

# Synoptic Examination of Thunderstorm-Inducing Atmospheric Patterns and Their Temporal Association with Sunspot Activity across Three Recent Climatic Cycles (1986–2018) in Southwestern Iran

**Hasan Lashkari<sup>1\*</sup> , Mohammad Naji<sup>2</sup>, Zainab Mohammadi<sup>3</sup>, Alireza Fadaei Bash<sup>4</sup>**


*1. Corresponding Author, Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran*

*Email: [h-lashkari@sbu.ac.ir](mailto:h-lashkari@sbu.ac.ir)    ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6007-7275>*

*2. PhD Candidate in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran*

*3. Postdoctoral Synoptic Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*

*4. Master of Science in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran*

Article Info	ABSTRACT
<p><b>Article type:</b> <b>Research Article</b></p> <p><b>Article history:</b>  <b>Received:</b> 06 May 2025  <b>Revised:</b> 16 November 2025  <b>Accepted:</b> 10 December 2025  <b>Published:</b> 22 June 2026</p> <p><b>Keywords:</b>            Factor Analysis, Southwest Iran, Sudanese–Mediterranean System, Sunspots, Atmospheric Instability.</p>	<p>Thunderstorms, due to their dynamic and thermodynamic characteristics, can both replenish water resources and cause substantial infrastructural and human losses. This study aims to identify the synoptic patterns influencing thunderstorms in southwestern Iran, where convection is the dominant precipitation mechanism. Given that the statistical period under investigation coincides with the three most recent solar cycles, special attention was paid to variations in thunderstorm occurrence across different phases of each cycle, as well as inter-cycle differences. In this regard, the frequency of thunderstorms during the last three solar cycles and their relationship with sunspot activity were examined, and 178 events were analyzed using factor analysis and qualitative interpretation of synoptic charts. The results indicate that thunderstorm frequency undergoes significant fluctuations during solar cycles, with the changes being more pronounced in years corresponding to peak sunspot activity. For instance, in 1990, despite recording 2,296 sunspots, the number of documented thunderstorms in the region dropped to 24 events. During these periods, combined Sudan–Mediterranean systems had the greatest influence on thunderstorm development, whereas independent Sudanese, Mediterranean, and monsoonal systems played a more limited role. In the combined Sudan–Mediterranean pattern, due to the merging of ridges from the African and migratory anticyclones, the Sudan low-pressure system shifts further eastward, in contrast to the general pattern in which it travels eastward from the western Arabian Peninsula. In this pattern, after passing over the southern Red Sea via the Bab-el-Mandeb Strait, it enters the Arabian Peninsula. When the low-pressure core is positioned between Riyadh and the southern Persian Gulf, thunderstorms intensify due to substantial moisture advection from the southern seas. At mid-tropospheric levels, the Mediterranean trough exhibits a marked southward extension, and a cut-off low with a strong southward displacement settles over southern Iraq.</p>
<p><b>How to Cite:</b> Lashkari, H. , Naji, M. , Mohammadi, Z. and Fadaei Bash, A. (2026). Synoptic Examination of Thunderstorm-Inducing Atmospheric Patterns and Their Temporal Association with Sunspot Activity across Three Recent Climatic Cycles (1986–2018) in Southwestern Iran. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (48), 143-166.</p>	
<p>© The Author/Authors      <b>Publisher:</b> University of Sistan and Baluchestan</p>	
<p> DOI: 10.22111/jneh.2025.51935.2113</p>	

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **INTRODUCTION**

Thunderstorms are significant and destructive climatological hazards that occur due to the intense release of energy and torrential rainfall within a short time frame, causing substantial damage. Southwestern Iran, particularly its eastern regions, exhibits a high susceptibility to this phenomenon due to its topographic characteristics, proximity to moisture sources, and influence from large-scale climate systems. This region is affected by Sudanese, Mediterranean, combined, and to some extent, monsoonal systems, which play a crucial role in the formation of convective precipitation. Given that the intensity and frequency of these systems are influenced by climatic fluctuations and variable solar cycles, the present research aims to analyze the effect of the three recent solar cycles (numbers 22 to 24) on the frequency and activity of synoptic systems effective in generating thunderstorms in southwestern Iran. To this end, a combination of statistical, synoptic, and thermodynamic analyses has been employed to identify the relationship between variations in solar radiation and influential atmospheric patterns. The findings of this research can contribute to the improvement of forecasting and climate risk management systems in the region.

