۵- برش باد عمودی ضعیف (در محل زایش برای شکل‌گیری اولیه و تکامل چرخند) ۶- نیروی کوریولیس کافی (محل زایش این سامانه‌ها معمولاً در فاصله حداقل ۵ درجه عرض جغرافیایی از استوا واقع شده باشد) (WMO, 2017). چرخند حاره‌ای با ورود به خشکی به دلیل کاهش شدید تأمین رطوبت و افزایش اصطکاک سطحی و همچنین قرارگیری بر روی آب‌های سرد، ضعیف یا از بین می‌روند (IMD, 2021).

عوامل مؤثر بر مسیر حرکت چرخندهای حاره‌ای به شرح زیر است:

۱- جریان‌های هدایت‌کننده و اصول حاکم بر حرکت: این جریان‌ها معمولاً به‌صورت میانگین وزنی باد در یک لایه عمقی از جو، اغلب بین سطوح ۷۰۰ تا ۳۰۰ هکتوپاسکال، تعریف می‌شوند. در شرایطی که چرخند نسبتاً ضعیف باشد، حرکت آن تقریباً به‌طور کامل تابع جریان‌های محیطی است. با افزایش شدت چرخند و تعمیق سامانه، سهم اثرات دینامیکی داخلی افزایش یافته و حرکت سامانه می‌تواند از جریان‌های محیطی انحراف پیدا کند (WMO, 2017).

۲- نقش پرفشار جنب‌حاره‌ای: پرفشار جنب‌حاره‌ای یکی از مهم‌ترین سامانه‌های همدیدی مؤثر بر مسیر حرکت چرخندهای حاره‌ای است. تضعیف یا ایجاد شکاف در پرفشار جنب‌حاره‌ای معمولاً امکان نفوذ چرخند به عرض‌های بالاتر و ورود به جریان‌های غربی را فراهم می‌کند. موقعیت، شدت و پیوستگی این پرفشار تعیین می‌کند که چرخند:

- به حرکت غربی یا غرب-شمال غربی ادامه دهد.
- به سمت عرض‌های بالاتر بازپیچش[2] کند.
- یا در مسیرهای غیرمعمول حرکت کند (WMO, 2017).

۳-تأثیر ناوه‌ها و سامانه‌های عرض‌های میانه: ناوه‌های عرض‌های میانی می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر مسیر چرخندهای حاره‌ای داشته باشند. نزدیک‌شدن یک ناوه عمیق می‌تواند موجب:

- شتاب‌گیری حرکت چرخند
- تغییر ناگهانی مسیر شود (WMO, 2017).

۴- اثر بتا: اثر بتا ناشی از تغییرات پارامتر کوریولیس با عرض جغرافیایی است. این اثر باعث ایجاد یک حرکت ذاتی در چرخند می‌شود که حتی در غیاب جریان محیطی قابل توجه نیز وجود دارد. در نیم‌کره شمالی، اثر بتا معمولاً موجب حرکت آرام به سمت شمال غرب و در نیم‌کره جنوبی به سمت جنوب غرب می‌شود. این مؤلفه حرکتی، اگرچه نسبت به جریان‌های هدایت‌کننده ضعیف‌تر است، اما در مقیاس زمانی چندروزه می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر مسیر چرخند داشته باشد (WMO, 2017).

---

1- Team, R.C. (2025).
2- Recurvature

نسخه پیش از انتشار

## نتایج و بحث

بر اساس داده‌های ژئوپتانسیل سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال و روش تحلیل عاملی با آرایش S، ده الگوی همدیدی شاخص برای مسیر چرخندهای حاره‌ای حوضه شمال غربی اقیانوس هند (دریای عرب، دریای عمان و بخش‌هایی از شمال اقیانوس هند) استخراج شد. این الگوها وضعیت‌های مختلف استقرار پر ارتفاع جنب حاره‌ای شبه‌جزیره عربستان، کم‌ارتفاع‌های پاکستان و شمال غرب هند، فرودهای عرض‌های میانه شرق مدیترانه و دریای سرخ و نیز پر ارتفاع غرب هند را در دوره ۴۱ ساله ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۲ نمایندگی می‌کنند. در مجموع ۱۶۹ روز چرخندی در دامنه طول جغرافیایی ۵۳ تا ۷۵ درجه شرقی و عرض جغرافیایی، صفر تا ۲۷ درجه شمالی انتخاب و در قالب شبکه ۸۹×۱۰۹ (۹۷۰۱ سلول مکانی برای هر روز) وارد تحلیل شدند. جدول ۱ فراوانی زمانی هر یک از الگوها در ماه‌های مختلف (می، جون، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر) و نیز بیشترین فراوانی الگو در یک سال مشخص را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که الگوهای ۱، ۲، ۳، ۶، ۷ و ۹ از نظر تعداد روزهای چرخندی، سهم بیشتری دارند. ماه‌های می و جون ماه‌های پیش از فصل مانسون تابستانی است و ماه‌های سپتامبر، اکتبر، نوامبر، دسامبر پس از فصل مانسون تابستانی است. طبق جدول ۱ الگوی ۲ با ۳۰ روز چرخندی که بیشترین فراوانی آن مربوط به ماه جون با ۱۰ روز چرخندی و سال ۲۰۰۷ با ۴ روز چرخندی است. بیشترین روز چرخندی را به خود اختصاص داده است. الگوی ۴ و ۸ با مجموع ۲ روز چرخندی، کمترین چرخند را به خود اختصاص داده‌اند. البته هر ۲ روز چرخندی را الگوی ۸ مربوط به چرخند فیان است. بیشترین فراوانی روز چرخندی مربوط به سال ۲۰۱۹ با ۷ روز توفانی است. الگوهای همدیدی را به لحاظ نقششان در هدایت مسیر چرخندها می‌توان در چند گروه کلی در نظر گرفت:

الف- الگوهای مسدودکننده و هدایت‌کننده قوی پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان مانند الگوهای ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰

ب- الگوهای تحت نفوذ فروهای عرض‌های میانی و تضعیف پر ارتفاع عربستان به ویژه الگوهای ۳ و ۴ و ۸

ج- الگوهای نشان‌دهنده نقش برجسته کم‌ارتفاع‌های حرارتی پاکستان و شمال غرب هند در بازپیچش و تغییر مسیر چرخندها مانند الگوهای ۲، ۳، ۴، ۵ و ۹

در ادامه هر الگو با تأکید بر پیوستگی تحلیلی و ارتباط آن با دیگر الگوها معرفی می‌شود، به‌گونه‌ای که روند تحلیل از الگوهای مسدودکننده آغاز می‌شود و به سمت الگوهای پیچیده‌تر و بازپیچشی و مسیرهای خاص ختم می‌گردد.

در جدول ۱ مشخصات الگوها از قبیل نام الگو و بیشترین فراوانی الگو در یک سال و فراوانی در ماه‌ها و مجموع فراوانی روزهای های چرخندی هر الگو ذکر شده است.

**جدول ۱. مشخصات الگوهای همدیدی شناسایی شده**

**Table 1. Characteristics of Identified Synoptic Patterns**

| شماره الگو Pattern Number | بیشترین فراوانی Highest Frequency | | فراوانی می May Frequency | فراوانی جون June Frequency | فراوانی سپتامبر September Frequency | فراوانی اکتبر October Frequency | فراوانی نوامبر November Frequency | فراوانی دسامبر December Frequency | مجموع روزها Total Days |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | سال Year | فراوانی سال Annual Frequency | | | | | | | |
| 1 | 2019 | 7 روز Day | 4 | 3 | 0 | 9 | 6 | 3 | 25 |
| 2 | 2007 | 4 روز Day | 6 | 10 | 2 | 7 | 4 | 1 | 30 |
| 3 | 2019 | 6 روز Day | 1 | 6 | 2 | 6 | 8 | 0 | 23 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 2018<br>2020 | 1 روز<br>Day<br>1 روز<br>Day | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| 5 | 2019 | 3 روز<br>Day | 1 | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 5 |
| 6 | 2015 | 5 روز<br>Day | 5 | 4 | 3 | 5 | 7 | 4 | 28 |
| 7 | 2019<br>2015 | 4 روز<br>Day<br>4 روز<br>Day | 7 | 7 | 0 | 4 | 4 | 3 | 25 |
| 8 | 2019 | 2 روز<br>Day | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 9 | 2021<br>2019<br>2004<br>1995<br>1985 | 2 روز<br>Day<br>2 روز<br>Day<br>2 روز<br>Day<br>2 روز<br>Day<br>2 روز<br>Day | 5 | 3 | 0 | 7 | 2 | 1 | 18 |
| 11 | 2018<br>2004<br>1994 | 2 روز<br>Day<br>2 روز<br>Day<br>2 روز<br>Day | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 0 | 11 |

