

Synoptic–Thermodynamic Analysis and Spatial Domain of Tropical Cyclones in Iran

Hasan Lashkari¹  , Mohammad Naji² , Zainab Mohammadi³ , Soraya Ahlollah⁴ 

1. (Corresponding author) *Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of shahid beheshti, Tehran, Iran.*

Email: h-Lashkari@sbu.ac.ir

2. *Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of shahid beheshti, Tehran, Iran.*

Email: mo_naji@sbu.ac.ir

3. *Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of shahid beheshti, Tehran, Iran.*

Email: z_mohammadi@sbu.ac.ir

4. *Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of shahid beheshti, Tehran, Iran.*

Email: soraya.ahlollah.21@gmail.com

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:

Received:
25 October 2025
Revised:
27 January 2026
Accepted:
11 March 2026
Available online:
5 April 2026

Keywords:

*Area of Influence,
Heavy
Precipitation,
Skew-T,
Southeastern
Region,
TRMM Satellite.*

ABSTRACT

Tropical cyclones, as thermal low-pressure systems, cause severe rainfall and extensive damage across the coastal and inland regions of southeastern Iran. This study aims to identify and analyze the spatiotemporal patterns of tropical cyclones affecting the region during the period 1986 to 2019. Daily precipitation data from 73 synoptic stations and associated weather phenomenon codes were analyzed across three 11-year solar cycles to detect cyclone-induced events with precipitation ≥ 20 mm recorded at ≥ 3 stations. To gain deeper insights into these cyclones, Skew-T diagrams and TRMM satellite data were also employed. During this period, 26 significant events with varying frequency patterns and spatial distributions were identified. The results reveal that cyclones are primarily active in May, June, and October, with the intensity and spatial extent of their impacts exhibiting seasonal variations. In some months, despite fewer cyclone occurrences, the associated rainfall coverage and impacts are more extensive. Synoptic pattern analysis indicates a broad field of specific humidity in the eastern sector of the cyclone, extending throughout the troposphere. In the mid-troposphere, the northward expansion of the Arabian anticyclonic ridge induces cold advection on the western flank of the cyclone, along with sharp thermal and pressure gradients. Additionally, strong negative omega values at the 700 and 500 hPa levels highlight the intense dynamical processes within the cyclone structure. Tropical cyclones in southeastern Iran are characterized by intense rainfall and variable seasonal distribution, with the interplay of moisture, atmospheric instability, and synoptic-scale structures playing a key role in their intensification.

Cite this article: Lashkari, H., Naji, M., Mohammadi, Z., & Ahlollah, S. (2026). Synoptic–Thermodynamic Analysis and Spatial Domain of Tropical Cyclones in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 58 (1), 19-37.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.397644.1007892>



Extended Abstract

Introduction

Climatic hazards, particularly tropical cyclones, cause substantial human and economic losses annually across the globe and are considered among the most significant environmental threats due to their profound impacts. These systems, often accompanied by extreme rainfall, intense winds, and flash flooding, exert severe influence on both coastal and inland regions. In recent years, southeastern Iran notably the provinces of Sistan and Baluchestan, Hormozgan, Kerman, and parts of South Khorasan has repeatedly been affected by such cyclones, resulting in considerable damage to infrastructure, water resources, and the livelihoods of local communities. In this context, a comprehensive and precise analysis of the genesis, development, and interaction of tropical cyclones with synoptic patterns and thermodynamic characteristics is crucial for enhancing forecasting capabilities, reducing vulnerability, and formulating effective disaster management strategies. The identification of impactful events in southeastern Iran, along with the analysis of their spatio-temporal patterns and delineation of their zones of influence, represents a vital step toward a deeper understanding of the dynamics of this climatic hazard within the framework of forecasting systems and risk management policymaking.

Methodology

To assess the extent of Iran's vulnerability to tropical cyclones, daily precipitation data from 73 synoptic stations located in cyclone-prone provinces (Sistan and Baluchestan, Kerman, Hormozgan, Fars, Bushehr, Khuzestan, and South Khorasan) were analyzed over a 33-year period (1986–2019), corresponding to three 11-year solar cycles. Stations with complete data for each cycle were examined separately. To identify tropical cyclone events, days with precipitation exceeding 20 mm at a minimum of three stations, accompanied by weather codes 91–99, were classified as storm days. In total, 26 events were identified, among which two prominent cases—June 6–8, 2007, and June 4–5,

2010—were selected for synoptic and thermodynamic analysis.

Atmospheric variables including geopotential height, specific humidity, omega (vertical velocity), and wind components were retrieved from the NCEP/NCAR reanalysis dataset and analyzed using GrADS software. To examine the vertical structure of the atmosphere during these events, Skew-T diagrams for the Muscat Airport station as the closest representative profile to the storm core were utilized. Additionally, to visualize the spatial extent and intensity of precipitation, TRMM satellite data with a spatial resolution of 0.25 degrees and high correlation with ground-based observations ($r > 0.8$) were employed, obtained from the Giovanni data portal.

Results and discussion

The findings of this study indicate that over the 33-year period, tropical cyclones originating in the Arabian Sea and the northern Indian Ocean exerted a direct and variable influence on the precipitation patterns of southeastern Iran. The intensity and nature of this impact are contingent upon the timing of the event, associated synoptic conditions, and the dynamic–thermodynamic structure of the cyclone. The seasonal frequency of storms follows a discernible pattern from May to October, with a peak in May, a decline through July, and a subsequent increase in August and October, while no events were recorded in September—a trend closely linked to the gradual transition of synoptic systems during the monsoon period. Notably, a lower frequency of storms does not necessarily imply a reduced spatial impact. For instance, in July, a single cyclone may influence a broad geographical area. A case study analysis of the June 2007 and June 2010 cyclones revealed that the 2007 event, characterized by a strong cyclonic structure, abundant moisture, and extensive upper-level divergence, resulted in intense and concentrated rainfall across southeastern Iran—exceeding 300 mm at some stations. The Skew-T diagram from Muscat Airport confirmed the presence of a highly unstable troposphere. In contrast, the 2010 cyclone exhibited a different interaction with prevailing synoptic systems, particularly

between a migrating anticyclone and northern cold advection versus southern warm advection, which led to the intensification of the pressure gradient, high winds, and convective rainfall, albeit with a more limited inland penetration. A comparative assessment of these two events suggests that the extent and intensity of tropical cyclone rainfall are not solely determined by internal cyclone characteristics, but are strongly influenced by the synoptic background and the degree of synergy with incoming moisture. These findings are consistent with previous studies that underscore the importance of cyclone interaction with surrounding atmospheric patterns and moisture advection in shaping the distribution and intensity of extreme precipitation events.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that tropical cyclones originating in the Arabian Sea and northern Indian Ocean play a significant role in generating intense and localized precipitation in southeastern Iran. The magnitude and spatial extent of their impacts are highly dependent on the timing of occurrence, the dynamic–thermodynamic structure of the cyclone, and the surrounding synoptic atmospheric conditions. The seasonal trends and spatiotemporal variability of these storms reflect the complex interplay between large-scale systems and internal convective processes. The analysis of two major events in June 2007 and June 2010 underscores that extreme rainfall is not merely a function of a cyclone’s dynamic strength,

but is also heavily influenced by the amount of moisture advection and the nature of its interaction with synoptic-scale flows. These interactions enhance thermodynamic instability, amplify convective energy, and ultimately result in very intense rainfall and sudden flash floods. Therefore, a deeper understanding of the interactive mechanisms between tropical cyclones and large-scale atmospheric patterns is crucial for improving forecasting capabilities and climate hazard management in the region. The present results, consistent with previous research, highlight the critical role of synoptic conditions and moisture transport, and may serve as a foundation for evidence-based policymaking in climate disaster risk reduction and management.

Funding

There is no funding support.

Authors’ Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

واکاوی همدیدی-ترمودینامیک و قلمرو فضایی توفان‌های حاره‌ای در کشور ایران

حسن لشکری^۱ ✉، محمد ناجی^۲ , زینب محمدی^۳ , ثریا اهل الله^۴ ۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: h_Lashkari@sbu.ac.ir۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: mo_naji@sbu.ac.ir۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: z_mohammadi@sbu.ac.ir۴- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: soraya.ahlollah.21@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

توفان‌های حاره‌ای به‌عنوان سامانه‌های کم‌فشار حرارتی، با بارش‌های شدید آسیب‌های گسترده‌ای به مناطق ساحلی و داخلی جنوب شرق ایران وارد می‌کنند. هدف این مطالعه، شناسایی و تحلیل الگوهای فضایی-زمانی توفان‌های حاره‌ای مؤثر در بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹ است. داده‌های بارش روزانه ۷۳ ایستگاه سینوپتیک و کدهای پدیده‌های جوی مرتبط طی سه‌چرخه ۱۱ ساله تحلیل شد تا رخداد‌های ناشی از توفان‌های حاره‌ای با بارش ≤ 20 میلی‌متر در ≤ 3 ایستگاه شناسایی شوند. همچنین جهت درک عمیق‌تر از توفان‌های حاره‌ای از نمودار اسکیتوی و داده‌های ماهواره TRMM استفاده شد. در این بازه، ۲۶ رخداد شاخص با الگوی فراوانی و پراکنش مکانی متنوع استخراج شد. نتایج نشان داد که توفان‌ها عمدتاً در ماه‌های مه، ژوئن و اکتبر فعال بوده و شدت و وسعت اثر آن‌ها به‌طور فصلی تغییر می‌کند؛ به‌گونه‌ای که در برخی ماه‌ها، اگرچه تعداد توفان‌ها کمتر است، اما گستره تأثیر و بارش‌های ناشی از آن‌ها وسیع‌تر است. نتایج الگوهای همدیدی نشان می‌دهند که میدان نم ویژه گسترده در ضلع شرقی چرخند سراسر وردسپهر را در برمی‌گیرد. در ترازهای میانی، گسترش شمال سوی پشته عربستان جریانات سرد غرب چرخند و شیو شدید دما و فشار را القا می‌کند. همچنین، امگای منفی قوی در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال بر دینامیک قوی ساختار توفان دلالت دارد. توفان‌های حاره‌ای جنوب شرق ایران با بارش‌های شدید و پراکندگی فصلی متغیر همراه‌اند و تعامل رطوبت، ناپایداری و ساختار همدیدی، نقش اصلی در تقویت آن‌ها دارد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۸/۰۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۲/۲۰

تاریخ چاپ:

۱۴۰۵/۰۱/۱۶

واژگان کلیدی:

اسکیتوی،

بارش شدید،

جنوب شرق،

ماهواره

TRMM

حوزه نفوذ.