### **DATA AND METHODOLOGY**

In this research, to investigate the role of solar cycles in the temporal variations of thunderstorms in southwestern Iran, recorded data from 24 meteorological stations during the period of 1986 to 2018, concurrent with three complete solar cycles (cycles 22 to 24), were utilized. The thunderstorm occurrence data were extracted from 6-hourly synoptic reports of the Iran Meteorological Organization and organized in Microsoft Excel. Additionally, data about the sunspot number were collected from the Royal Observatory of Belgium database. Only stations with complete and continuous data across all three solar cycles were included in the analysis. For synoptic analysis, 178 significant events, in which thunderstorms were recorded at more than half of the stations, were identified. These events were examined using two complementary methods: visual analysis and factor analysis. In the visual analysis, indices such as the maximum number of lightning strikes and daily precipitation were considered in sample selection. In the factor analysis method, sea level pressure (SLP) data were extracted from the NCEP/NCAR database and analyzed in SPSS software using varimax orthogonal rotation. Fifteen principal factors explained more than 91% of the total data variance. The Kaiser-Meyer-Olkin (KMO = 0.918) and Bartlett's test of sphericity (sig = 0.000) also confirmed the adequacy and significance of the factor analysis. Finally, two events on November 29, 1986, and December 13, 2010, were identified as selected case studies for synoptic chart analysis.

### **RESULTS AND DISCUSSION**

The results indicated that thunderstorm occurrences in southwestern Iran exhibit a distinct periodic pattern in relation to solar cycles. Statistical and synoptic analyses of data recorded at seven selected stations during the three recent solar cycles (cycles 22, 23, and 24) reveal that the frequency of thunderstorms in most cases increased with decreasing solar activity (reduction in the number of sunspots), particularly in the final years of each cycle. This inverse relationship between solar activity and the frequency of thunderstorm phenomena is more clearly evident in cycles 22 and 23, and a similar pattern, despite minor fluctuations, was repeated in cycle 24. Specifically, the highest frequency of thunderstorms during the entire 33-year period was recorded in 2007 (minimum solar activity in cycle 23) with over 320 events. From the perspective of synoptic systems, Sudanese systems and combined Sudanese-Mediterranean systems played the most effective role in the formation of thunderstorms in the region. These systems, benefiting from tropical moisture and convective instabilities, possess the greatest potential for the development of thunderclouds and severe weather events in the region. The results showed that in years with reduced solar activity, the frequency and intensity of Sudanese and combined systems also increased, leading to the

intensification of thunderstorm occurrences. Conversely, coinciding with peak solar activity, a relative decrease in the penetration and influence of these systems was observed; this may indicate the reflective effects of solar radiation on changes in the general atmospheric circulation patterns and the weakening of the influence of tropical systems. Analysis of surface pressure and mid-tropospheric charts during thunderstorm events in southwestern Iran showed that these phenomena mainly occurred under the influence of the intrusion of Sudanese and Mediterranean systems, or a combination thereof. At the surface, the expansion of the Sudanese low-pressure system and the advection of tropical moisture from the Red Sea and the Persian Gulf intensified instability. At the mid-level (500 hPa), the establishment of the Mediterranean trough and upper-level divergence associated with the subtropical jet stream facilitated air ascent and the development of thunderclouds. This triple coincidence – moisture, trough, and jet – played a key role in the formation and intensity of thunderstorms.

## CONCLUSION

The findings of this research demonstrate a significant correlation between the occurrence of thunderstorms in southwestern Iran and the fluctuations in solar activity, particularly the variations in the number of sunspots during solar cycles 22 to 24. Specifically, the maximum frequency of these phenomena is often observed in the declining and minimum years of each solar cycle. Synoptic analyses also indicate that Sudanese systems and their combination with Mediterranean systems play a more prominent role in the occurrence of these phenomena compared to other systems. In selected case studies, the interaction of high-pressure and low-pressure systems at different atmospheric levels, particularly the confluence of the Siberian High, the Sudanese Low, and Mediterranean troughs, has led to effective moisture transport, increased instability, and the intensification of convective uplift. These results emphasize the mesoscale role of solar fluctuations in modulating synoptic patterns and thermodynamic conditions effective in the formation of thunderstorms, and highlight the importance of considering solar indices in climatological analyses and forecasts.