**تحلیل الگوی ۱ (غلبه پر ارتفاع شبه جزیره عربستان)**

در الگوی ۱، پر ارتفاع جنب‌حاره‌ای شبه‌جزیره عربستان تا نواحی جنوبی ایران گسترش یافته و پربند (کنتور) ۳۱۶۰ متر بخشی از جنوب ایران را در بر می‌گیرد. کنتور ۳۱۵۰ متری این پر ارتفاع، شمال دریای عرب، مرکز هند و جنوب دریای عرب را پوشانده و در نتیجه، چرخندهای این الگو در شمال دریای عرب با مانعی شبه‌دیواره‌ای مواجه می‌شوند. در این وضعیت، پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان با استقرار بر فراز غرب حوضه، مانع پیشروی بیشتر چرخندها به سمت غرب و شمال غرب می‌شود و در نتیجه چرخندهای حاره‌ای پس از برخورد با کنتور ۳۱۷۰ متری مجبور به بازپیچش به سمت شمال شرق می‌گردند. جریان محیطی لایه میانی وردسپهر یا تروپوسفر (حدود ۷۰۰ هکتوپاسکال) نقش هدایت‌کننده اصلی را بر عهده دارد و چرخند، به‌عنوان سامانه‌ای کوچک‌مقیاس در مقایسه با پشته پر ارتفاع جنب‌حاره‌ای، در دل این جریان بزرگ مقیاس حمل می‌شود. بر اساس قائده باد زمین‌گرد، باد در اطراف پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان موازی خطوط هم‌ارتفاع جریان می‌یابد؛ به‌طوری که در شمال عربستان و اردن، جریان واچرخندی در جهت عقربه‌های ساعت به سمت شرق، و در دریای عمان در امتداد لبه شرقی پر ارتفاع به‌سوی جنوب غربی می‌وزد. فاصله نسبتاً زیاد میان کنتورها نشان‌دهنده حرکت کند واچرخندی است. زبانه‌های پر ارتفاع، مسیرهای غرب سو، شمال غرب‌سو، شمال شرق‌سو و تا حدی جنوب‌غرب‌سو را برای چرخندهای این الگو رقم می‌زند. مسیرهای این الگو، به سمت غرب و شمال غرب و شمال شرق و جنوب غرب است (شکل ۲).

نسخه پیش از انتشار

**الگوی ۲ (نقش هم زمان پر ارتفاع شبه جزیره عربستان و کم‌ارتفاع حرارتی پاکستان)**

الگوی ۲ از نظر استقرار پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان به الگوی ۱ (شکل ۲) نزدیک است، اما تفاوت مهم آن، تمرکز پر ارتفاع بر خود شبه‌جزیره عربستان و گسترش زبانه ۳۱۴۰ متری آن بر نیمه جنوبی ایران، غرب و جنوب دریای عرب و نیمه جنوبی هند است. مرکز و نیمه شمالی دریای عرب تحت تسلط کم‌ارتفاعی قرار دارد که میدان فشار مناسبی را برای فعالیت چرخندها ایجاد می‌کند.

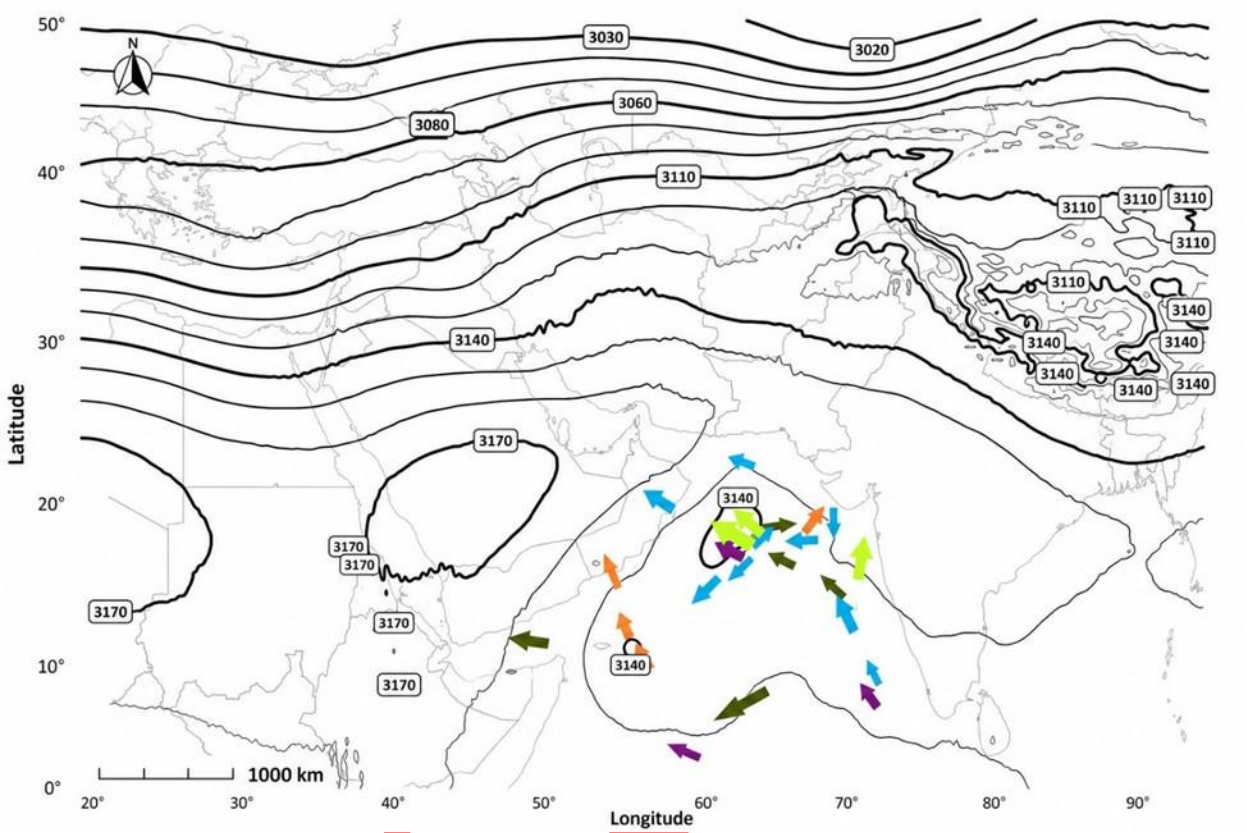
در این الگو، لبه شرقی پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان به‌صورت دیواره‌ای عمل کرده و مسیر چرخندهای غرب سو و شمال غرب سو را سد می‌کند؛ چرخندها تحت تأثیر اثر بتا، ابتدا به سمت غرب شمال غرب حرکت می‌کنند، اما با رسیدن به لبه شرقی پر ارتفاع و در نبود شرایط مناسب ترمودینامیکی در خشکی (ورود هوای خشک، آب نسبتاً سرد، ناهمواری‌ها)، اغلب تضعیف یا نابود می‌شوند. در صورت ادامه حیات چرخند، چرخش در مسیر دارند. در مواردی که کم‌ارتفاع پاکستان و شمال هند تقویت شده و هم‌زمانرود شرق دریای مدیترانه و شمال دریای سرخ به سمت شرق و عرض‌های پایین‌تر نفوذ کند، پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان به سمت غرب عقب‌نشینی می‌کند و چرخندهای شمال غرب سو، امکان بازپیچش به سمت شمال شرق و شرق برای آنها فراهم می‌شود. نفوذ بیشتر و حرکت رو به شرق، فرودها، موجب می‌شود پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان به سمت غرب عقب‌نشینی کند و چرخندها هم متناسب با تغییر شرایط به سمت فرود حرکت کنند و مسیر آنها مسیر شمال شرق شود (مثل چرخند گونو در ۲۰۰۷). مسیرهای این الگو، غربی و شمال غرب و شمال شرق است (شکل ۳).

**الگوی ۳ (نقش فرود شرق مدیترانه)**

الگوی ۳ از نظر الگوی کلی، شباهت زیادی به الگوی ۲ دارد (شکل ۳)، با این تفاوت که پر ارتفاع نیمه جنوبی هند که در الگوی ۲ مشهود بود، در این الگو حذف شده و در مقابل، فرود شرق دریای مدیترانه اندکی عمیق‌تر شده است. این تغییر موجب می‌شود که نقش کم‌ارتفاع‌های، پاکستان و شمال هند و نیز فرودهای عرض‌های میانه در هدایت چرخندها برجسته‌تر شود. به‌همین دلیل، در حالی که در ابتدای مسیر، حرکت چرخندها مانند الگوی ۲ عمدتاً به سمت غرب و شمال غرب است، با تشدید فرود شرق مدیترانه و نفوذ آن به عرض‌های پایین‌تر، محور پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان تغییر کرده، مداری‌تر و گاه بریده می‌شود و در نتیجه، مسیر چرخند به‌سوی شمال، شمال شرق و حتی شرق تغییر می‌کند. این شرایط همدیدی مبنای حرکت چرخندهایی مانند گونو (۲۰۰۷) و فت (۲۰۱۰) به سمت ایران و همچنین بازپیچش برخی از چرخندهای حوضه دریای عرب به سمت شمال شرق است. چرخند فت پس از برخورد و بلاک شدن با قسمت شمالی پر ارتفاع، در نتیجه شکل توپوگرافی منطقه به سمت شمال شرق و شرق چرخش کرد. بنابراین، مسیرهای غالب این الگو را می‌توان غرب سو، شمال غرب‌سو، شمال سو (قطب سو) و شمال شرق‌سو دانست. (شکل ۴).