استناد: لشکری، حسن؛ ناجی، محمد؛ محمدی، زینب و اهل الله، ثریا. (۱۴۰۵). واکاوی همدیدی-ترمودینامیک و قلمرو فضایی توفان‌های حاره‌ای در کشور ایران. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۸ (۱)، ۳۷-۱۹.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.387445.1007862>

مقدمه

مخاطرات طبیعی هر ساله موجب تلفات انسانی گسترده‌ای در مناطق مختلف جهان می‌شوند، که بخش قابل توجهی از این تلفات ناشی از مخاطرات مرتبط با فرآیندهای اقلیمی و جوی است (لشکری و همکاران، ۱۴۰۳: ۹۰). مخاطرات اقلیمی در میان مخاطرات محیطی، از اهمیت و اثرگذاری بیشتری برخوردارند (قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۲). از انواع مخاطرات آب‌وهوایی می‌توان توفان‌های تندری، حاره‌ای، سیل منطقه‌ای و... را نام برد (لشکری و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۳۶). چرخندهای حاره‌ای، سامانه‌های کم‌فشار با هسته‌ای گرم هستند که بر روی آب‌های گرم نواحی حاره و جنب‌حاره‌ای شکل می‌گیرند (Roy & Kovordányi, 2012: 41). این سامانه‌ها با تولید بادهای شدید، بارش‌های سنگین و رواناب‌های ناگهانی، مناطق ساحلی را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهند (Singh & Tyagi, 2019: 37). گمان می‌رود در سال‌های اخیر به خاطر گرمایش جهانی، ویژگی‌های زمانی و مکانی خصوصاً فراوانی و شدت آن‌ها در مناطق مختلف تغییر یافته و میل به تشدید یافته‌اند (قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۸).

فرآیند شکل‌گیری چرخندهای حاره‌ای به‌طور معمول در دو مرحله متوالی صورت می‌گیرد. در مرحله نخست، یک ناحیه کم‌فشار حاره‌ای در نتیجه تمرکز و سازمان‌یافتگی مجموعه‌ای از سلول‌های همرفتی در جو فوقانی بر فراز آب‌های گرم پدید می‌آید. در مرحله دوم، با تداوم فرایندهای همرفتی و تقویت واگرایی در سطوح فوقانی، فشار مرکزی این سامانه به‌تدریج کاهش می‌یابد و در پی آن، سرعت و سازمان‌یافتگی بادهای چرخشی پیرامون هسته کم‌فشار افزایش می‌یابد تا نهایتاً سامانه به یک چرخند حاره‌ای بالغ تبدیل شود (Raymond & Sessions, 2007: 1; Emanuel, 2003: 76). از مهم‌ترین مناطق شکل‌گیری توفان‌های حاره‌ای، می‌توان به اقیانوس هند و دریای عرب اشاره کرد. این سامانه‌های کم‌فشار گرم هسته، عمدتاً در دوره‌های زمانی مشخصی از سال که با چرخه‌های موسمی (مانسون) مرتبط هستند، فعال می‌شوند. توفان‌های حاره‌ای در این بازه‌های زمانی با تولید بارش‌های بسیار شدید تا حد بارش‌های فوق سنگین، منجر به وقوع سیلاب‌های گسترده و خسارت‌بار در مناطق ساحلی و درونی می‌شوند (قویدل رحیمی، ۱۳۹۰: ۱۰۲).

جنوب شرق ایران، به‌ویژه استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان، کرمان و بخش‌هایی از خراسان جنوبی، در برخی موارد نادر، تحت تأثیر غیرمستقیم چرخندهای حاره‌ای منشأ گرفته از اقیانوس هند و دریای عرب قرار گرفته‌اند. از مهم‌ترین این موارد می‌توان به تأثیرات غیرمستقیم چرخندهای گونو، فت، شاهین و... اشاره کرد. این توفان‌ها با همراهی بارش‌های سنگین تا فوق سنگین، وزش بادهای شدید، طغیان رودخانه‌ها و رخداد سیلاب‌های ناگهانی، آسیب‌های جدی و جبران‌ناپذیری را به زیرساخت‌های حیاتی، منابع آب و معیشت ساکنان این مناطق وارد کرده‌اند. با توجه به نقش فزاینده تغییرات اقلیمی در افزایش شدت و گستره اثرگذاری چرخندهای حاره‌ای، بررسی علمی و دقیق نحوه تأثیرگذاری این پدیده‌ها بر الگوهای هم‌دیدگی و پیامدهای اقلیمی آن‌ها در نواحی جنوب شرق ایران، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر یافته است. در این راستا، شناسایی توفان‌های وارد شده به پهنه جنوب شرق ایران، تحلیل الگوهای فضایی-زمانی آن‌ها و تعیین نواحی تحت تأثیر، نه تنها می‌تواند در فهم بهتر دینامیک این سامانه‌ها مؤثر باشد، بلکه نقشی کلیدی در ارتقاء سامانه‌های پیش‌بینی، کاهش آسیب‌پذیری و تدوین راهبردهای مدیریت بحران ایفا خواهد کرد.

توفان‌های حاره‌ای به دلیل شدت، گستره تأثیر و پیامدهای مخرب، همواره مورد توجه پژوهشگران علوم جوی بوده‌اند. مطالعات بسیاری به بررسی فرآیندهای شکل‌گیری، ساختار دینامیکی و نقش سامانه‌های هم‌دیدگی در گسترش این پدیده‌ها اختصاص یافته است. گری در یک مطالعه مشاهده‌ای جهانی نشان داد که بیشتر توفان‌های حاره‌ای در عرض‌های کمتر از ۲۰ درجه و در نواحی مجاور ناوه استوایی شکل می‌گیرند؛ جایی که برش قائم باد کمینه یا نزدیک به صفر است (Gray, 1968: 669). امانوئل با معرفی شاخص «کل انرژی تلف‌شده» توفان‌های حاره‌ای نشان داد که شدت

و مدت عمر توفان‌ها از اواسط دهه ۱۹۷۰ به‌طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است. این روند با افزایش دمای سطح دریای گرمسیری همبستگی دارد و نشان‌دهنده احتمال افزایش خسارات ناشی از توفان‌ها در آینده است (Emanuel, 2005:686). کلاگان خطرپذیری شهر کیرنز استرالیا در برابر توفان‌های حاره‌ای موردبررسی قرار داد. نتایج نشان داد که این منطقه به‌طور منظم در معرض توفان‌های شدید، سیلاب و طغیان دریا قرار دارد و فراوانی آن‌ها در دوره‌های لائینا افزایش می‌یابد. پژوهش تأکید می‌کند که تغییرات سامانه‌های همدیدی نقش مهمی در تشکیل و تقویت توفان‌ها دارند و شناسایی این الگوها برای بهبود پیش‌بینی‌ها ضروری است (Callaghan, 2003: 129). چن و همکاران نشان دادند که شدت و توزیع بارش‌های شدید ناشی از توفان‌های حاره‌ای فرود آمده به خشکی (LTCs) به عواملی مانند انتقال رطوبت، گذار برون‌حاره‌ای، برهم‌کنش با موسمی‌ها، ناهم‌واری زمین و تعامل با سامانه‌های همدیدی مانند ناو‌های غربی و جبهه می‌یو وابسته است (Chen et al, 2010:1). زانگ و همکاران ویژگی‌های تغییرپذیر خسارات ناشی از خشک‌سالی، سیل و توفان‌های حاره‌ای را موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد سیلاب‌ها عمدتاً در مناطق پست و پرجمعیت رخ داده و نقش توفان‌های حاره‌ای در ایجاد سیلاب، باد شدید و طغیان دریا، به‌عنوان محرک‌های اصلی خسارات اقتصادی، بسیار پررنگ گزارش شده است (Zhang et al, 2011: 267). نتایج کوسین و همکاران نشان دادند که طی سه دهه گذشته، مکان بیشینه شدت توفان‌های حاره‌ای به‌طور معناداری به عرض‌های بالاتر منتقل شده است. این روند انتقال در هر دو نیم‌کره شمالی و جنوبی با نرخ حدود ۵۳ تا ۶۲ کیلومتر در هر دهه مشاهده شده و با نرخ گسترش مناطق حاره‌ای طی همین دوره همخوانی دارد (Kossin et al., 2014:349). شی و همکاران در مطالعه‌ای با هدف بررسی دلایل افزایش بی‌سابقه فراوانی توفان‌های حاره‌ای در غرب اقیانوس آرام شمالی در نوامبر ۲۰۱۹، دریافتند که در این بازه زمانی، عوامل دینامیکی نظیر افزایش چرخندگی در ترازهای پایین جو و صعود قوی درون جو، نقش مؤثرتری نسبت به عوامل ترمودینامیک در شکل‌گیری این توفان‌ها داشته‌اند (Shi et al, 2021:1). قاسمی‌فر و همکاران ساختار فیزیکی ۱۱ توفان حاره‌ای که بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۲ به جنوب شرق ایران برخورد کردند را موردبررسی قرار داد. نتایج نشان داد بیشترین رطوبت و حرکت صعودی هوا در جنوب شرقی توفان‌ها متمرکز بوده و بیشترین نرخ بارش کل و بارش همرفتی در این منطقه رخ داده است. (Ghasemifar et al, 2024:1).

در ایران نیز لشکری و کیخسروی (۱۳۸۹) در پژوهشی به تحلیل سینوپتیکی توفان حاره‌ای گونو و تأثیرات آن بر نواحی جنوب شرقی ایران پرداختند. نتایج نشان داد که در تراز سطح دریا، واچرخند شمال اروپا به دو شاخه تقسیم شده است: یکی بر فراز دریای خزر که زبانه جنوبی آن بخش وسیعی از ایران را تحت تأثیر قرار داده و موجب تداوم نفوذ هوای سرد به کشور شده است؛ و دیگری بر شرق دریای مدیترانه که تا سودان امتداد یافته و نقش مؤثری در تقویت سامانه چرخندی مرتبط با توفان گونو ایفا کرده است. خسروی و پودینه (۱۳۸۹) تأثیرات اقلیمی سیکلون حاره‌ای گونو در خرداد ۱۳۸۶ را بر جنوب شرق ایران بررسی کردند. نتایج نشان داد با تقویت توفان، محور پرفشار جنب‌حاره‌ای در ترازهای پایین به شرق و در ترازهای میانی به شمال جابه‌جاشده و این وضعیت موجب تشدید همرفت و بارش‌های سنگین، از جمله ۱۴۴ میلی‌متر در نیک شهر شده است. حبیبی و بهرامی (۱۳۹۵) در پژوهشی به تحلیل همدیدی توفان حاره‌ای گونو و تأثیر آن بر جنوب شرق ایران پرداختند. یافته‌ها نشان داد که تضعیف زبانه پرفشار اسکاندیناوی منجر به گسترش قطر چشم توفان شده و با استقرار سامانه در نیمه جنوبی ایران، فراهم شدن شرایط برای تغذیه رطوبتی از دریای عمان و خلیج فارس موجب تشدید و تقویت توفان گردیده است. شجاع و همکاران (۱۳۹۵) به مقایسه تطبیقی چرخندهای حاره‌ای در شمال دریای عرب و دریای عمان طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ پرداختند. نتایج نشان داد که در لحظه تشکیل، مسیر اغلب چرخندها به‌جز گونو به سمت شمال غرب بوده و بین دمای سطح دریا و فشار سطحی، همبستگی

منفی قوی وجود دارد. همچنین، برخلاف گونو، در سایر چرخندها زمان تغییر مسیر با زمان رسیدن به اوج شدت یکسان نیست. علی‌محمدی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی زمان و نحوه شکل‌گیری توفان‌های حاره‌ای در منطقه شمال اقیانوس هند پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که بیشترین فراوانی توفان‌ها به ترتیب در ماه‌های آبان، خرداد و مهر رخ داده است، درحالی‌که در ماه‌های فروردین، مرداد، شهریور، بهمن و اسفند هیچ توفانی در این منطقه تشکیل نشده است. فیروزی‌مهر و همکاران (۱۴۰۱) با بهره‌گیری از روش‌های داده‌کاوی مکانی به شناسایی الگوهای حرکتی توفان‌های حاره‌ای پرداختند. نتایج تحقیق بیانگر آن است که توزیع مکانی توفان‌ها از الگوی خوشه‌ای پیروی می‌کند و رخداد آن‌ها تصادفی نیست، بلکه از الگوهای مشخص فضایی و زمانی تبعیت می‌نماید.