## REFERENCES

### References (in Persian)

- Azizi, G., Garami, M. S., & Sharifi, L. (2017). Spatial Analysis of Thunderstorms in Iran. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 17(47), 243–259. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2914-fa.html>. [In Persian]
- Lashkari, H., Yarmoradi, Z., & Mousavi, H. (2016). Statistical and synoptic analysis of thunderstorm events in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province. *Quarterly Journal of Geography and Environmental Studies*, 5(18), 135–151. [In Persian]
- Lashkari, H., & Jafari, M. (2021). Synoptic Patterns that Determine the Trajectory of Precipitation Systems of Sudanese Origin. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 8(1), 55–78. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3104-fa.html>. [In Persian]
- Masoompour Samakosh, J., Taheri, F., Koushki, S., and Tazarek, M. (2022). The Effect of Large-scale Synoptic Systems on the Widespread Occurrence of Thunderstorms in the West and Northwest of Iran. *Journal of Climate Research*, 1401(51), 147-162. [In Persian]
- Mohammadi, Z. and Lashkari, H. (2018). Effects of Spatial Movement of Arabian Subtropical High Pressure and Subtropical Jet on Synoptic and Thermodynamic Patterns of Intense Wet Years in the South and South West Iran. *Physical Geography Research*, 50(3), 491-509. doi: 10.22059/jphgr.2018.249422.1007165. [In Persian]
- Mohammadi, H., Khazaei, M., Mahoutchi, M. H. and Abasi, E. (2016). Synoptic analysis of thermodynamic destructive thunderstorms, Ahvaz. *Environmental Management Hazards*, 3(2), 155-170. doi: 10.22059/jhsci.2016.60744. [In Persian]
- Qavidel Rahimi, Y., Baghbanan, P., & Farajzadeh Asl, M. (2014). The Spatial Analysis of Hazard of Spring Thunderstorms in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 1(3), 59–70. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2348-fa.html>. [In Persian]

### References (in English)

- Adelekan, I. O. 1998. Spatio-temporal variations in thunderstorm rainfall over Nigeria. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(11), 1273-1284. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199809\)18:11<1273::AID-JOC298>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199809)18:11<1273::AID-JOC298>3.0.CO;2-4)
- Barry, R. G., & Hall-McKim, E. A. 2014. Essentials of the Earth's climate system. Cambridge University Press.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

## واکاوی الگوهای همدیدی ایجادکننده طوفان‌های تندری و انطباق زمانی آن‌ها با لکه‌های خورشیدی در سه چرخه اقلیمی اخیر (۲۰۱۸-۱۹۸۶) در جنوب غرب

حسن لشکری<sup>۱\*</sup>، محمد ناجی<sup>۲</sup>، زینب محمدی<sup>۳</sup>، علیرضا فدایی<sup>۴</sup> باش

۱. استاد آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: [h-Lashkari@sbu.ac.ir](mailto:h-Lashkari@sbu.ac.ir)    ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6007-7275>