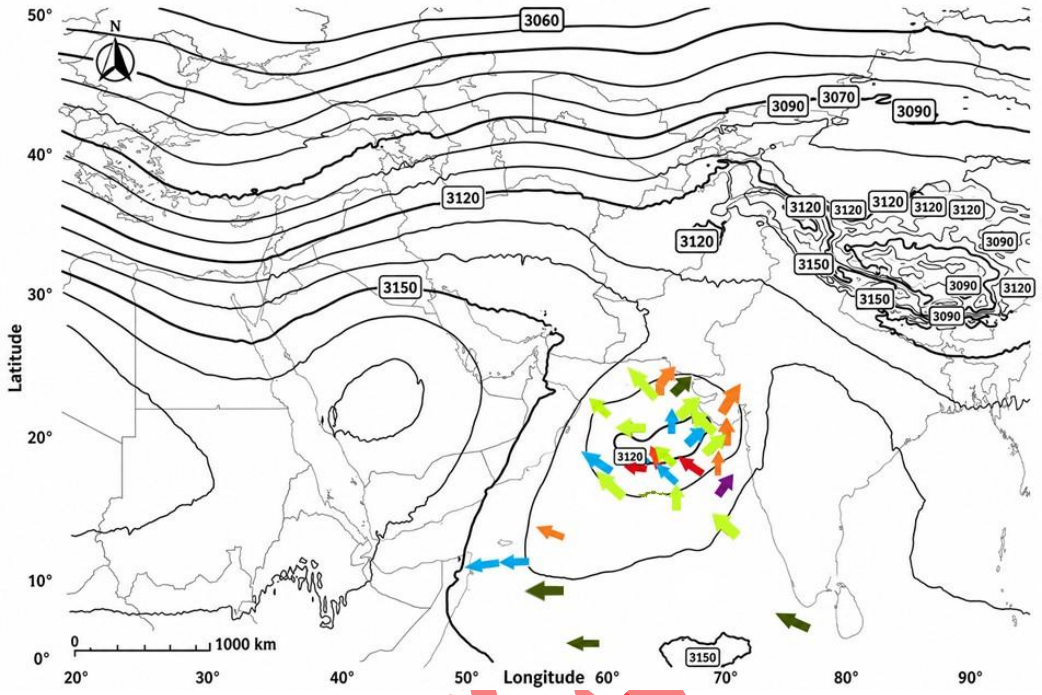
**الگوی ۴ (نقش کم‌ارتفاع حرارتی پاکستان و مداری شدن پر ارتفاع شبه جزیره عربستان)**

الگوی ۴، حاصل ترکیب دو روز از دو چرخند مستقل است که یکی در ماه جون و دیگری در اکتبر رخ داده‌اند. در بخش شرقی نقشه، چرخندی که در ماه جون شکل‌گرفته، پس از حرکت اولیه، به سمت سواحل گجرات هند بازپیچش کرده است؛ این بازپیچش در اثر جذب چرخند توسط کم‌ارتفاع پاکستان و شمال هند رخ داده و کم‌ارتفاع مذکور عملاً به‌عنوان مسیردهنده چرخند عمل کرده است. در بخش غربی نقشه، چرخند دیگری که در ماه اکتبر رخ داده است، تحت تأثیر استقرار مداری پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان به سمت یمن هدایت شده است. در این حالت، پر ارتفاع مداری شبه‌جزیره عربستان از پیشروی چرخند به سمت شمال و شمال غرب جلوگیری کرده و مسیر آن را به‌سوی یمن، خلیج عدن و شمال/شمال شرق سومالی منحرف می‌کند. تغییرات غرب سو و جنوب غرب سو در مسیر چرخند در این الگو نتیجه تضعیف و جابه‌جایی (بریدگی) شاخه غربی پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان در اثر نفوذ فرودهای شرق مدیترانه و منطقه دریای سرخ به عرض‌های پایین‌تر است. مسیرهای غالب این الگو غرب سو و شمال شرق سو است (شکل ۵).



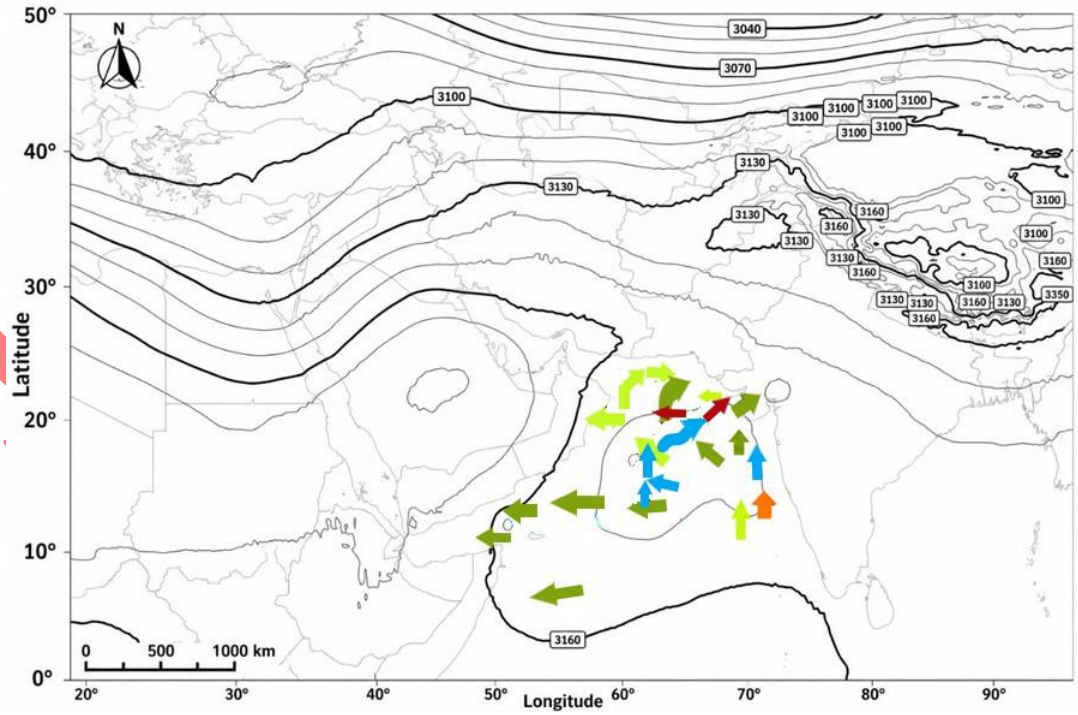

شکل ۲. الگوی ۱: ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال (واحد ژئوپتانسیل به متر)- جهت حرکت چرخند در زمان انتخاب شده برای مطالعه- رنگ آبی: چرخندهای ماه اکتبر، سبز تیره: نوامبر، نارنجی: می، بنفش تیره: دسامبر، سبز روشن یا فسفری: جو– رنگ‌های نقشه‌های بعدی تابع این نقشه است (اندازه پیکان‌ها قراردادی است و شاخصی برای اندازه‌گیری نیست)

**Fig 2. Pattern 1: Geopotential height at 700 Hectopascals (units in geopotential to meters) – Direction of cyclone movement at the time selected for study – Blue: October cyclones, dark green: November, orange: May, dark purple: December, light or phosphor green: June – The colors of the subsequent maps are a function of this map (the size of the arrows is for better visibility and is not an indicator for measuring)**