با مروری بر پیشینه پژوهش‌ها، مشخص می‌شود که اغلب مطالعات صورت گرفته پیرامون توفان‌های حاره‌ای، عمدتاً به صورت موردی و محدود به تحلیل یک یا چند رویداد شاخص نظیر گونو و فت بوده‌اند. این تحقیقات غالباً بر جنبه‌های زمانی، شدت و فصل وقوع توفان‌ها تمرکز داشته‌اند و کمتر به تحلیل جامع و پیوسته از ساختارهای همیدی مؤثر، شرایط زمینه‌ساز، نحوه گسترش فضایی تأثیرات، و تنوع پیامدهای اقلیمی ناشی از این پدیده‌ها در گستره سرزمینی ایران پرداخته‌اند. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در دو بعد اساسی قابل‌طرح است: نخست، دوره زمانی نسبتاً بلندمدت موردبررسی (۳۳ سال) که امکان تحلیل روندها و فراوانی نسبی رخدادها را فراهم می‌سازد؛ و دوم، رویکرد تلفیقی و تحلیل محور پژوهش، که با تکیه بر داده‌های همیدی و تصاویر ماهواره‌ای، به واکاوی الگوهای فضایی-زمانی تأثیرگذاری توفان‌های حاره‌ای بر نواحی مختلف کشور می‌پردازد. درواقع با توجه به کمبود پوشش ایستگاهی در مناطق جنوب شرقی کشور (نظیر سواحل مکران)، در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای برای استخراج و تحلیل دقیق‌تر گسترش فضایی و شدت پیامدها بهره گرفته شده تا شناخت واقع‌گرایانه‌تری از تأثیرات این پدیده‌ها حاصل شود.

روش پژوهش

به‌منظور بررسی و شناسایی میزان تأثیرپذیری ایران از توفان‌های حاره‌ای، تمامی نواحی مستعد در معرض اثر این سامانه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این راستا، کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان، هرمزگان، فارس، بوشهر، خوزستان و خراسان جنوبی به‌عنوان استان‌هایی که از نظر موقعیت جغرافیایی در مسیر یا در حاشیه مسیر احتمالی توفان‌های حاره‌ای قرار دارند در فرآیند تحلیل و ارزیابی داده‌ها لحاظ شدند. اغلب پژوهش‌های پیشین (قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ قودیل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Ghasemifar et al., 2024) تمرکز اصلی خود را بر سواحل جنوبی و جنوب شرقی ایران معطوف داشته‌اند. در پژوهش حاضر، با هدف تعیین قلمرو نفوذ توفان‌های حاره‌ای طی یک دوره ۳۳ ساله، استان‌های واقع در نیمه جنوبی کشور که به‌طور بالقوه در معرض تأثیر این پدیده‌ها قرار دارند، به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب گردیدند تا مشخص شود این مناطق تا چه میزان تحت تأثیر نفوذ توفان‌های حاره‌ای قرار گرفته‌اند. دوره آماری این پژوهش به‌گونه‌ای تعیین شده است که با سه‌چرخه کامل فعالیت خورشیدی ۱۱ ساله (چرخه‌های ۲۲ تا ۲۴) مطابقت داشته باشد؛ ازاین‌رو، بازه زمانی ۳۳ ساله بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹ به‌عنوان مبنای تحلیل انتخاب شده است. این بازه زمانی، ضمن فراهم‌سازی پوشش بلندمدت و جامع برای بررسی روندهای اقلیمی، امکان تحلیل اثرات احتمالی تغییرات ناشی از چرخه‌های خورشیدی بر فراوانی و شدت توفان‌های حاره‌ای را نیز فراهم می‌سازد.

با توجه به هدف اصلی پژوهش که شناسایی پهنه اثر توفان‌های حاره‌ای در ایران است، و به منظور بهره‌گیری از بیشترین تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در فرآیند استخراج داده‌های بارشی و تعیین حدود مکانی اثر توفان‌ها، دوره آماری پژوهش به سه چرخه خورشیدی مجزا تفکیک گردید. بر این اساس، در هر چرخه زمانی، تنها ایستگاه‌هایی مورد استفاده قرار گرفتند که دارای داده‌های کامل برای کل بازه آن چرخه بودند. به عنوان نمونه، برای چرخه اول (۱۹۸۶-۱۹۹۶)، کلیه ایستگاه‌هایی که در این بازه آماری کامل داشتند در تحلیل مشارکت داده شدند؛ همین رویکرد برای چرخه‌های بعدی نیز به کار گرفته شد. از این رو، تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده در هر چرخه ممکن است با چرخه پیشین متفاوت بوده و در برخی موارد افزایش یافته باشد. در مجموع، برای تحلیل نهایی و ترسیم پهنه اثر توفان‌های حاره‌ای، از داده‌های روزانه بارش ۷۳ ایستگاه سینوپتیک استفاده شد. این داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده و در مرحله شناسایی روزهای توفانی، کدهای پدیده جوی ۹۱ تا ۹۹ که شامل رخدادهایی نظیر رعدوبرق، رگبار، و بارش‌های شدید می‌باشند به عنوان شاخص‌های تشخیص روزهای مرتبط با فعالیت توفان‌های حاره‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. در چارچوب این پژوهش که بر بررسی توفان‌های منشأ حاره‌ای متمرکز است، داده‌های بارش ماه‌های می، ژوئن، ژوئیه، آگوست، سپتامبر و اکتبر به عنوان فصل‌های اصلی فعالیت سامانه‌های حاره‌ای در نیمکره شمالی - برای هر دوره ۱۱ ساله به صورت جداگانه استخراج گردید. به منظور شناسایی رخدادهای محتمل ناشی از توفان‌های حاره‌ای، روزهایی به عنوان نمونه انتخاب شدند که در آن‌ها میزان بارش ثبت شده در حداقل یک ایستگاه بیش از ۲۰ میلی‌متر بوده و این رخداد به طور هم‌زمان در دست کم سه ایستگاه مشاهده شده باشد. در این حالت، با فرض تأثیر یک سامانه حاره‌ای، روز مذکور به عنوان روز دارای پتانسیل وقوع توفان شناسایی و مورد بررسی قرار گرفت. بررسی مجموعه توفان‌های حاره‌ای رخ داده در دوره آماری نشان داد که به دلیل محدود بودن تعداد ایستگاه‌های منطقه و فاصله زیاد آن‌ها از یکدیگر (مانند چابهار، جاسک و میناب یا چابهار، بافت و میناب)، ثبت بارش هم‌زمان در سه ایستگاه به عنوان نشانه‌ای از نفوذ توفان به داخل منطقه در نظر گرفته می‌شود. در مقابل، وقوع بارش تنها در یک ایستگاه اغلب ناشی از فعالیت سامانه‌های موسمی بوده و ارتباطی با توفان حاره‌ای نداشته است. در چنین شرایطی، مقدار بارش به ندرت به بیش از ۲۰ میلی‌متر می‌رسید. شایان ذکر است که مطالعه اسفندیاری و لشکری (۲۰۲۰) در بررسی بارش‌های حدی برای شناسایی رودخانه‌های جوی، آستانه ۲۰ میلی‌متر را به عنوان معیار انتخاب کرده است. در مجموع بازه ۳۳ ساله مورد مطالعه و بر اساس معیارهای تعریف شده، تعداد ۲۶ رخداد مرتبط با توفان‌های حاره‌ای شناسایی گردید. این رخدادهای بر پایه شاخص‌هایی نظیر ثبت بارش بیش از ۲۰ میلی‌متر در حداقل یک ایستگاه، وقوع هم‌زمان بارش در چند ایستگاه (به منظور بررسی گستره مکانی پدیده) و گزارش کدهای مرتبط با توفان در برخی ایستگاه‌ها، استخراج شدند. از میان این موارد، دو تاریخ ۶ تا ۸ ژوئن ۲۰۰۷ و ۴ تا ۵ ژوئن ۲۰۱۰ که دارای ویژگی‌های بارزتر از نظر شدت و گستره اثرگذاری بودند، برای تحلیل همیدی-ترمودینامیک انتخاب گردیدند. داده‌های جوی مورد استفاده برای این تحلیل، از پایگاه باز تحلیل^۱ NCEP/NCAR و در پنج تراز استاندارد اخذ شد. متغیرهای مورد بررسی شامل رطوبت ویژه، ارتفاع ژئوپتانسیل، سرعت قائم (امگا) و مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد (u) و (v) بودند که با بهره‌گیری از نرم‌افزار GrADS ترسیم و تحلیل شدند. به منظور تحلیل شرایط ترمودینامیک و ساختار قائم جو در روزهای منتخب، داده‌های نیمرخ قائم جو (Skew-T) مربوط به ایستگاه فرودگاه عمان، که به عنوان نزدیک‌ترین نمایه ترمودینامیک به هسته توفان گرمسیری مورد مطالعه در بازه زمانی مذکور در نظر گرفته شده است، استخراج گردید. این داده‌ها از پایگاه داده‌های جوی دانشگاه وایومینگ^۲ (۲۰۲۲) تأمین شده‌اند.