۲. دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. پسادکتری آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴. کارشناس ارشد آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>طوفان‌های تندری با ویژگی‌های دینامیکی و ترمودینامیکی خود، علاوه بر تأمین منابع آبی، می‌توانند خسارت‌های زیربنایی و انسانی قابل توجهی ایجاد کنند. این پژوهش با هدف شناسایی الگوهای همدیدی مؤثر بر طوفان‌های تندری جنوب‌غرب ایران که همرفت سازوکار غالب بارش‌های آن است، انجام شده است. با توجه به همزمانی دوره آماری موردبررسی با سه چرخه خورشیدی اخیر، تلاش شده است تا تغییرات فراوانی وقوع طوفان‌های تندری در مراحل مختلف هر چرخه و همچنین تفاوت‌های آن از یک چرخه به چرخه دیگر، مورد دقت قرار بگیرد. در این راستا، فراوانی طوفان‌های تندری در سه چرخه اخیر خورشیدی و ارتباط آن با لکه‌های خورشیدی بررسی و ۱۷۸ رخداد با روش‌های تحلیل عاملی و تحلیل کیفی نقشه‌های همدیدی تحلیل شد. نتایج نشان داد که فراوانی طوفان‌های تندری در طول چرخه‌های خورشیدی دستخوش نوسانات معنادار بوده و این تغییرات به‌ویژه در سال‌های متناظر با اوج فعالیت لکه‌های خورشیدی بارزتر است. به‌طور خاص، در سال ۱۹۹۰ با وجود ثبت ۲۲۹۶ لکه خورشیدی، تعداد رخداد‌های طوفان تندری به ۲۴ مورد کاهش یافت. در این دوره‌ها، سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای بیشترین نقش را در شکل‌گیری طوفان‌ها داشته‌اند؛ درحالی‌که سامانه‌های سودانی، مدیترانه‌ای و جریانات مونسونی به‌طور مستقل نقش محدودتری داشته‌اند. در الگوی ترکیبی سودان - مدیترانه به‌دلیل ادغام زبانه‌های دو سامانه واچرخندی آفریقا و مهاجر، کم‌فشار سودانی جابه‌جایی شرق‌سوتر داشته و بر خلاف الگوی کلی که از سمت غرب شبه جزیره عربستان حرکت می‌کند. در این الگو، پس از عبور از بخش‌های جنوبی دریای سرخ در محدوده تنگه باب‌المندب وارد شبه‌جزیره عربستان می‌شود. وقتی هسته مرکزی کم‌فشار در محدوده‌ای بین ریاض و جنوب خلیج فارس قرار دارد، طوفان‌های تندری به‌دلیل فرارفت رطوبتی فراوان از دریاهای جنوبی تشدید می‌شوند. در ترازهای میانی و ردسپهر ناوه مدیترانه‌ای، ضمن گسترش جنوب‌سوی قابل‌توجه، مرکز کم‌ارتفاع بریده با جابه‌جایی جنوب‌سوی شدید در جنوب عراق استقرار پیدا می‌کند.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶</p> <p>واژه‌های کلیدی: تحلیل عاملی، جنوب غرب ایران، سامانه سودانی-مدیترانه‌ای، لکه‌های خورشیدی، ناپایداری.</p>

استناد: لشکری، حسن، ناجی، محمد، محمدی، زینب و فدایی باش، علیرضا. (۱۴۰۵). واکاوی الگوهای همدیدی ایجادکننده طوفان‌های تندری و انطباق زمانی آن‌ها با لکه‌های خورشیدی در سه چرخه اقلیمی اخیر (۲۰۱۸-۱۹۸۶) در جنوب غرب. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۸)، ۱۶۶-۱۴۳.

## مقدمه

پدیده‌های طبیعی به واسطه ماهیت دوسویه خود، علاوه بر نقش آفرینی در پویایی‌های زیست‌محیطی، می‌توانند منجر به بروز پیامدهای شدید و گاه فاجعه‌بار شوند (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۶). در این میان، مخاطرات طبیعی سالانه جان هزاران نفر را در سراسر جهان تهدید می‌کنند که سهم قابل توجهی از این تلفات به مخاطرات آب‌وهوایی از جمله طوفان‌های تندری، سیلاب‌ها و سایر رویدادهای حدی جوی اختصاص دارد (لشکری و همکاران، ۱۳۹۵). طوفان‌های تندری و پدیده‌های همبسته‌ای چون تگرگ، بادهای شدید، صاعقه و بارش‌های سیل‌آسا، از جمله مخاطرات اقلیمی مهم به شمار می‌روند که به دلیل آزادسازی سریع و شدید انرژی و ریزش شدید بارش در بازه زمانی کوتاه، همواره مورد توجه پژوهش‌های آب‌وهوایی قرار گرفته‌اند (قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۳؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). این سامانه‌ها که در مقیاس محلی تا میان‌مقیاس با گستره‌ای بین ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر شکل می‌گیرند، شدت فعالیت‌شان به ارتفاع و رشد ابرهای جوششی وابسته است (آدکان، ۱۹۹۸؛ بری و هال - مک‌کیم، ۲۰۱۴). در نتیجه، این طوفان‌ها به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های اقلیمی، سالانه خسارت‌های قابل توجهی به زیرساخت‌های شهری، اراضی کشاورزی و واحدهای مسکونی وارد می‌سازند (لشکری و آقاسی، ۱۳۹۲؛ معصوم‌پور سماکوش و همکاران، ۱۴۰۱).