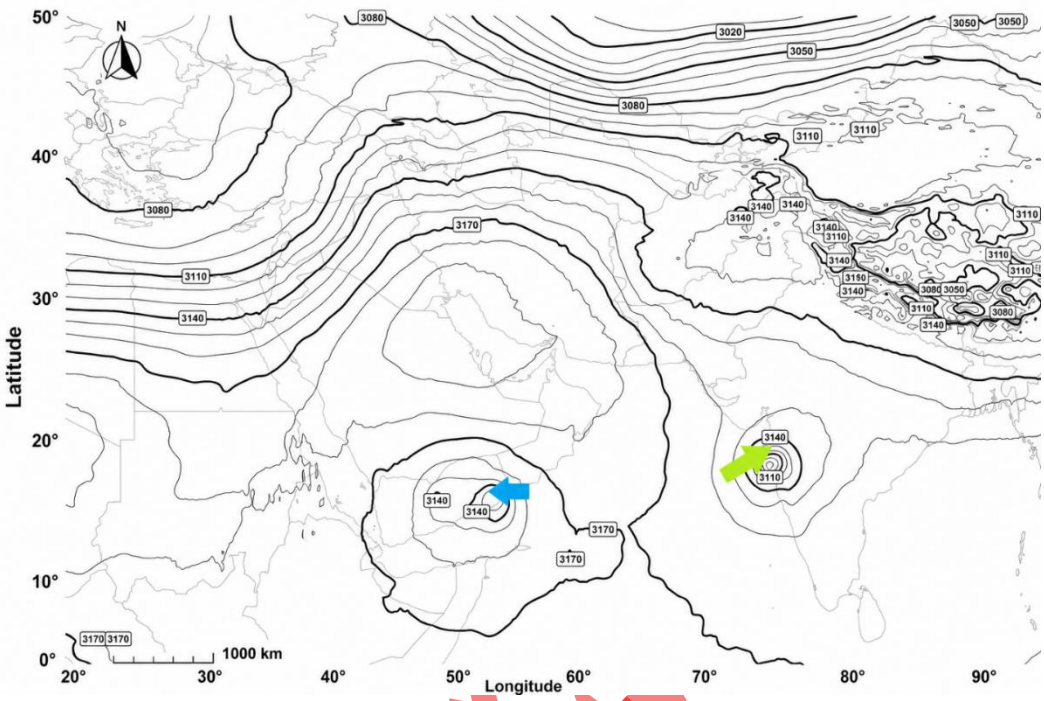

شکل ۳. الگوی ۲: رنگ آبی: چرخندهای ماه اکتبر، سبز تیره: نوامبر، سبز فسفری: جون، ، نارنجی: می، بنفش تیره: دسامبر، ، قرمز تیره: سپتامبر

**Fig 3. Pattern 2: Blue: October rotations, Dark green: November, phosphor green: June, Phosphor green: June rotation, Orange: May, Dark purple: December, Dark red: September**




شکل ۴. الگوی ۳: رنگ آبی: چرخندهای ماه اکتبر، سبز تیره: نوامبر، سبز فسفری: جون، نارنجی: می، قرمز تیره: سپتامبر

**Fig 4. Pattern 3: Blue: October rotations, dark green: November, phosphor green: June, orange: May, dark red: September**




شکل ۵. الگوی ۴: رنگ آبی: چرخند للوبان ۲۰۱۸ اکتبر، سبز روشن: چرخند نیسارگا ۲۰۲۰ جون

**Fig 5. Pattern 4: Blue: October 2018 Luban Cyclone, phosphor Green: June 2020 Nisarga Cyclone**

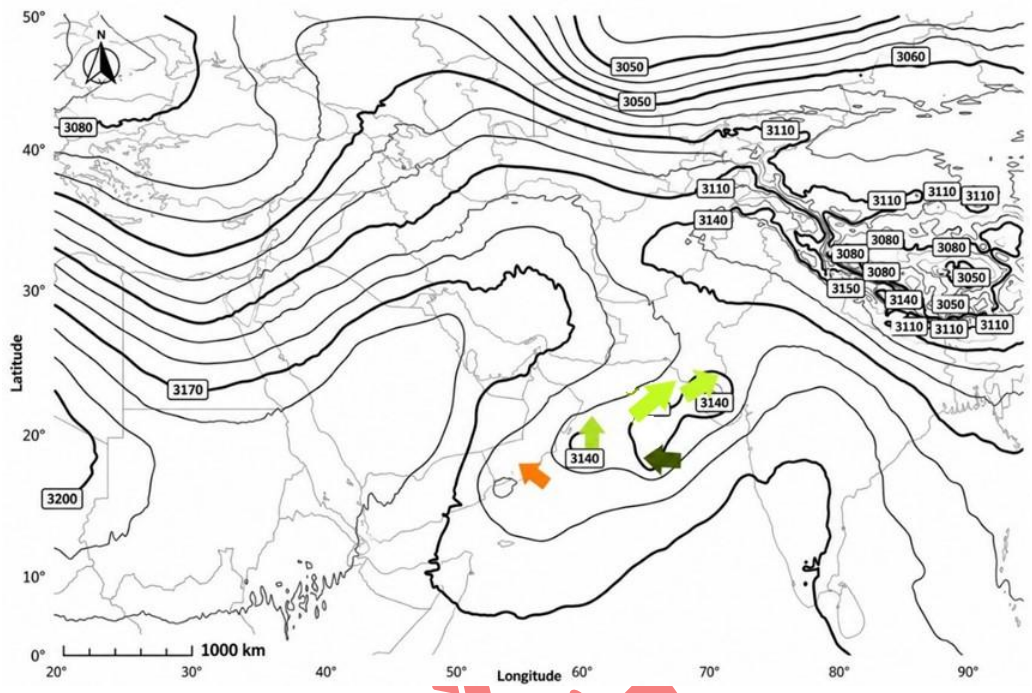
### الگوی ۵ (نقش پر ارتفاع عربستان و کم‌ارتفاع حرارتی پاکستان)

الگوی ۵ از حیث میدان ژئوپتانسیل شباهت زیادی به الگوی ۲ دارد (شکل ۳)، چون همانند الگوی ۲، غرب و جنوب حوضه و همچنین نیمه جنوبی هند تحت تسلط پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان قرار دارند. در این وضعیت نیز همانند الگوی ۲، پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان به‌همراه کم‌ارتفاع پاکستان و شمال هند، عناصر اصلی تعیین‌کننده مسیر چرخندها هستند.

چرخش‌های شمال شرق سو در این الگو، حاصل مسدودشدن مسیر چرخند توسط پر ارتفاع عربستان و هم‌زمان وجود کم‌ارتفاع‌های پاکستان و شمال هند است؛ بدین معنا که چرخند پس از برخورد با دیواره پر ارتفاع به سمت منطقه کم‌ارتفاع جذب می‌شود. حرکت‌های غرب سو نیز تحت‌تأثیر نفوذ فرود شرق مدیترانه به عرض‌های پایین‌تر است که موجب شمال سو شدن محور پر ارتفاع عربستان و در نتیجه هدایت برخی چرخندها به‌سوی یمن و عمان می‌شود. در این الگو نیز مسیرهای غرب سو، شمال غرب سو (بازپیچش‌شده)، شمال سو و شمال شرق سو مشاهده می‌شود (شکل ۶).

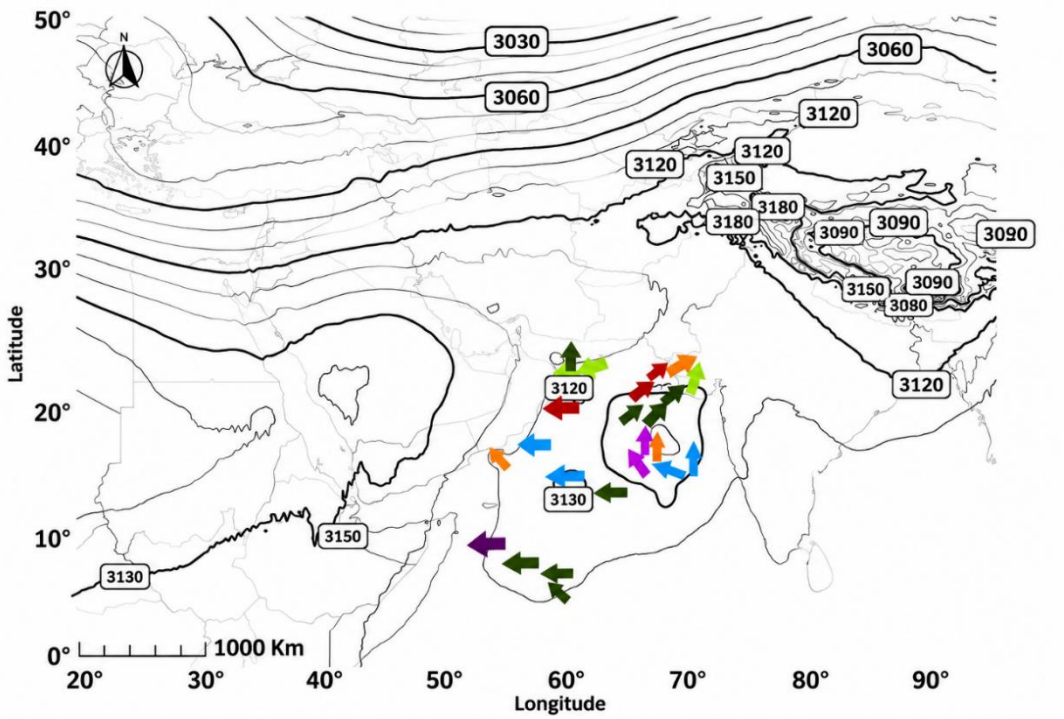
### الگوی ۶ (نقش مسدود کنندگی پر ارتفاع شبه جزیره عربستان در نیمه جنوبی ایران)

در الگوی ۶، زبانه ۳۱۷۰ متری پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان نیمه جنوبی ایران، پاکستان، هند و جنوب دریای عرب را دربرگرفته است. نبود زبانه‌های پر ارتفاع در شرق پاکستان و غرب هند نشان‌دهنده حاکمیت کم‌ارتفاعی در این منطقه است که می‌تواند به‌عنوان ناحیه جذب‌کننده چرخند عمل کند. در این آرایش، مسیر چرخندها از غرب و تا حدودی از شرق توسط زبانه‌های پر ارتفاع مسدود شده و تنها مسیر باز برای حرکت چرخند، ناحیه شمال شرق حوضه است. به همین دلیل، اگرچه تعداد محدودی مسیر شمال غرب سو و شمال سو نیز در این الگو دیده می‌شود، اما سهم عمده مسیرها به سمت شمال شرق است. این الگو به‌خوبی نشان می‌دهد که چگونه تقویت پر ارتفاع عربستان در نیمه جنوبی ایران، می‌تواند چرخندها را به سمت پاکستان و شمال غرب هند هدایت کند. تعدادی از مسیرهای این الگو، شمال غرب و شمال سو و بیشتر آن‌ها شمال شرق سو است (شکل ۷).