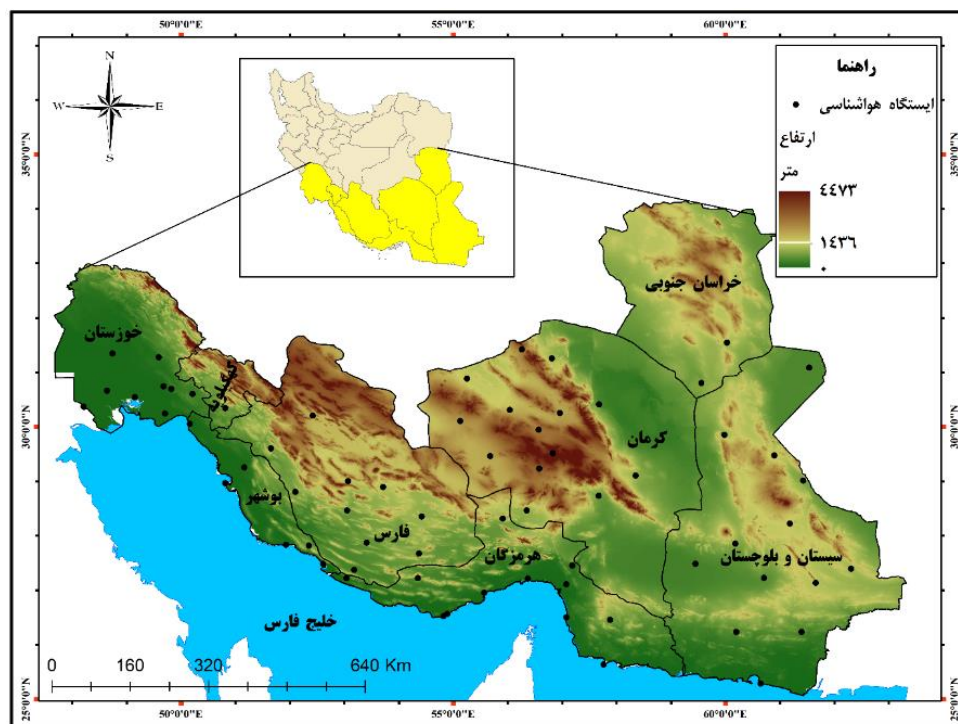
1. reanalysis

2. <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml>

در نهایت به منظور نمایش قلمرو فضایی، محدوده گسترش و نرخ بارندگی ناشی از توفان حاره‌ای منتخب، از داده‌های بارش ماهواره‌ای TRMM بهره‌گیری شد. یکی از ابعاد نوآوری و ارزش افزوده این پژوهش، به کارگیری داده‌های ماهواره‌ای برای بازنمایی و تحلیل قلمرو فضایی بارش‌هاست. داده‌ها از طریق پایگاه تحت وب Giovanni وابسته به ناسا استخراج شدند. محصول مورد استفاده دارای قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰۰ درجه بوده و قابلیت مناسبی در بررسی الگوهای بارندگی در مقیاس منطقه‌ای دارد. براساس مطالعات پیشین، داده‌های بارشی TRMM همبستگی بالایی با داده‌های ایستگاهی دارند؛ به گونه‌ای که ضرایب همبستگی بالاتر از ۰.۸۰ در مناطق مختلف گزارش شده است (Liao & Meneghini, 2009; Dos Reis et al., 2017; Zhao et al., 2017). این موضوع نشان می‌دهد که داده‌های TRMM از دقت و قابلیت اعتماد قابل توجهی برای تحلیل رخدادهای بارشی شدید به‌ویژه در نواحی با پوشش ایستگاهی محدود برخوردارند.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخش‌های گسترده‌ای از نواحی جنوبی و جنوب شرقی ایران را دربر می‌گیرد و شامل استان‌های سیستان و بلوچستان، جنوب خراسان جنوبی، کرمان، فارس، کهگیلویه و بویراحمد، هرمزگان، بوشهر و خوزستان است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که بارش‌های تابستانی در برخی ایستگاه‌های استان‌های کرمان، هرمزگان، جنوب فارس و بخش‌هایی از شرق استان بوشهر رخ می‌دهد. پژوهش حاضر در پی بررسی ارتباط این بارش‌ها با سامانه‌های حاره‌ای بوده است. از جمله تحقیقات مرتبط می‌توان به مطالعات لشکری و همکاران (۲۰۲۰)، جعفری و لشکری (۲۰۲۰) و لشکری و همکاران (۱۴۰۳) اشاره نمود. این منطقه از جنوب به آب‌های گرم خلیج فارس و دریای عمان محدود می‌شود (شکل ۱). گستره جغرافیایی آن بین عرض‌های ۲۴ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی و طول‌های ۴۷ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی واقع شده است. از نظر توپوگرافی، منطقه دارای تنوع ارتفاعی قابل توجهی است؛ به طوری که ارتفاع آن از سطح دریا در سواحل جنوبی (صفر متر) آغاز شده و تا ارتفاعات زاگرس جنوبی با حداکثر ارتفاع ۴۴۷۳ متر افزایش می‌یابد. این تفاوت‌های ارتفاعی، همراه با موقعیت جغرافیایی خاص منطقه، می‌تواند در شکل‌گیری الگوهای اقلیمی متنوع و پیچیده آن نقش بسزایی داشته باشد. الگوی گردش عمومی جو در این منطقه تحت تأثیر چندین توده و سامانه هوایی عمده قرار دارد. از جمله می‌توان به توده هوای مرطوب مدیترانه‌ای، سامانه کم‌فشار سودانی، سامانه پرفشار عربستان، جریان‌های موسمی اقیانوس هند و سامانه پرفشار سبیری اشاره کرد. هر یک از این توده‌های هوا با ویژگی‌های خاص دمایی و رطوبتی خود، در بازه‌های زمانی مختلف، الگوهای بارندگی، شدت تبخیر، دما و پویایی‌های جوی منطقه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند (علیچانی، ۱۳۸۲: ۴۵؛ لشکری، ۱۳۸۲: ۱).

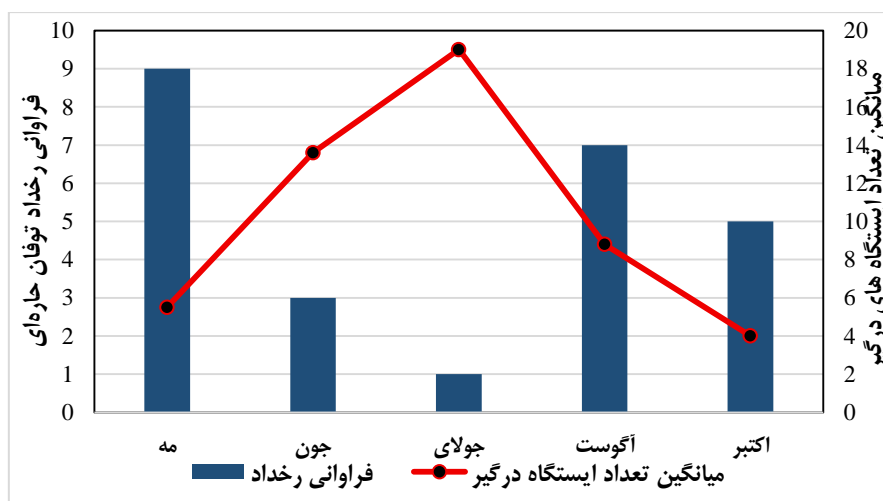


شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های همیدی

یافته‌ها

تحلیل آماری و بررسی الگوی زمانی توفان‌های حاره‌ای منتخب طی دوره ۳۳ ساله

در بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹، تعداد ۲۵ توفان حاره‌ای در دریای عرب و شمال اقیانوس هند تکوین یافته‌اند که گسترش شمال سوی آن‌ها، بخش‌هایی از جنوب شرق ایران را تحت تأثیر قرار داده است. جدول ۱، فهرست این توفان‌های حاره‌ای را مطابق معیارهای تعریف‌شده در بخش روش‌شناسی ارائه می‌دهد؛ این فهرست به تفکیک ماه و طی یک بازه ۳۳ ساله، بر اساس بیشینه مقادیر بارندگی ثبت‌شده و تعداد ایستگاه‌های درگیر تنظیم‌شده است. یک نکته قابل‌تأمل این است که در ماه سپتامبر، با در نظر گرفتن آستانه بارش بیش از ۲۰ میلی‌متر و پراکندگی در حداقل سه ایستگاه، هیچ رخدادی ثبت‌نشده است. این امر می‌تواند ناشی از تغییر ماهیت و منبع بارش‌های مؤثر بر منطقه در این ماه باشد که در پژوهش محمدی و لشکری (۱۳۹۸) به آن اشاره‌شده است. به عبارتی، در ماه اکتبر با فعال شدن سامانه‌های سودانی و تقویت نفوذ آن‌ها به عرض‌های بالاتر، ماهیت بارش‌ها تغییر می‌کند و سهم سیستم‌های همرفتی حاره‌ای در تولید بارش کاهش‌یافته و بارش‌های همرفتی-فرارفتی مرتبط با موج‌های سودانی غالب می‌شوند. این رفتار، بر گذار فصلی سامانه‌های بارشی در منطقه مورد مطالعه تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که پیوند دینامیکی بین توفان‌های حاره‌ای و الگوهای همیدی در اوایل پاییز به‌طور محسوس تغییر می‌یابد.



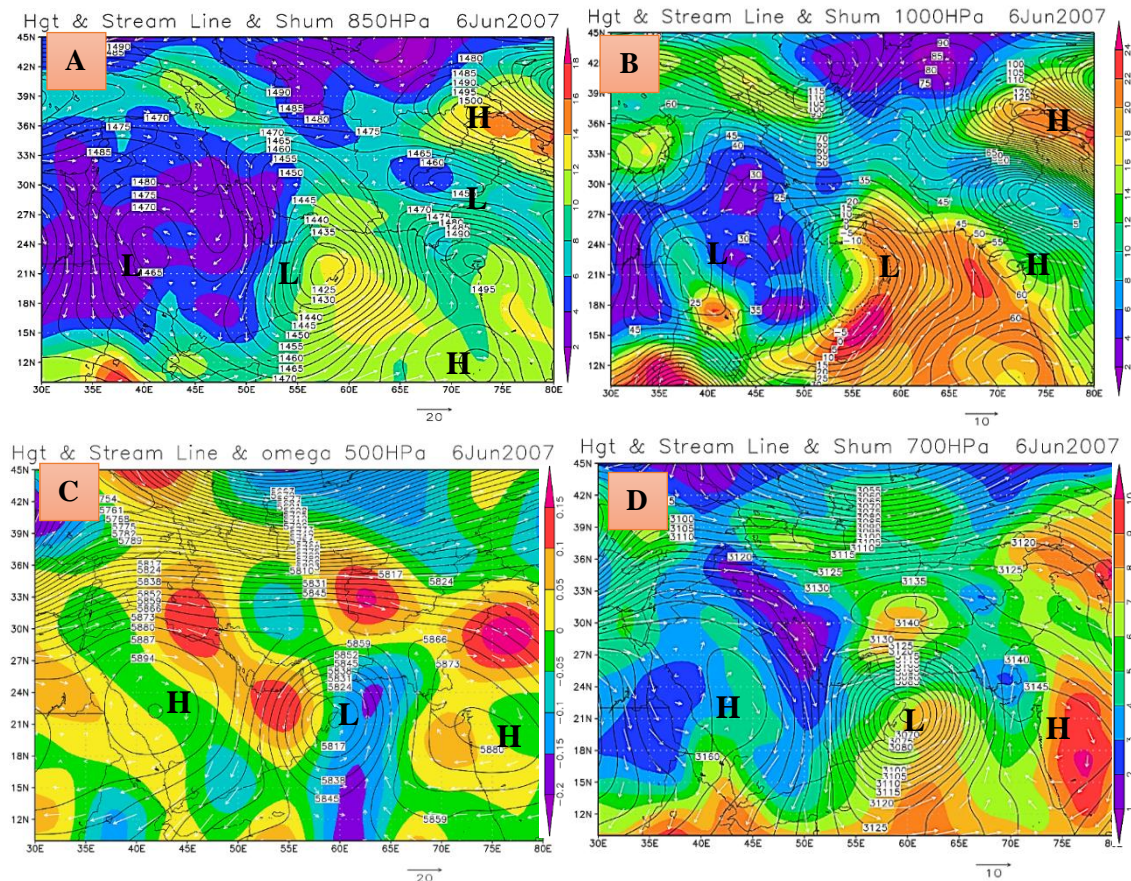
شکل ۲. فراوانی رخداد توفان‌های حاره‌ای و میانگین تعداد ایستگاه‌های تحت تأثیر طی ماه‌های مه تا اکتبر (۱۹۸۶ الی ۲۰۱۹)

در ادامه، همان‌گونه که در بخش روش‌شناسی تشریح شد، به‌منظور واکاوی همدیدی و ترمودینامیک توفان‌های حاره‌ای، دو بازه زمانی شامل ۶ تا ۸ ژوئن ۲۰۰۷ (با ویژگی همگانی و گستردگی مکانی) و ۱۰ تا ۱۱ ژوئن ۲۰۱۰ (با شدت قابل توجه) به‌عنوان نمونه‌های شاخص برای تحلیل انتخاب شدند. در این راستا، از داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل، نم و ویژه، و مؤلفه‌های U و V باد برای سطوح فشاری ۱۰۰۰، ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال بهره گرفته شد تا امکان ارائه تصویری دقیق و جامع از ساختار دینامیک و ترمودینامیک این سامانه‌ها فراهم گردد.