منطقه جنوب‌غربی ایران، به‌ویژه نواحی شرقی این پهنه شامل استان کهگیلویه و بویراحمد و چهارمحال بختیاری، به دلیل ویژگی‌های توپوگرافی خاص، تأثیرپذیری از سامانه‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس و دسترسی به منابع رطوبتی ناشی از مجاورت با دریا‌های گرم جنوبی، از استعداد بالایی در شکل‌گیری طوفان‌های تندری برخوردار است (لشکری و حجتی، ۱۳۹۱). این منطقه، به‌خصوص در نیمه جنوب‌غربی کشور، با تنوع اقلیمی و شرایط جغرافیایی ویژه، نوسانات بارشی چشمگیری را تجربه می‌کند. در این راستا، سامانه‌های جوی متعددی در روند شکل‌گیری و توزیع بارش‌ها نقش دارند؛ به‌گونه‌ای که توزیع زمانی و مکانی بارش‌ها به شدت تابع جایگاه و تغییرات مراکز فشار جوی است. نوع، موقعیت و پویایی این مراکز، نقشی کلیدی در تنظیم رژیم بارشی منطقه ایفا می‌کنند (لشکری و جعفری، ۱۴۰۰). الگوهای اقلیمی غالب در جنوب‌غرب ایران که استان‌هایی چون خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد و چهارمحال و بختیاری را شامل می‌شود، متأثر از سامانه‌های مونسونی، سودانی، مدیترانه‌ای و ترکیبی از سامانه‌های سودانی - مدیترانه‌ای هستند. در این میان، سامانه‌های سودانی بیشترین سهم را در تولید بارش‌ها بر عهده دارند، درحالی‌که سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای در رتبه دوم و سامانه‌های مدیترانه‌ای در جایگاه سوم اهمیت قرار دارند (محمدی و لشکری، ۱۳۹۸). با توجه به موقعیت جغرافیایی این منطقه در طول جغرافیایی غربی‌تر، نفوذ و فعالیت مستقل سامانه‌های مونسونی در این نواحی محدود و کم‌اثر است (فدایی‌باش، ۱۴۰۳).

در سال‌های مختلف، شدت و فراوانی سامانه‌های جوی مؤثر در شکل‌گیری طوفان‌های تندری به‌صورت یکنواخت نبوده و تحت تأثیر تغییرپذیری‌های اقلیمی و نوسانات تابشی خورشید، دچار نوسان شده‌اند (لشکری و همکاران، ۱۴۰۳). بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، تحلیل جامع و علمی تأثیر چرخه‌های خورشیدی شماره ۲۲، ۲۳ و ۲۴ بر فراوانی و فعالیت سامانه‌های سینوپتیکی مؤثر در رخداد طوفان‌های تندری در جنوب‌غرب ایران است. در این راستا، سامانه‌های جوی مؤثر نظیر سامانه‌های سودانی، مدیترانه‌ای، ترکیبی (سودانی - مدیترانه‌ای) و مونسونی مورد ارزیابی قرار گرفته و بسامد وقوع آن‌ها در ارتباط با تغییرات تابش خورشیدی بررسی می‌گردد. به‌منظور افزایش دقت تحلیل، علاوه بر مطالعات آماری، از تحلیل‌های هم‌دیدگی و ترمودینامیکی نیز بهره‌گیری شده است. این تحلیل‌ها با

هدف شناسایی ویژگی‌های دینامیکی و فیزیکی جو در زمان رخداد طوفان‌های تندری انجام می‌شود. بررسی پیوند میان چرخه‌های خورشیدی و بسامد سامانه‌های مؤثر بر طوفان‌های تندری از اهمیت بسزایی برخوردار است، چراکه نوسانات تابش خورشیدی قادر است به تغییرات ساختاری در الگوهای جوی و اقلیمی منجر شود. این پژوهش با ارائه شناختی عمیق‌تر از فرآیندهای دینامیکی و ترمودینامیکی حاکم بر این سامانه‌ها، می‌تواند در جهت بهبود سامانه‌های پیش‌بینی جوی، ارتقاء مدیریت مخاطرات اقلیمی و تدوین راهبردهای سازگار با تغییرات اقلیمی در جنوب غرب ایران مؤثر واقع شود.