شکل ۶. الگوی ۵: سبز تیره: نوامبر، سبز فسفری: جون، نارنجی: می

**Fig 6. Pattern 5: Dark green: November, phosphor Green: June, Phosphor green: June, Orange: May**

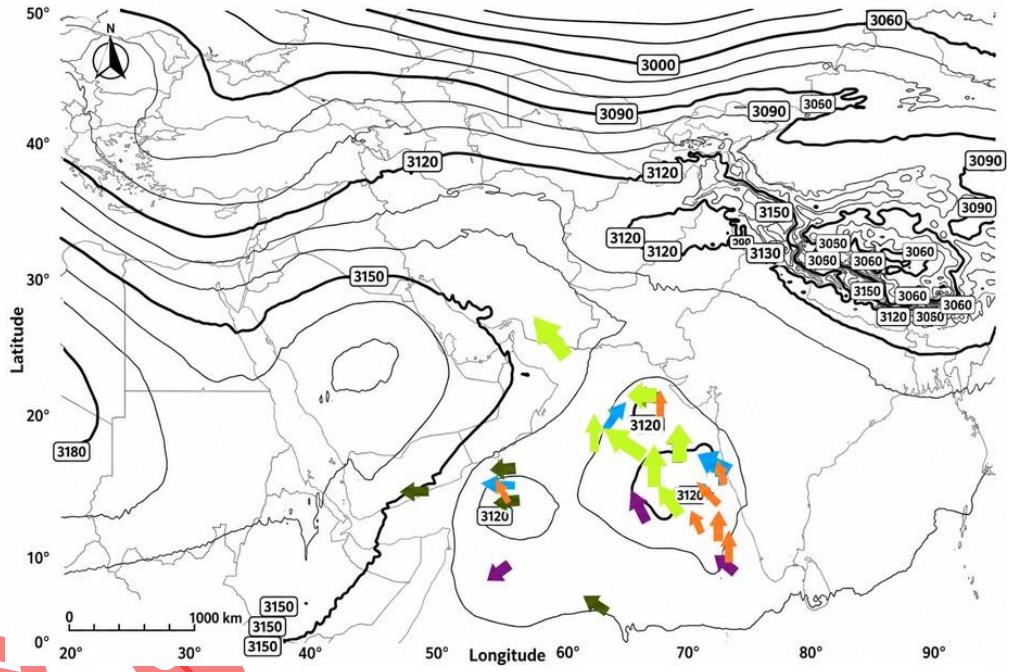



شکل ۷- الگوی ۶: رنگ آبی: چرخندهای ماه اکتبر، سبز تیره: نوامبر، سبز فسفری: جون، نارنجی: می، بنفش تیره: دسامبر، قرمز تیره: سپتامبر

**Fig 7. Pattern 6: Blue: October rotations, dark green: November, phosphor green: June, orange: May, dark and light purple: December, dark red: September**

**الگوی ۷ (نقش نفوذ فرود شرق مدیترانه و بریده شدن پر ارتفاع شبه جزیره عربستان)**

در الگوی ۷، نیمه جنوبی ایران و غرب و جنوب حوضه مورد مطالعه تحت پوشش کنتور ۳۱۶۰ متری قرار دارد که نسبت به برخی الگوی ۶ (شکل ۷)، حدود ۱۰ متر کاهش ارتفاع نشان می‌دهد. پیکان سبز روشن شمال غرب سو در جنوب شرقی ایران مربوط به روز هفتم چرخند گونو است که نشان می‌دهد پس از نفوذ فرود شرق دریای مدیترانه (ترکیه و عراق و سوریه)، گونو به سمت ایران حرکت کرده است. در این الگو، تعامل میان پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان و فرود شرق مدیترانه (نفوذ به عرض‌های پایین) باعث می‌شود محور پر ارتفاع به سمت شمال متمایل شده یا تا حدی بریده شود؛ در نتیجه، مسیر چرخندهایی که ابتدا غرب سو یا شمال غرب سو بوده‌اند، به سمت ایران و سواحل شمالی دریای عرب تغییر می‌کند. اگر پر ارتفاع از روی نواحی جنوبی عقب‌نشینی نشینی کند، چرخند به سمت ایران حرکت خواهد کرد. مسیرهای غالب این الگو شامل غرب سو، شمال غرب سو، شمال شرق سو و تعدادی شمال سو است (شکل ۸).




**شکل ۸. الگوی ۷: رنگ آبی: چرخندهای ماه اکتبر، سبز تیره: نوامبر، سبز فسفری: جون، نارنجی: می، بنفش تیره: دسامبر**

**Fig 8. Pattern 7: Blue: October rotations, dark green: November, phosphor green: June, orange: May, dark purple: December**

**الگوی ۸ (نفوذ کم‌ارتفاع عرض‌های میانی و عقب نشینی پر ارتفاع شبه جزیره عربستان)**

الگوی ۸ به طور کامل به چرخند فیان[1] در نوامبر ۲۰۰۹ اختصاص دارد که تنها دو روز (۱۰ و ۱۱ نوامبر) عمر داشته است. در سال ۲۰۰۹ به‌جز این چرخند، تنها دو کم‌فشار یک‌روزه در سواحل گجرات در ماه جون ثبت شده و چرخند حاره‌ای دیگری در حوضه تشکیل نشده است. در این الگو، نفوذ کم‌ارتفاعی با محور مایل از روی دریای خزر به عرض‌های پایین‌تر و رسیدن زبانه‌های آن به افغانستان و پاکستان سبب عقب رانده‌شدن پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان شده است؛ به‌طوری که هسته پر ارتفاع بر روی خود شبه‌جزیره دیده نمی‌شود. در عوض، کنتور ۳۱۱۰ متری در غرب و جنوب دریای عرب و شرق هند ظاهر می‌شود که حدود ۴۰ متر پایین‌تر از ارتفاع معادل در بسیاری از الگوهای قبلی است. این تضعیف و عقب‌نشینی پر ارتفاع، همراه با نفوذ فرود از عرض‌های بالاتر، مسیر چرخند فیان را به سمت شمال شرق باز کرده و موجب بازپیچش آن شده است؛ بنابراین الگوی ۸ نمونه‌ای بارز از نقش تضعیف

1 - PHYAN

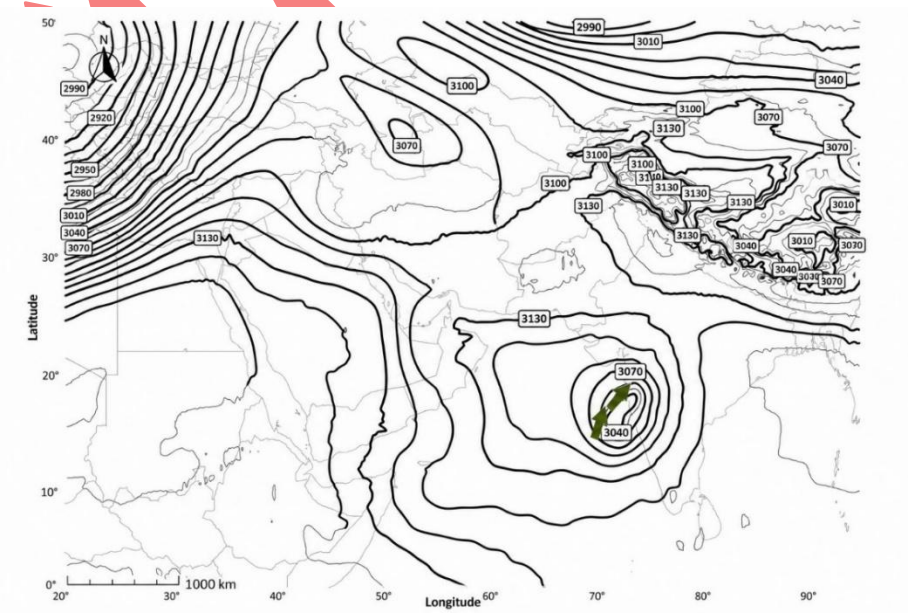
پر ارتفاع عربستان و نفوذ فرودهای عرض‌های میانه در شکل‌گیری مسیر بازپیچشی است. مسیر چرخند بازپیچش به سمت شمال شرق داشته است (شکل ۹).