تحلیل همدیدی- ترمودینامیک توفان ۶ تا ۸ ژوئن ۲۰۰۷

شکل ۳، نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، نم و ویژه و میدان باد را در سطوح فشاری ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز اوج فعالیت توفان، ۶ ژوئن را به تصویر می‌کشد. طی این بازه زمانی، بیشینه بارش ثبت شده برابر با ۱۲۰ میلی‌متر بوده و ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی تحت تأثیر این سامانه قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سامانه چرخندی بسیار قوی در تمام ترازهای زیرین و میانی وردسپهر بر روی دریاهای گرم عرب و عمان حاکم است. این سامانه از سه روز قبل بر روی شمال غرب اقیانوس هند و جنوب دریای عرب تکوین پیدا کرده و به تدریج به عرض‌های شمالی جابه‌جاشده است. در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال هسته مرکزی این چرخند با پربند منفی ۲۰ ژئوپتانسیل متر در جنوب تنگه هرمز و بر روی شرق شبه‌جزیره عربستان استقرار دارد. این هسته با اندکی جابه‌جایی به سمت عرض‌های شمالی (تنگه هرمز) در تمام ترازهای زیرین و میانی وردسپهر دیده می‌شود. قرینه این مرکز چرخندی در غرب شبه‌جزیره عربستان و شرق دریای سرخ مرکز واچرخندی استقرار دارد که این مرکز نیز با جابه‌جایی اندکی به عرض‌های جنوبی‌تر در تمام ترازهای زیرین و میانی وردسپهر دیده می‌شود. همچنین میدان گسترده‌ای با نم و ویژه قابل توجه در ضلع شرقی چرخند شکل گرفته است. به طوری که در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال این مقدار به بیش از ۲۲ گرم بر کیلوگرم می‌رسد. این میدان رطوبتی در تمام ترازهای میانی نیز مشاهده می‌شود. فرا رفت رطوبت قابل توجه به دامنه شرقی چرخند و انرژی ترمودینامیک حاصل از آن جریانات بالاسو را در ساحل شرقی شبه‌جزیره عربستان و جنوب شرق ایران و دریاهای عرب و عمان تشدید کرده است (شکل ۳A). این در حالی است که در ترازهای میانی وردسپهر با گسترش شمال سوی پشته حاصل از واچرخند عربستان که در این روز در شرق دریای سرخ و غرب عربستان استقرار دارد در گردشی واچرخندی هوای سرد عرض‌های شمالی‌تر را به پشت چرخند فرا رفت نموده است (شکل ۳B، C، D). فرا رفت گرم و مرطوب به دامنه شرقی چرخند و فرا رفت سرد و

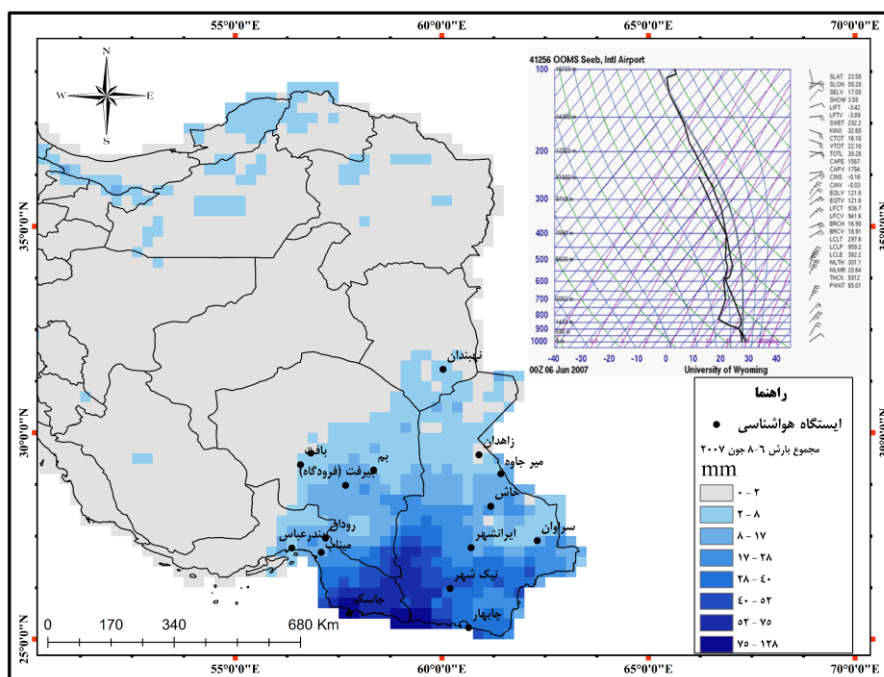
نسبتاً خشک در دامنه غربی آن شیو فشاری و ارتفاعی را تشدید کرده است. تندبادهای ایجادشده در بخش شرقی چرخند بیانگر این شیو فشاری و ارتفاعی است. همچنین ملاحظه می‌شود میدان گسترده‌ای از امگای منفی در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال تمام پهنه شرقی چرخند را در بر گرفته است. این جریانات بالاسوی قوی و رطوبت قابل توجه فرا رفت شده و انرژی ترمودینامیک حاصل از آن جریانات همرفتی شدیدی را بر روی کشورهای عمان و جنوب شرق ایران فراهم نموده است.



شکل ۳. A: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کتور) میدان باد و نم ویژه (سایه‌های رنگی) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال B: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کتور) میدان باد و نم ویژه (سایه‌های رنگی) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال C: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کتور) میدان باد و نم ویژه (سایه‌های رنگی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال D: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

شکل ۴، نمودار اسکيو-تی مربوط به ایستگاه رادیوسوند فرودگاه مسقط (عمان) را در تاریخ ۶ ژوئن ۲۰۰۷، به همراه مجموع بارش تجمعی طی دوره ۶ تا ۸ ژوئن ۲۰۰۷ نمایش می‌دهد. داده‌های این رادیوسوند، به‌عنوان نزدیک‌ترین نمایه ترمودینامیک به هسته توفان حاره‌ای مورد مطالعه در این بازه زمانی محسوب می‌شوند. همان‌گونه که نمودار نشان می‌دهد، از تراز دریا تا لایه‌های میانی و فوقانی تروپوسفر، ناپایداری شدیدی در منطقه حاکم بوده است. نیم‌رخ قائم دما و دمای نقطه شبنم به‌وضوح نشان‌دهنده مقادیر بالای رطوبت و میزان قابل توجه انرژی ترمودینامیک در عمقی فراتر از ۶ تا ۷ کیلومتر در ستون جو است. علاوه بر این، شاخص‌های ناپایداری محاسبه‌شده نیز مؤید وجود ناپایداری شدید در سراسر ضخامت تروپوسفر می‌باشند. تحلیل بردارهای باد نشان می‌دهد که جریان‌های غالب در لایه‌های زیرین جو دارای جهت شمال شرقی بوده و این الگوی جریانی تا سطوح بالاتر، به‌ویژه تا تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال نیز به‌طور یکپارچه تداوم داشته است. داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای TRMM نشان می‌دهند که بیشینه بارش ثبت‌شده در ایستگاه‌های جنوب

غربی استان سیستان و بلوچستان و شرق استان هرمزگان، به‌ویژه در ایستگاه‌های جاسک، نیک شهر و چابهار رخ داده است. بیشینه مجموع بارش در این بازه برابر با ۱۲۸ میلی‌متر بوده که بیانگر شدت و توان بالای سامانه توفان حاره‌ای موردبررسی است. علاوه، قلمرو فضایی و حوزه نفوذ بارش‌های حاصل از این سامانه محدوده‌ای وسیع را در بر گرفته است، به‌طوری که کل استان سیستان و بلوچستان، جنوب استان خراسان جنوبی، نیمه شرقی استان کرمان و نیمه شرقی استان هرمزگان را تحت تأثیر قرار داده است. در مجموع، ۱۶ ایستگاه همیدی در این مناطق متأثر از بارش‌های شدید ناشی از این سامانه بوده‌اند.



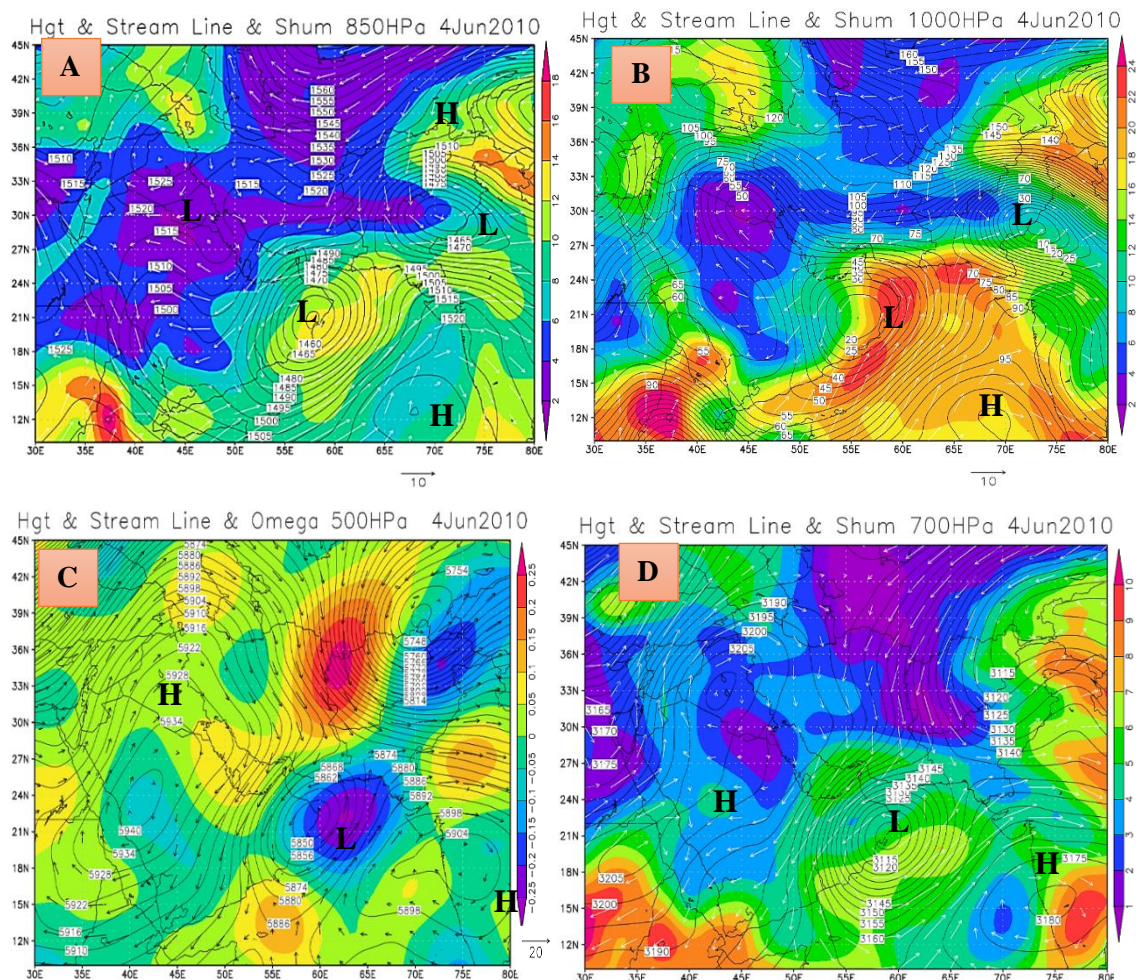
شکل ۴. مجموع بارش ۶ الی ۸ ژوئن ۲۰۰۷ و نمودار اسکيو-تی روز ۶ ژوئن ۲۰۰۷ ایستگاه فرودگاه عمان