طوفان‌های تندری به‌عنوان یکی از پدیده‌های مهم و تأثیرگذار جوی، همواره در کانون توجه مطالعات علوم جوی و اقلیم‌شناسی قرار داشته‌اند. در این راستا، دای<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) در پژوهشی با هدف بررسی تغییرات روزانه فراوانی وقوع انواع بارش و طوفان‌های تندری در مقیاس جهانی طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۹۷، به این نتیجه دست یافت که رگبارهای همرفتی و طوفان‌های تندری بیشتر در ساعات بعدازظهر و در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در تمامی فصول سال از بیشترین فراوانی برخوردار هستند. همچنین، تافرنر و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۸) با تمرکز بر فرایند رشد و گسترش طوفان‌های تندری شدید در حوضه آبریز بالادست رودخانه دانوب، نشان دادند که شکل‌گیری سریع این سامانه‌ها در محل پیدایش، نقش مؤثری در وقوع بارش‌های سنگین و افزایش سرعت بادهای شدید در نواحی مرکزی اروپا ایفا می‌کند. در راستای بررسی رفتار اقلیمی طوفان‌های تندری در مناطق مختلف جهان، لوگینوف و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۰) به مطالعه تغییرات زمانی و مکانی این پدیده و ویژگی‌های شکل‌گیری آن در کشور بلاروس پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که فراوانی وقوع طوفان‌های تندری در مناطق کوهستانی به‌طور معناداری بیش از نواحی هموار است. پینتو و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) تغییرات بلندمدت روزهای همراه با رعدوبرق را در جنوب شرقی برزیل مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش حاکی از افزایش فعالیت طوفان‌های تندری در این منطقه طی سال‌های اخیر و ارتباط آن با فازهای مختلف پدیده‌های اقیانوسی - جوی نظیر ال‌نینو و لانینا بود. همچنین، گالاناکي و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ابرها و وقوع رعدوبرق در منطقه مدیترانه، دریافتند که شرایط توپوگرافی محلی و چرخه روزانه تابش خورشید نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری و گسترش طوفان‌های تندری ایفا می‌کنند. تازارک و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۲۰) در پژوهشی تطبیقی، بیان کردند که در صورت توسعه یافتن یک طوفان تندری، احتمال تبدیل آن به سامانه‌ای شدید در ایالات متحده آمریکا به‌مراتب بیشتر از اروپاست. افزون بر این، پیتزوتی و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از شاخص‌های ترمودینامیکی، به تحلیل آماری رخداد طوفان‌های تندری در نواحی شمالی اروپا پرداختند و نقش پارامترهای ناپایداری جو در تبیین فراوانی و شدت این پدیده را مورد تأکید قرار دادند.

در ایران، لشکری و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی طوفان‌های تندری در استان کهگیلویه، نشان دادند که سامانه‌های سودانی با جذب رطوبت از دریای عرب، عمان و سرخ و برخورداری از انرژی پتانسیل بالا، عامل اصلی شکل‌گیری این پدیده هستند. در مطالعه‌ای دیگر لشکری و همکاران (۱۴۰۳) به واکاوی پراکنش طوفان‌های تندری جنوب ایران در سه چرخه خورشیدی اخیر پرداختند. نتایج نشان داد که از چرخه خورشیدی ۲۲ الی ۲۴ فراوانی رخداد طوفان‌های