**الگوی ۹ (نقش مسدود کنندگی پر ارتفاع شبه جزیره عربستان)**

در الگوی ۹، ارتفاع زبانه بیرونی پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان نسبت به الگوهای قبلی (الگوی ۸) کاهش یافته و از ۳۱۷۰ و ۳۱۶۰ متر به ۳۱۳۰ متر رسیده است. این زبانه ۳۱۳۰ متری فقط در غرب حوضه قرار دارد، در حالی که کنتور ۳۱۵۰ متری، نیمه جنوبی ایران و جنوب غرب پاکستان را فرا گرفته و همانند دیواره‌ای، از حرکت چرخند به سمت ایران جلوگیری می‌کند. در مرکز هند، پر ارتفاع ۳۱۳۰ متری دیگری مستقر است که موجب تغییر مسیر چرخندها به سمت پاکستان و غرب هند می‌شود. در نتیجه، یکی از مسیرهای شاخص این الگو، حرکت چرخند پس از برخورد با پر ارتفاع ایران – پاکستان به سمت جنوب غربی است (پیکان آبی منحنی در شکل ۱۰)، و مسیر دیگر، حرکت به سمت شمال شرق و سپس شمال هند (پیکان نارنجی شکسته) است .بدین ترتیب، الگوی ۹ ترکیبی از مسیرهای غرب سو، شمال غرب‌سو و شمال شرق‌سو را نشان می‌دهد (شکل ۱۰).

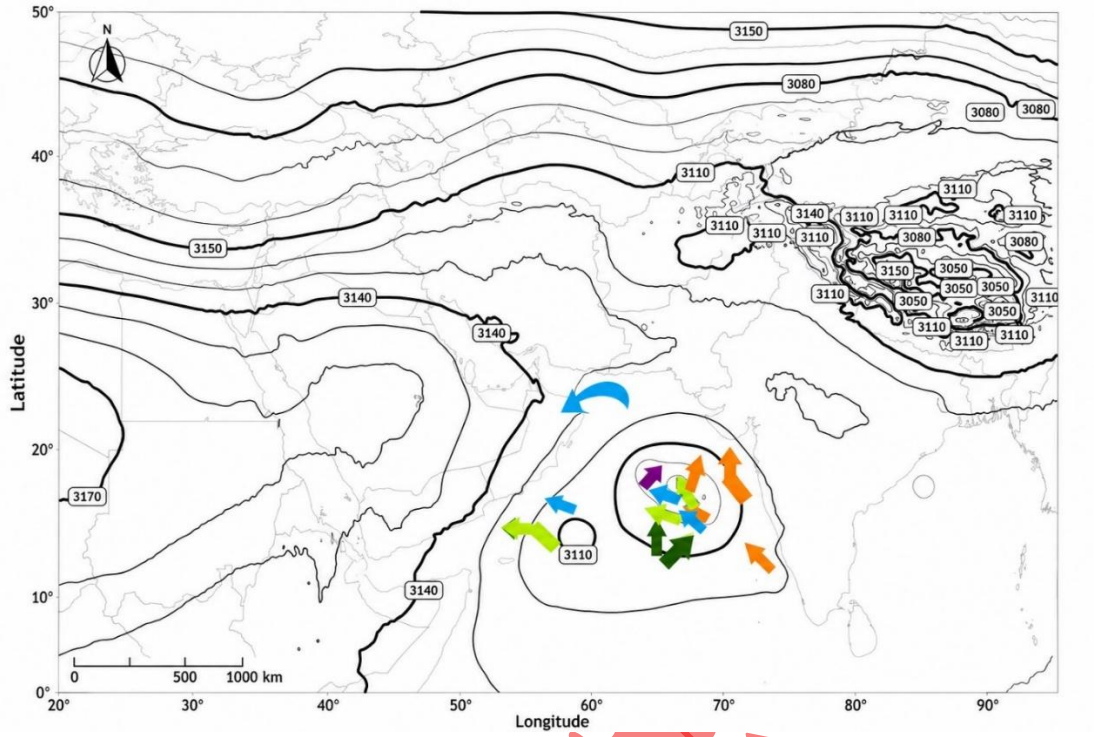
**الگوی ۱۰ (زبانه‌های مداری مسدودکننده پر ارتفاع شبه جزیره عربستان)**

در الگوی ۱۰، زبانه‌های ۳۱۳۰ و ۳۱۲۰ متری پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان به‌شکل زائده‌های مداری، نیمه جنوبی ایران تا مرکز هند را می‌پوشانند. این دو زبانه بخش شمال و غرب حوضه مورد مطالعه را زیر سلطه خود قرار داده و تا مرکز هند انحنا می‌یابند؛ در نتیجه، مسیرهای شمال سو و شمال شرق‌سو برای چرخندها بسته شده و حرکت آن‌ها عمدتاً به سمت غرب و شمال غرب محدود می‌شود. این زبانه‌های مسدودکننده به‌ویژه در شمال دریای عرب باعث می‌شوند چرخندها پس از حرکت اولیه، به سمت غرب و شمال غرب چرخش کنند. بیشتر مسیر چرخندهای این الگو، متأثر از همین زبانه مسدودکننده است. نمونه شاخص، چرخند کیلا (۲۰۱۱) است (نقطه سبز تیره سمت چپ نقشه) که ابتدا توسط پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان مسدود شده، سپس به سمت شمال شرق (دریای عرب)، بعد به سمت شرق و در نهایت به‌سمت جنوب غرب حرکت کرده و مسیری با پیچ‌وخم قابل توجه (نزدیک به ۲۷۰ درجه تغییر جهت) را طی کرده است. در مجموع، مسیرهای غالب این الگو شمال غرب‌سو هستند و یک مورد مسیر تقریباً شمال سو، یک مورد شمال شرق‌سو و یک مورد با چرخش حدود ۲۷۰ درجه نیز دیده می‌شود (شکل ۱۱).



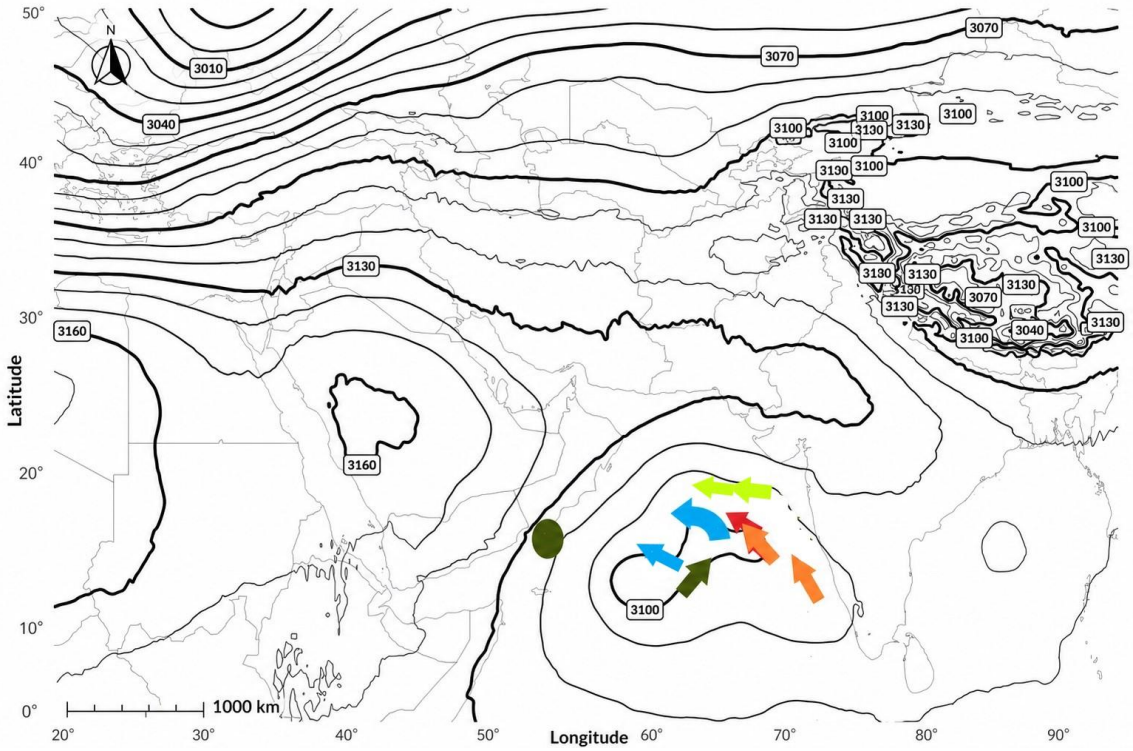

**شکل ۹. الگوی ۸: موقعیت چرخند فیان در ۲ روز (۱۰ و ۱۱ نوامبر) – سبز تیره: نوامبر**

**Fig 9. Pattern 8: Jharkhand Fian position in 2 days (October 10 and 11) – Dark green: November**




شکل ۱۰. الگوی ۹: رنگ آبی: چرخندهای ماه اکتبر، سبز تیره: نوامبر، سبز فسفری: جون، نارنجی: می، بنفش تیره: دسامبر