تحلیل همیدی-ترمودینامیک توفان ۴ تا ۵ ژوئن ۲۰۱۰

شکل ۵، نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، نم و ویژه و میدان باد را در سطوح فشاری ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز اوج فعالیت توفان، ۴ ژوئن را به تصویر می‌کشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال مرکز کم ارتفاع قوی با پربند ۲۰ ژئوپتانسیل متر در ساحل غربی دریای عمان و بر روی کشور عمان شکل گرفته است. به دلیل فرا رفت سردی که با گسترش جنوب سوی زبانه و اچرخند مهاجر بر روی نیمه شمالی و بخش شرقی ایران و شمال افغانستان و همچنین فرا رفت گرم و مرطوب حاصل از جریانات جنوبی بخش شرقی توفان شیو ارتفاعی شدیدی بر روی حوزه دریای عمان ایجاد شده است. تندبادهای ایجاد شده در بخش شرقی توفان بیانگر این شیو ارتفاعی شدید است. با تداوم جریانات جنوب و فرا رفت رطوبتی ایجاد شده هسته مرطوبی با بزرگی بیش از ۲۲ گرم در کیلوگرم در بخش شمال شرقی سیکلون در محدوده شمال شرقی کشور عمان و جنوب کشور پاکستان تکوین پیدا کرده است. این میدان رطوبتی قوی انرژی ترمودینامیک لازم را برای جریانات همرفتی قوی فراهم نموده است (شکل ۵ A). تراز ۸۵۰ هکتوپاسال نماینده تراز مرزی و یا مرز انتهایی لایه‌مرزی است. همچنان که نقشه ترکیبی این تراز نشان می‌دهد الگوی لایه زیرین وردسپهر تا این تراز نیز حاکمیت دارد. این پدیده بیانگر حاکمیت الگوی همیدی تراز زیرین وردسپهر یا تأثیرپذیری از

واداشتهای سطحی است. در این تراز نیز فرا رفت سرد عرض‌های شمالی از طریق زبانه واچرخندی مهاجر و فرا رفت گرم حاره‌ای از طریق جریان‌ات و تندبادهای جنوبی شیو ارتفاعی شدیدی را در بخش جنوب شرقی ایران و پاکستان ایجاد نموده است. همچنان در این تراز میدانی گسترده‌ای از رطوبت بالای ۱۰ و ۱۲ گرم بر کیلوگرم در بخش شرقی توفان حاره‌ای شکل گرفته است. این مقدار رطوبت در این تراز بیانگر فرا رفت رطوبتی قابل ملاحظه از منطقه حاره‌ای و فراهم شدن شرایط ترمودینامیک قوی برای جریان‌ات همرفتی است (شکل ۵ B).

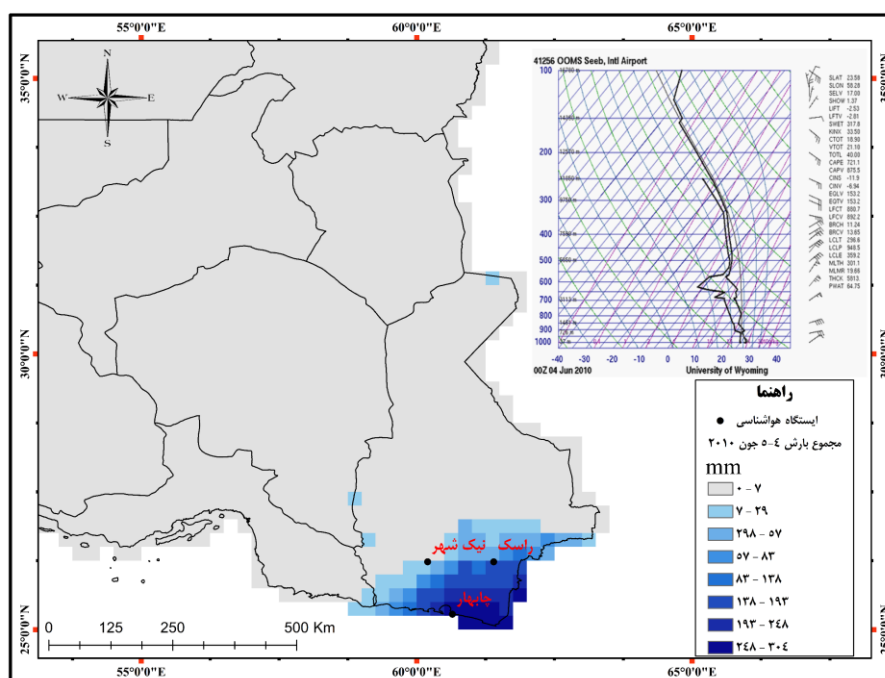
در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و با دور شدن از اثرات واداشتهای سطحی سامانه‌های با ویژگی‌های دینامیکی تظاهر بیشتری پیدا کرده‌اند. در بخش غربی شبه‌جزیره عربستان که تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال زبانه چرخندی توفان حاره‌ای حاکمیت داشت، به تدریج واچرخند عربستان شکل گرفته و تمام پهنه غرب آسیا تا مدیترانه شرقی را در بر گرفته است. واچرخند مهاجر که تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال فرا رفت سرد عرض‌های جنب قطبی را بر روی بخش شرقی ایران و دامنه شمالی توفان حاره‌ای بر عهده داشت در این تراز تضعیف و از بین رفته است. در مقابل توفان حاره‌ای با ناوه خمیده‌ای که بر روی بخش شمالی فلات تبت استقرار دارد یکپارچه شده و فرا رفت سرد پشت ناوه همچنان هوای سرد عرض‌های جنب قطبی را به دامنه شمالی توفان فرا رفت نموده است. فرا رفت حاصل از این تراف در گردشی چرخندی به دامنه غربی توفان فرا رفت شده و شیو ارتفاعی شدیدی را شرق شبه‌جزیره عربستان و دریای عمان ایجاد کرده و توفان با تزریق تاوایی مناسب تقویت شده است؛ بنابراین توفان از ویژگی ترمودینامیک قوی به دلیل فرا رفت رطوبت در لایه زیرین وردسپهر و شرایط دینامیکی قوی در تراز میانی برخوردار است (شکل ۵ C). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌عنوان نماینده تراز میانی وردسپهر به‌خوبی بیانگر حاکمیت الگوهای دینامیکی بر روی منطقه است. واچرخند عربستان کاملاً قوام پیدا کرده و تمام پهنه غرب آسیا را در سیطره خود دارد. پرفشار مهاجر کاملاً از بین رفته و سامانه غالب در بخش شمالی توفان ناوه عمیقی است که با راستایی شمال شرقی - جنوب غربی تمام پهنه شمال فلات تبت تا آسیای میانه را در بر گرفته است. با تشدید جریان‌ات نصف‌النهاری در پشت ناوه و تزریق تاوایی مناسب میدانی از امگای مثبت در بخش شرقی ایران و کشور افغانستان در پشت ناوه شده است. در مقابل با تشدید جریان‌ات جنوبی در بخش شرقی توفان بر روی دریای عمان و تاوایی ایجاد شده به‌وسیله این جریان‌ات میدان گسترده‌ای از امگای منفی یا جریان‌ات بالاسوی قوی در بخش شرقی توفان بر روی شمال خلیج فارس و جنوب ایران ایجاد کرده است (شکل ۵ D).



شکل ۵. A: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کتور) میدان باد و نم ویژه (سایه‌های رنگی) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال B: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کتور) میدان باد و نم ویژه (سایه‌های رنگی) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال C: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کتور) میدان باد و نم ویژه (سایه‌های رنگی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال D: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

شکل ۶، نمودار اسکيو-تی مربوط به ایستگاه رادیوسوند فرودگاه عمان را نمایش می‌دهد. در این روز، دمای سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده و نم ویژه در این تراز به حدود ۲۴ گرم بر کیلوگرم رسیده است. نیم‌رخ قائم دما نشان می‌دهد که تا تراز ۶۵۰ هکتوپاسکال، نرخ کاهش قائم دما به‌طور تقریبی نرمال بوده است؛ به‌گونه‌ای که دما از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال به حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد در ۶۵۰ هکتوپاسکال کاهش یافته و این روند معرف گرادیان دمایی محیطی نزدیک به نرمال است. نیم‌رخ دمای نقطه شبنم نیز نشان‌دهنده وجود رطوبت قابل توجه و شرایط مناسب برای ناپایداری و نقش فرا رفت گرمای مرطوب به درون سامانه در تمام ضخامت تروپوسفر زیرین (از سطح زمین تا حدود ۶۵۰ هکتوپاسکال) است. بین ترازهای ۶۵۰ تا ۵۷۰ هکتوپاسکال، واگرایی (بازشدگی) نمودارهای دما و دمای نقطه شبنم نمایانگر خشکی نسبی جو در این لایه می‌باشد. اما از تراز ۵۷۰ هکتوپاسکال به سطوح بالاتر، نزدیکی مجدد دو پروفیل دمایی حاکی از بازگشت شرایط مناسب ناپایداری تا لایه‌های فوقانی تروپوسفر است. همچنین، همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این سامانه جهت جریان‌های جوی از لایه‌های زیرین تا تراز میانی تروپوسفر عمدتاً شرقی تا شمال غربی است؛ به‌عبارت‌دیگر، منشأ جریانات از سمت آب‌های گرم دریای عمان بوده که نقش مهمی در تأمین رطوبت و تشدید فرایندهای همرفتی ایفا کرده‌اند.

داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای TRMM نشان می‌دهند که بیشینه بارش ثبت شده در ایستگاه‌های جنوب غربی استان سیستان و بلوچستان به‌ویژه در ایستگاه‌های راسک، نیک شهر و چابهار رخ داده است. بیشینه مجموع بارش در این بازه برابر با ۳۰۰ میلی‌متر بوده که بیانگر شدت و توان بالای سامانه توفان حاره‌ای مورد بررسی است. علاوه، قلمرو فضایی و گستره نفوذ بارش‌های ناشی از این سامانه، دارای وسعتی محدود و عمقی کم دامنه بوده است؛ به‌گونه‌ای که عمدتاً نواحی جنوب شرقی استان سیستان و بلوچستان را تحت تأثیر قرار داده است. این وضعیت بیانگر آن است که عمق نفوذ این سامانه حاره‌ای به درون خشکی محدود بوده، با این حال، شدت بارش‌های آن قابل توجه و چشمگیر بوده است؛ به طوری که علی‌رغم دامنه مکانی محدود، موجب بروز بارش‌های سنگین در مناطق متأثر شده است. در مجموع، ۳ ایستگاه همدیدی در این مناطق متأثر از بارش‌های شدید ناشی از این سامانه بوده‌اند.



شکل ۶. مجموع بارش ۴ الی ۵ ژوئن ۲۰۱۰ و نمودار اسکيو-تی روز ۴ ژوئن ۲۰۱۰ ایستگاه فرودگاه عمان

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که توفان‌های حاره‌ای منشأ گرفته از دریای عرب و شمال اقیانوس هند، طی دوره ۳۳ ساله مورد بررسی، علاوه بر اثرگذاری مستقیم بر الگوهای بارشی جنوب شرق ایران، از نظر شدت، وسعت تأثیر و ساختار ترمودینامیک، دارای تنوع قابل توجهی هستند. این تنوع عمدتاً تحت تأثیر شرایط زمانی وقوع، زمینه‌های همدیدی حاکم بر منطقه و میزان هم‌افزایی بین رطوبت ورودی و دینامیک‌های جوی قرار دارد. تحلیل آماری ۲۶ رخداد شناسایی شده، یک الگوی فصلی مشخص را نمایان می‌سازد: بیشینه وقوع توفان‌ها در ماه مه، افت نسبی در جولای، و افزایش مجدد در آگوست و اکتبر. در این میان، عدم ثبت هیچ رخدادی در ماه سپتامبر پدیده‌ای قابل تأمل است که بر گذار سامانه‌های بارشی از ساختارهای حاره‌ای به الگوهای همدیدی مدیترانه‌ای و سودانی در اوایل پاییز دلالت دارد. این رفتار در تطابق با یافته‌های مطالعاتی چون محمدی و لشکری (۱۳۹۸) و لشکری و جعفری (۱۴۰۰) قرار دارد که به تغییر ساختار دینامیکی جو در این بازه زمانی اشاره کرده‌اند. شجاع و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه خود نشان داده‌اند که طی دوره

سرد سال (اکتبر، نوامبر و دسامبر)، نواحی جنوبی دریای عرب و عرض‌های ۱۰ تا ۱۴ درجه شمالی به‌عنوان محدوده‌های اصلی شکل‌گیری و وقوع چرخندهای حاره‌ای شناخته می‌شوند. برای درک عمیق‌تر نحوه اثرگذاری این توفان‌ها، دو رخداد شاخص (ژوئن ۲۰۰۷ و ژوئن ۲۰۱۰) به‌عنوان نمایندگان بارز این سیستم‌ها به‌طور همدیدی تحلیل شدند. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که: توفان ۶ تا ۸ ژوئن ۲۰۰۷ با ساختار چرخندی قوی در سطوح پایین و میانی وردسپهر، فرا رفت گسترده رطوبت از دریای عرب، و وجود ناپایداری ترمودینامیک عمیق، توانست بارش‌هایی با شدت بی‌سابقه و پوشش گسترده در جنوب شرق ایران (به‌ویژه راسک، نیک شهر و چابهار) ایجاد کند. در مقابل، ۴ تا ۵ ژوئن ۲۰۱۰ علی‌رغم شباهت ساختاری، تحت تأثیر الگوهای همدیدی متفاوتی از جمله گسترش جنوبی زبانه واچرخند مهاجر و فرا رفت سرد در نیمه شمالی قرار گرفت که موجب تغییر در الگوی باد، شکل‌گیری تندبادها، و تمرکز بارش‌ها در نواحی خاص با نفوذ محدود به خشکی شد که با نتایج لشکری و کیخسروی (۱۳۸۹) همخوانی دارد.

این تحلیل‌ها روشن می‌سازد که شدت اثرگذاری یک توفان لزوماً تابع تعداد وقوع آن نیست؛ به‌عنوان نمونه، در ماه جولای تنها یک توفان ثبت‌شده، اما همان سامانه توانسته است تعداد زیادی از ایستگاه‌های همدیدی را تحت تأثیر قرار دهد. این نشان می‌دهد که قلمرو فضایی اثرگذاری توفان‌ها در ایران، تابعی از ساختار درونی سامانه و تعامل آن با الگوهای همدیدی منطقه‌ای است، نه صرفاً تعداد یا فصل وقوع. بنابراین، تحلیل همدیدی توفان‌های ژوئن ۲۰۰۷ و ژوئن ۲۰۱۰، نه تنها به تبیین رفتار موردی آن‌ها کمک می‌کند، بلکه چارچوبی تفسیرپذیر برای درک الگوی کلی استخراج‌شده از تحلیل آماری نیز فراهم می‌سازد. بدین معنا که الگوهای فضایی بارش، میزان نفوذ به خشکی، شدت ناپایداری، و فراوانی ایستگاه‌های تحت تأثیر، همگی به‌شدت متأثر از نحوه هم‌افزایی سامانه‌های حاره‌ای با سیستم‌های همدیدی مهاجر و شرایط ترمودینامیک منطقه هستند. همسویی یافته‌های این مطالعه با مطالعاتی نظیر (Evan et al. 2011) و (Deshpande et al. 2021) نیز حاکی از آن است که نقش تعامل بین ساختار توفان و محیط دینامیک-ترمودینامیک پیرامونی، در تبیین الگوهای بارش و قلمرو اثرگذاری توفان‌ها در ایران و جنوب غرب آسیا، حیاتی است. در هر دو مطالعه، بر اهمیت فرا رفت رطوبت، جریانات بالاسوی و ناهمگونی‌های همدیدی در کنترل الگوی بارندگی ناشی از توفان‌های حاره‌ای تأکید شده است؛ الگوهایی که در مناطق شرقی ایران نیز بازتاب یافته‌اند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توفان‌های حاره‌ای منشأ گرفته از دریای عرب و شمال اقیانوس هند نقش قابل‌توجهی در شکل‌دهی الگوهای بارش شدید و متمرکز در جنوب شرق ایران دارند. فراوانی و شدت اثرگذاری این سامانه‌ها به‌شدت به دوره‌های زمانی رخداد، ساختار دینامیک و ترمودینامیک سامانه، و شرایط همدیدی جوی پیرامونی وابسته است. روند فصلی رخداد توفان‌ها و نوسانات فضایی-زمانی آن‌ها بیانگر پیچیدگی فرآیندهای تعاملی میان سامانه‌های همدیدی بزرگ‌مقیاس و فرایندهای همرفتی داخلی سامانه‌های کم‌فشار گرم هسته است. تحلیل موردی دو رخداد برجسته در ژوئن ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰ تأکید می‌کند که شدت و گستره بارش‌های ناشی از این توفان‌ها، صرفاً محصول توان دینامیکی درونی سامانه نیست، بلکه به میزان تأمین و فرا رفت رطوبت از منابع گرم دریایی، و نحوه تعامل جریانات همدیدی پیرامونی وابسته است. این تعاملات نقش کلیدی در تقویت ناپایداری‌های ترمودینامیک و افزایش انرژی همرفتی ایفا می‌کنند که نهایتاً به بارش‌های بسیار شدید و سیلاب‌های ناگهانی منجر می‌شود. از این‌رو، درک دقیق‌تر سازوکارهای تعاملی میان توفان‌های حاره‌ای و الگوهای جوی بزرگ‌مقیاس، برای ارتقاء سامانه‌های پیش‌بینی و کاهش مخاطرات مرتبط با این پدیده‌ها در منطقه جنوب شرق ایران ضروری است. یافته‌های حاضر، همسو با پژوهش‌های

پیشین، اهمیت توجه ویژه به شرایط همدیدی و فرا رفت رطوبت را در مطالعات آینده این سامانه‌ها برجسته می‌سازد و می‌تواند مبنایی علمی برای بهبود مدیریت بحران و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با مخاطرات اقلیمی منطقه فراهم آورد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد و منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- حبیبی، فریده و بهرامی، سمیه. (۱۳۹۵). تحلیل همدیدی توفان حاره‌ای گونو و تأثیر آن بر جنوب شرق ایران. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۸(۴)، ۱۸۹-۱۶۹.
- خسروی، محمود و پودینه، محمدرضا. (۱۳۸۹). تحلیلی بر تأثیرات اقلیمی سیکلون حاره‌ای گونو (خرداد ۱۳۸۶) بر جنوب شرق ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۲(۷۲)، ۷۲-۵۳.
- شجاع، فائزه؛ خسروی، محمود و شمسی‌پور، علی‌اکبر. (۱۳۹۵). مقایسه تطبیقی چرخندهای حاره‌ای شمال دریای عرب و دریای عمان طی دهه اخیر (۲۰۱۵-۲۰۰۵). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۵(۴)، ۹۱-۱۰۸. doi: 10.22067/geo.v5i4.56465
- فیروزی مهر، صفیه؛ آقامحمدی، حسین؛ فیروزی‌مهر، مجید و بهزادی، سعید. (۱۴۰۱). شناسایی الگوهای حرکتی طوفان‌های حاره‌ای با استفاده از داده‌کاوی مکانی. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۲(۳)، ۳۹-۵۵. doi: 10.30488/gps.2021.263881.3359
- علیچانی، بهلول. (۱۳۸۲). *آب‌وهوای ایران*. چاپ یازدهم. انتشارات دانشگاه پیام نور.
- عرفانیان، مهدی؛ کاظم پور، سیما؛ حیدری، حسن. (۱۳۹۵). واسنجی داده‌های باران سری B42^۳ و B43^۳ ماهواره TRMM در زون‌های اقلیمی ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸(۲)، ۲۸۷-۳۰۳. doi: 10.22059/jphgr.2016.59370
- علی محمدی، مهریار؛ ملکوتی، حسین؛ راه بانی، مریم؛ الهی، سعید. (۱۳۹۹). بررسی زمان و نحوه شکل‌گیری طوفان‌های حاره‌ای در منطقه تحت مأموریت نداجا (شمال اقیانوس هند). *فصلنامه دریا فنون*، ۷(۲)، ۹۷-۱۰۹.
- قوبدل رحیمی، یوسف. (۱۳۹۰). نگاشت و تحلیل همگرایی جریان رطوبت جو طی بارش فوق سنگین ناشی از توفان حاره‌ای فت در سواحل چابهار. *آمایش فضا و ژئوماتیک*، ۱۵(۲)، ۱۰۱-۱۱۸.
- قوبدل رحیمی، یوسف؛ عباسی، اسماعیل و فرج زاده، منوچهر. (۱۳۹۷). واکاوی دینامیک و ترمودینامیک شدیدترین چرخند حاره‌ای مؤثر بر سواحل جنوبی ایران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۵(۱)، ۹۷-۱۱۲.
- قوبدل رحیمی، یوسف؛ عباسی، اسماعیل؛ فرج زاده اصل، منوچهر. (۱۳۹۴). واکاوی سازوکار و مخاطرات توفان حاره‌ای نیلوفر. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۲(۱)، ۲۱-۳۴. doi: 10.22059/jhsci.2015.53919