**Fig 10. Pattern 9: Blue: October rotations, dark green: November, phosphor green: June, orange: May, dark purple: December**




شکل ۱۱. الگوی ۱۰: رنگ آبی: چرخندهای ماه اکتبر، سبز تیره: نوامبر، سبز فسفری: جون، نارنجی: می، قرمز تیره: سپتامبر

**Fig 11. Pattern 10: Blue: October, dark green: November, phosphor green: June, Orange: May, Dark Red: September**

## نتیجه‌گیری

چرخندهای حاره‌ای در حوضه شمال غربی اقیانوس هند، از مهم‌ترین مخاطرات جوی مؤثر بر سواحل جنوبی ایران، عمان، امارات، یمن، پاکستان، و غرب هند به شمار می‌آیند و به سبب همراهی با بادهای شدید، امواج بلند، بارش‌های بسیار سنگین و سیلاب‌های مخرب، تهدید جدی برای زیر ساخت‌های ساحلی، حمل و نقل دریایی، صید و صیادی و سکونتگاه‌های انسانی ایجاد می‌کنند. در سال‌های اخیر وقوع چرخندهایی چون گونو، فت، مکونو، ماها، میغ و چاپالا اهمیت شناخت سازوکارهای همدیدی حاکم بر مسیر حرکت این سامانه‌ها را بیش از پیش آشکار ساخته است. شناخت الگوهای همدیدی کنترل‌کننده مسیر چرخندها، گامی اساسی برای بهبود سامانه‌های پایش و هشدار سریع، کاهش خسارات جانی و مالی و برنامه‌ریزی توسعه پایدار در نواحی ساحلی و فراساحلی این حوضه به‌شمار می‌رود. از این‌رو، پژوهش حاضر کوشیده است با رویکردی اقلیم‌شناختی، تصویری منسجم از الگوهای غالب مسیر چرخندهای حاره‌ای در این منطقه ارائه دهد. در این پژوهش، با استفاده از تحلیل عاملی آرایش S، ده الگوی همدیدی غالب ژئوپتانسیل سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال به دست آمد.

برون‌داد اصلی تحلیل عاملی، شناسایی ده الگوی همدیدی غالب برای ژئوپتانسیل ۷۰۰ هکتوپاسکال است که به‌طور جمعی، تنوع وضعیت‌های دینامیکی مؤثر بر مسیر چرخندهای حاره‌ای حوضه شمال غربی اقیانوس هند را پوشش می‌دهند. بر اساس جدول ۱، الگوهای ۱، ۲، ۳، ۶، ۷ و ۹ بیشترین تعداد روزهای توفانی را به خود اختصاص داده‌اند؛ به‌گونه‌ای که هر یک بین ۱۸ تا ۳۰ روز چرخندی را در طول دوره ۴۱ ساله دارا می‌باشند.

از نظر توزیع زمانی، بیشترین فراوانی روزهای چرخندی در ماه جون (هم‌زمان با آغاز مانسون تابستانه هند) و پس از آن در می و نوامبر مشاهده می‌شود؛ الگوهای ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۷ و ۹ سهم قابل توجهی از رخدادهای جون و می را در بر دارند، در حالی که الگوهای ۱، ۲، ۳ و ۹ برای رخدادهای نوامبر اهمیت بیشتری دارند. ماه‌های می و جون، ماه‌های پیش از فصل مانسون تابستانی هستند و ماه‌های سپتامبر، اکتبر، نوامبر، دسامبر پس از فصل مانسون تابستانی هستند. توزیع زمانی یافته‌های ایت تحقیق با یافته‌های محققین پیشین درباره تمرکز فعالیت چرخندهای حاره‌ای دریای عرب در اواخر بهار و پاییز همخوانی دارد. بیشترین فراوانی روز توفانی مربوط به سال ۲۰۱۹ با ۷ روز توفانی است. از منظر دینامیکی، نتایج نشان می‌دهد که:

۱. قرارگیری و شکل پر ارتفاع جنب‌حاره‌ای شبه‌جزیره عربستان:

مهم‌ترین عامل تعیین مسیر چرخندهای حاره‌ای در منطقه مطالعه است. در الگوهای ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۹ و ۱۰، زبانه‌های مختلف این پر ارتفاع، با ایفای نقشی مسدودکننده، مسیر چرخندها را به سمت غرب، شمال غرب، شمال، شمال شرق یا جنوب غرب هدایت می‌کنند. تقویت زبانه‌های مداری و گسترش آن‌ها بر روی جنوب ایران، پاکستان و هند، راه‌های ورود چرخند به عرض‌های بالاتر را می‌بندد و مسیر آن‌ها را به‌سوی یمن، عمان، جنوب عربستان و شمال سومالی منحرف می‌کند .

۲. نقش فرودهای عرض‌های میانه و سردچاله‌ها:

فرودهای عمیق شرق دریای مدیترانه و شمال دریای سرخ، در صورت نفوذ به عرض‌های پایین‌تر، موجب عقب‌نشینی، مداری‌شدن یا بریده‌شدن پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان و در نتیجه، تغییر مسیر چرخندها به سمت ایران، پاکستان و شمال غرب هند می‌شوند. این سازوکار در الگوهای ۳، ۴، ۷ و ۸ به‌خوبی نمایان است و در مورد چرخندهایی مانند گونو (۲۰۰۷)، فت (۲۰۱۰)، مکونو (۲۰۱۸) و فیان (۲۰۰۹) مشاهده شده است .

۳. کم‌فشارهای حرارتی پاکستان و شمال/شمال غرب هند:

کم‌فشارهای حرارتی پاکستان و شمال و شمال غرب هند، به‌ویژه در الگوهای ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶، به‌عنوان مراکز جذب‌کننده مسیر چرخند عمل می‌کنند و با ترکیب با جریان هدایت‌کننده میانی، باعث حرکت چرخند به سمت پاکستان، گجرات و شمال هند می‌شوند. این کم‌فشارها نقش تعیین‌کننده‌ای در مسیرهای شمال سو و شمال شرق‌سو دارند .

۴. پر ارتفاع غرب هند:

پر ارتفاع غرب هند نیز در برخی الگوها (به‌خصوص ۲، ۳ و ۹) با ایجاد میدان فشار مناسب در شرق حوضه، در ترکیب با کم‌فشارهای پاکستان و شمال هند، نقش قابل‌توجهی در بازپیچش چرخندها به سمت شمال شرق و شرق بازی می‌کند.

۵. جریان‌های محیطی می‌تواند مسیرهای پیچیده، خمیده و حتی سهمی‌شکل برای چرخندها ایجاد کند؛ نمونه بارز آن، مسیر پیچیده چرخند کیلا (۲۰۱۱) در الگوی ۱۰ است که با چرخشی در حدود ۲۷۰ درجه همراه بوده است.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب موقعیت و شدت پر ارتفاع شبه‌جزیره عربستان، فرودهای عرض‌های میانه، کم‌فشارهای حرارتی پاکستان و هند، پر ارتفاع غرب هند، جابه‌جایی تراف مانسون، تعیین‌کننده مسیر چرخندهای حاره‌ای حوضه شمال غربی اقیانوس هند هستند.

با توجه به تحلیل الگوها و مثال‌های موردی، مسیرهای چرخندهای حاره‌ای حوضه شمال غربی اقیانوس هند را می‌توان در شش گروه اصلی خلاصه کرد:

۱- مسیرهای غربی و جنوب غربی به سمت یمن، عمان، جنوب عربستان و شمال سومالی (مسیر مستقیم و تا حدودی مستقیم، نمونه: چرخندهای میغ و چاپالا ۲۰۱۵ – هیکاآ ۲۰۱۹)

۲- مسیرهای شمال غربی به سوی عمان، ایران و امارات (نمونه: گونو و یمین ۲۰۰۷، مکونو ۲۰۱۸)

۳- مسیرهای شمالی به سمت پاکستان و گجرات هند (نمونه: برخی روزهای چرخند می ۲۰۰۴ و روزهای ۳ و ۴ جون چرخند فت ۲۰۱۰)

۴- مسیرهای شمال شرقی به سمت هند و شرق پاکستان (نمونه: موکدا ۲۰۰۶، اوکهی ۲۰۱۷، نیسارگا ۲۰۲۰)

۵- مسیرهای بازپیچشی یا تغییر مسیر (نمونه :فت ۲۰۱۰، ماها ۲۰۱۹)

۶- مسیرهای خاص با پیچ‌وخم و شکل سهمی (نمونه :کیلا ۲۰۱۱، کیاآر ۲۰۱۹)

در انتها پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، الگوهای همدیدی سطوح میانی ۵۰۰ و ۶۰۰ هکتوپاسکال و همچنین بررسی با هم سطوح ۷۰۰ و ۶۰۰ و ۵۰۰، هکتوپاسکال، مورد مطالعه قرار گیرند. نقش الگوهای پیوند از دور در مسیر و حتی تغییرات مسیر چرخندها آشکار شود. شوند تا حساسیت مسیر چرخندها به تغییرات جزئی در موقعیت و شدت پر ارتفاع‌های جنب‌حاره‌ای و فرودهای عرض‌های میانه بررسی گردد.

## منابع


Akhila, R. S., Kuttippurath, J., Rahul, R., & Chakraborty, A. (2022). Genesis and simultaneous occurrences of the super cyclone KYARR and extremely severe cyclone Maha in the Arabian Sea in October 2019. *Natural Hazards*, *113*(2), 1133–1150. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05340-0

Almahri, A. B., Hasanean, H. M., & Labban, A. H. (2026). Spatiotemporal variability of tropical cyclone activity over the Arabian Sea (1982–2021): Tracks, energy metrics, and duration. *Atmosphere*, *17*(4), 389. https://doi.org/10.3390/atmos17040389

Asadi, M., Khurshid Doost, A. M., & Haji-Mohammadi, H. (2021). Investigating the structural nature of tropical cyclone Ashoba over the Arabian Sea. *Geography and Planning*, *25*(76), 15-25. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gp.2021.10831

Das, A. K. (2022). Climatology of tropical cyclones over the North Indian Ocean (NIO) [Paper presentation]. WMO Tropical Cyclone Forecasters' Workshop, New Delhi, India. *World Meteorological Organization*.

Deshpande, M., Singh, V. K., Ganadhi, M. K., Roxy, M. K., Emmanuel, R., & Kumar, U. (2021). Changing status of tropical cyclones over the North Indian Ocean. *Climate Dynamics*, *57*, 3545–3567. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05908-y

Evan, A. T., & Camargo, S. J. (2011). A climatology of Arabian Sea cyclonic storms. *Journal of Climate*, *24*(19), 4975–4990. https://doi.org/10.1175/2011JCLI4100.1

Ghavidel Rahimi, Yousef (2010). Mapping and analysis of atmospheric moisture flow convergence during extremely heavy rainfall caused by tropical storm fat on the coast of Chabahar. *Journal of Human Space Planning and Management*, *15*(2), 101-103. https://doi.org/10.22054/JHS.2010.5464 [In Persian]

Ghavidel Rahimi, Y., Abbasi, I., & Farajzadeh Asl, M. (2015). Investigating the mechanism and hazards of tropical cyclone Nilofar. *Journal of Hazards and Environmental Management*, *2*(1), 21-34. https://doi.org/10.22059/jhsci.2015.53919 [In Persian]
Ghavidel Rahimi, Y., Abbasi, I., & Farajzadeh Asl, M. (2017). Analysis of the characteristics of tropical storms affecting the southern coasts of Iran. *Spatial Planning and Development*, *21*(1),280. https://sid.ir/paper/172026/fa [In Persian]
Hunt, K. M. R., Grimes, D., Jones, S. C., & Ricketts, H. (2021). The influence of the Madden-Julian Oscillation on tropical cyclone activity in the North Indian Ocean. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *147*(700), 3299-3314. https://doi.org/10.1002/qj.4140
Jena, A.K., Behera, M.R., Mohanty, S., Srineash, V. K. (2026) Back-to-back triggering of tropical cyclones during extreme positive IOD event in the Arabian Sea. *Clim Dyn*, 64(36),1. https://doi.org/10.1007/s00382-025-07993-1
Khosravi, M., & Pudineh, M. R. (2010). An analysis of the climatic impacts of tropical cyclone Gono (June 2007) on southeastern Iran. *Physical Geography Research*, *72*, 53–59. https://doi.org/10.1080/02723647.2010.10672019 [In Persian]
Kim, J.-H., Ho, C.-H., Kim, H.-S., & Choi, W. (2012). 2010 Western North Pacific typhoon season: Seasonal overview and forecast using a track-pattern-based model. *Weather and Forecasting*, *27*(3), 730-743. https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00109.1
Kumar A, Chakraborty A, Sagar AK. (2024). Analysis of the Bay of Bengal cyclone and its rejuvenation in the Arabian Sea after passing over peninsular India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *15*(1), 2. https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2433110
Kumar, S., Kant, S., & Kumar, A. (2025). Analysis of tropical cyclone eye over the North Indian Ocean during 2013–2023. *Tropical Cyclone Research and Review*,*14*(3), 287-296. https://doi.org/10.1016/j.tcrr.2025.08.003
Lashkari, H., & Kaykhosravi, G. (2010). Synoptic analysis of Hurricane Gono and its effects on southeastern Iran. *Journal of Geography and Environmental Planning*, *1*(3), 39. http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.356775.1007755. [In Persian]
Li, Z., Yu, W., Wang, L., Sun, J., & He, Y. (2021). Climatology and changes in tropical cyclone tracks over the North Indian Ocean. *Journal of Climate, 34*(5), 1877-1899. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0461.1
Mohammadi, H. (2011). Atmospheric hazards. Tehran: Tehran University Press, 33 p. ISBN 978-964-371-593-5. [In Persian]
Naglakshmi, K., Joseph, S., Sripathi, G., Raju, A. D., Mohapatra, M., Suneetha, P., Kumar, S. V. J., Kant, S., & Babji, P. Suneetha, S.V.J. Kumar, Shashi Kant, Babji S.H. (2025). Key factors behind super cyclone Gonu (1–7 June 2007) over the Arabian Sea. *MAUSAM, 76*(4), 1035–1046. https://doi.org/10.54302/mausam.v76i4.7095
Najah, A., van der Merwe, R & ,.Al Shehhi, M. R. (2024). Review of tropical cyclones impacting the Western Arabian Sea and Oman .*International Journal of Climatology* ,*65*(3) ,21-39. https://doi.org/10.1080/1755876X.2024.2444753
Pradhan, P., Dutta, R., Zhang, W., Swain, B., Koppa, A., Kumar, R., Karmakar, S., & Hari, V. (2026). North Atlantic Forcing on the Post-monsoon Arabian Sea Cyclones. *Earth Syst Environ 10*, 4655–4670. https://doi.org/10.1007/s41748-025-00875-w
Paul, D., Panda, J., Mandke, S., Routray, A., & Zhu, Y.-J. (2025). Investigating concurrent cyclonic disturbances in the North Indian Ocean and associated large-scale atmospheric influences. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 64*, 1271–1290. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-24-0148.1
Qaffarian, P., Pouratashi, M., Davari Panah, F., & Hennon, C. C. (2011). Verification of WRF model in forecasting tropical storms. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *45*(3), 445-453. https://doi.org/10.1007/s13799-017-0234-z [In Persian]
Rao, V. B., Mohan, S. T., Bhargavi, V. S. L., Govardhan, D., Srinivas, C. V., & Prasad, V. S. (2025). Physics of North Indian Ocean tropical cyclones. *Scientific Reports*, *15*, 1-20. https://doi.org/10.1038/s41598-025-17989-w
Salmanian, F., et al. (2012). Synoptic analysis of the emergence and spread of tropical cyclone phat in southwest Asia. *Climatological Research*, *3*(11), 87. https://doi.org/10.22034/jcr.2012.76184
Shoja, F., Khosravi, M., & Shamsipour, A. A. (2020). Analysis of synoptic conditions of tropical cyclones Sagar and Mekunu in the Arabian Sea. *SEPEHR Scientific Journal*, *29*(113), 93-112. https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.40473 [In Persian]
Simpkins G. (2021). Arabian Sea cyclone changes. *Nature Reviews Earth & Environment*, *2*(5) ,88. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00210-7
Singh, V. K., Roxy, M. K., & Deshpande, M. (2020). The unusually long track and rapid intensification of very severe cyclone OCKHI. *Current Science*, *119*(5), 771–779. https://doi.org/10.18520/cs/v119/i5/771-779
Smith, J., Khan, A & ,.Sharma, R. (2022). Recent shift in the tropical cyclone tracks over the Arabian Sea and its implications for coastal vulnerability .*Frontiers in Earth Science ,10* (2) ,115-130.

https://doi.org/10.3389/feart.2022.123456
Vigh, J. L., Knaff, J. A., & Schubert, W. H. (2012). A climatology of hurricane eye formation. *Monthly Weather Review*, *140*(5), 1661–1677. https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00108.1
WMO (2017). The Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting website is sponsored by the World Meteorological Organization. World Meteorological Organization, 2017. CH-1211 Geneva2, Switzerland. ISBN 978-92-63-11194-4
https://wmo.int/topics/tropical-cyclone (2026)
www.IDM.com (2021)

نسخه پیش از انتشار