- قوبدل رحیمی، یوسف؛ عباسی، اسماعیل و فرج زاده، منوچهر. (۱۳۹۶). تحلیلی از ویژگی‌های مخاطره توفان‌های حاره‌ای مؤثر بر سواحل جنوبی ایران. *آمایش فضا و ژئوماتیک*، ۲۱(۲)، ۲۷۹-۲۹۳.
- لشکری، حسن؛ یارمرادی، زهرا و موسوی، حسن. (۱۳۹۵). تحلیل آماری و سینوپتیکی توفان‌های تندری استان کهگیلویه و بویر احمد. *فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۵(۱۸)، ۱۵۱-۱۳۵.
- لشکری، حسن. (۱۳۸۲). مکانیسم تکوین، تقویت و توسعه مرکز کم‌فشار سودان و نقش آن بر روی بارش‌های جنوب و جنوب غرب ایران. *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۳۵(۴۶)، ۱-۱۸.
- لشکری، حسن؛ محمدی، زینب؛ ناجی، محمد و فدایی باش، علی‌رضا. (۱۴۰۳). واکاوی پراکنش و تغییرات زمانی مکانی توفان‌های تندری در جنوب ایران در سه‌چرخه خورشیدی اخیر. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۵۶(۴)، ۸۹-۱۰۶. doi: 10.22059/jphgr.2025.387701.1007864
- لشکری، حسن و جعفری، مهناز. (۱۴۰۰). الگوهای همدید تعیین‌کننده مسیر حرکت سامانه‌های بارشی با منشاء سودانی. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۸(۱)، ۵۵-۷۸. Doi: 10.52547/jsaeh.8.1.55
- لشکری، حسن و کیخسروی، قاسم. (۱۳۸۹). تحلیل سینوپتیکی توفان گونو و اثرات آن بر جنوب شرق ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۱(۳)، ۱-۲۰.
- محمدی، فهیمه و لشکری، حسن. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات بارش سامانه کم‌فشار سودان طی روند تاریخی در منطقه جنوب غرب ایران. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۵۱(۲)، ۳۷۳-۳۸۷. doi: 10.22059/jphgr.2019.272706.1007323

References

- Alijani, B. (2003). Climate of Iran (11th ed.). *Payame Noor University Press*. [In Persian]
- Alimohammadi, M., Malakouti, H., Rahbani, M., & Elahi, S. (2020). Investigation of the timing and formation process of tropical cyclones in the area under the Navy's mission (northern Indian Ocean). *Darya Fanon Quarterly*, 7(2), 97-109. [In Persian]
- Callaghan, J. (2003). The tropical cyclone risk in Cairns. *Natural hazards*, 30, 129-153. <https://doi.org/10.1023/A:1026162200005>
- Chen LianShou, C. L., Li Ying, L. Y., & Cheng ZhengQuan, C. Z. (2010). An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones. DOI: 10.1007/s00376-010-8171-y
- 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/s00382-021-05880-z>
- Dos Reis, J., Rennó, C., Lopes, E., Dos Reis, J. B. C., Rennó, C. D., & Lopes, E. S. S. (2017). Validation of satellite rainfall products over a mountainous watershed in a humid subtropical climate region of Brazil. *Remote Sens.*, 9, 1240. <https://doi.org/10.3390/rs9121240>
- Emanuel, K. (2003). Tropical cyclones. *Annual review of earth and planetary sciences*, 31(1), 75-104. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141259>
- Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436 (7051), 686-688. <https://doi.org/10.1038/nature03906>
- Erfanian, M., Kazempour, S., & Heidari, H. (2016). Calibration of TRMM satellite 3B42 and 3B43 rainfall data in climatic zones of Iran. *Physical Geography Research*, 48(2), 287-303. doi: 10.22059/jphgr.2016.59370 [In Persian]
- Esfandiari, N., & Lashkari, H. (2020). Identifying atmospheric river events and their paths into Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(3), 1125-1137. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03148-w>
- Evan, A. T., Kossin, J. P., 'Eddy' Chung, C., & Ramanathan, V. (2011). Arabian Sea tropical cyclones intensified by emissions of black carbon and other aerosols. *Nature*, 479(7371), 94-97. <https://doi.org/10.1038/nature10552>

- Firouzimehr, S., Aghamohammadi, H., Firozi Mehr, M. & Behzadi, S. (2022). Movement Pattern Recognition of Tropical Cyclone Using Spatial Data Mining. *Geographical Planning of Space*, 12(3), 39-55. doi: 10.30488/gps.2021.263881.3359 [In Persian]
- Ghasemifar, E., Naserpour, S., & Sonboli, Z. (2024). Structure of tropical cyclones in the southeast Iran using satellite observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 261, 106308. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106308>
- Ghasemifar, E., Naserpour, S., & Sonboli, Z. (2024). Structure of tropical cyclones in the southeast Iran using satellite observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 261, 106308. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106308>
- Ghavidel Rahimi, Y., abbasi, E. and Farajzadehasl, M. (2015). Analysis of the dynamism and Hazards of Nilofar Tropical Storm. *Environmental Management Hazards*, 2(1), 21-34. doi: 10.22059/jhsci.2015.53919 [In Persian]
- Ghavidel, Yousef, Abbasi, Esmail, & Farajzadeh, Manoochehr. (2018). Climatic geography of Tropical Cyclone hazards Affective on the southern coasts of Iran. *journal of spatial analysis environmental hazarts*, 5(1), 97-112. [In Persian]
- Ghovaydel Rahimi, Y. (2011). Mapping and analysis of atmospheric moisture flux convergence during the extreme rainfall caused by tropical cyclone Phet along the Chabahar coast. *Spatial Planning and Geomatics*, 15(2), 101-118. [In Persian]
- Ghovidel Rahimi, Y., Abbasi, E., & Farjzadeh, M. (2017). The Properties of Tropical Storm Hazards in Southeast Costs of Iran. *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 21, 279-293.
- Gray, W. M. (1968). Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Weather Review*, 96(10), 669-700. doi: 10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2
- Habibi, F. & Bahrami, S. (2016). Synoptic analysis of tropical cyclone Gonu and its impact in the Southeast of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 8(4), 169-189. [In Persian]
- Jafari, M., & Lashkari, H. (2020). Study of the relationship between the intertropical convergence zone expansion and the precipitation in the southern half of Iran. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 210, 105439. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105439>
- Khosravi, M. & Poodineh, M. (2010). A Survey on Climatic Impacts of Gonu Tropical Cyclone (June2007) in Southeast of Iran. *Physical Geography Research*, 42(72), 53-72. [In Persian]
- Kossin, J. P., Emanuel, K. A., & Vecchi, G. A. (2014). The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. *Nature*, 509(7500), 349-352. <https://doi.org/10.1038/nature13278>
- Lashkari, H. (2002). Routing of Sudanese low-pressure systems entering Iran. *Spatial Planning and Geomatics*, 6(2), 133-156. [In Persian]
- Lashkari, H., & Jafari, M. (2021). Synoptic Patterns that Determine the Trajectory of Precipitation Systems of Sudanese Origin. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 8(1), 55-78. Doi: 10.52547/jsaeh.8.1.55 [In Persian]
- Lashkari, H., & keikhosravi, G. (2010). Synoptic analysis of Gonu storm and its effects on southeastern of Iran. *Geography and Environmental Planning*, 21(3), 1-20. [In Persian]
- Lashkari, H., Mohammadi, Z., & Jafari, M. (2020). Investigation on dynamical structure and moisture sources of heavy precipitation in south and south-west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(21), 1140. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06097-w>
- Lashkari, H., Mohammadi, Z., Naji, M. & Fadaei bash, A. (2024). Analysis of the spatial and temporal distribution and changes of thunderstorms in southern Iran over the last three solar cycles. *Physical Geography Research*, 56(4), 89-106. doi: 10.22059/jphgr.2025.387701.1007864 [In Persian]
- Lashkari, H., Yarmoradi, Z., & Mousavi, H. (2016). Statistical and synoptic analysis of thunderstorm events in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province. *Journal of Geography and Environmental Studies*, 5(18), 135-151. [In Persian]
- Liao, L., & Meneghini, R. (2009). Validation of TRMM precipitation radar through comparison of its multiyear measurements with ground-based radar. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(4), 804-817. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1974.1>

- Mohammadi, F. & Lashkari, H. (2019). Investigation of Rainfall Variation of Sudan Low during the Historical Process in Southwestern Iran. *Physical Geography Research*, 51(2), 373-387. doi: 10.22059/jphgr.2019.272706.1007323 [In Persian]
- National Aeronautics and Space Administration. (n.d.). *Giovanni – The Bridge Between Data and Science*. Retrieved June 5, 2025, from <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- Raymond, D. J., & Sessions, S. L. (2007). Evolution of convection during tropical cyclogenesis. *Geophysical Research Letters*, 34(6). <https://doi.org/10.1029/2006GL028607>
- Roy, C., & Kovordányi, R. (2012). Tropical cyclone track forecasting techniques—A review. *Atmospheric research*, 104, 40-69. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.012>
- Shi, M., Wang, S., Qi, X., Zhao, H., & Shu, Y. (2021). The Influence of Large-Scale Environment on the Extremely Active Tropical Cyclone Activity in November 2019 over the Western North Pacific. *Atmosphere*, 12(4), 501. <https://doi.org/10.3390/atmos12040501>
- Shoja, F., Khosravi, M., & Shamsipour, A. A. (2017). Comparative Analysis of Tropical Cyclones in the North of the Arabian Sea and the Gulf of Oman over the Past Decade (2005-2015). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 5(4), 91-108. doi: 10.22067/geo.v5i4.56465 [In Persian]
- Singh, K. S., & Tyagi, B. (2019). Impact of data assimilation and air– sea flux parameterization schemes on the prediction of cyclone Phailin over the Bay of Bengal
- University of Wyoming. (2022). *Upper air data and sounding charts*. Retrieved June 10, 2025, from <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml>
- using the WRFARW model. *Meteorological Applications*, 26(1), 36-48. <https://doi.org/10.1002/met.1734>
- Zhang, Q., Zhang, W., Chen, Y. D., & Jiang, T. (2011). Flood, drought and typhoon disasters during the last half-century in the Guangdong province, China. *Natural Hazards*, 57, 267-278. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9611-9>
- Zhao, Y., Xie, Q., Lu, Y., & Hu, B. (2017). Hydrologic evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis for Nanliu river basin in Humid Southwestern China. *Scientific Reports*, 7(1), 2470. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02704-1>