<sup>۱</sup> - Dai

<sup>۲</sup> - Tafferner et al

<sup>۳</sup> - Loginov et al

<sup>۴</sup> - Pinto et al

<sup>۵</sup> - Galanaki et al

<sup>۶</sup> - Tazarek et als

<sup>۷</sup> - Pizzuti et al

تندری از الگوی منظمی پیروی نمی‌کند و چرخه ۲۳ بالاترین رخداد را داشته است. فرجی و همکاران (۱۳۹۴) به تحلیل الگوهای زمانی و مکانی بارش‌های استان زنجان پرداختند و نتایج نشان داد که زبانه‌های کم‌فشارهای مدیترانه‌ای و سودانی، با تأثیر دریای مدیترانه، سیاه و سرخ، به سمت شمال غرب ایران و استان زنجان گسترش یافته‌اند. معصوم پور سماکوش و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش خود به بررسی همدیدی طوفان‌های تندری سواحل جنوبی ایران پرداخته و نتایج نشان داد که نفوذ بادهای غربی و قرارگیری ناحیه واگرایی و منطقه فرارفت تاوایی مثبت در این منطقه شرایط ناپایداری و صعود هوا را ایجاد می‌کند. برنا (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای مشابه بر طوفان‌های تندری استان خوزستان تأکید کرده و نتیجه گرفت که گسترش سامانه‌های کم‌فشار واقع در شرق دریای سرخ و عربستان عامل اصلی شکل‌گیری این پدیده است. دانانیانی و همکاران (۱۴۰۲) طوفان‌های تندری در ایران را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و نشان دادند که این پدیده در تمام نقاط کشور رخ می‌دهد؛ ولی بیشترین فراوانی در شمال غرب، جنوب غرب و جنوب شرق ایران مشاهده می‌شود. همچنین، مجرد و همکاران (۱۳۹۸) به تحلیل زمانی و مکانی طوفان‌های تندری در ایران پرداخته و نشان دادند که بیشترین فراوانی طوفان‌ها در شمال غرب و غرب کشور، به‌ویژه در ایستگاه‌های ارومیه، تبریز، خوی، خرم‌آباد و بوشهر رخ می‌دهد.

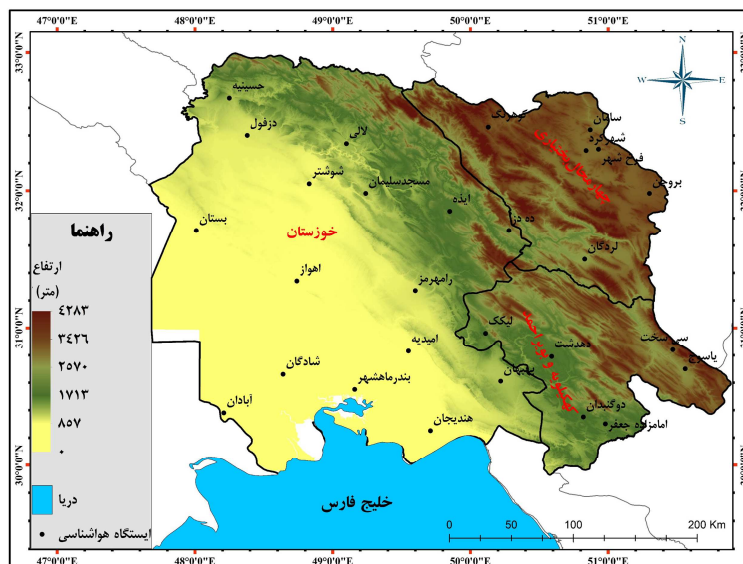
بررسی پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که طوفان‌های تندری، به‌عنوان پدیده‌های جوی پیچیده و متغیر، در بسیاری از مناطق جهان و به‌ویژه ایران، تأثیرات قابل‌توجهی بر محیط و فعالیت‌های انسانی دارند. این پدیده‌ها تحت تأثیر عواملی چون ویژگی‌های توپوگرافی، تابش خورشیدی و ساختار سامانه‌های جوی شکل می‌گیرند. مطالعات نشان داد، در ایران، بیشترین فراوانی وقوع طوفان‌های تندری در مناطق شمال‌غرب، جنوب‌غرب و جنوب مشاهده شده و بیشتر در فصل‌های پاییز و زمستان رخ می‌دهند. با توجه به اهمیت این پدیده در جنوب‌غرب کشور و نبود مطالعات جامع که هم‌زمان به تحلیل همدیدی و ترمودینامیکی آن همراه با نقش چرخه‌های خورشیدی پرداخته باشند، این پژوهش با اهداف زیر انجام می‌شود:

- \* شناسایی و تحلیل الگوهای همدیدی مؤثر بر شکل‌گیری طوفان‌های تندری در جنوب‌غرب ایران،
- \* بررسی ویژگی‌های ترمودینامیکی این پدیده‌ها،
- \* ارزیابی تغییرات فراوانی وقوع آن‌ها در ارتباط با مراحل مختلف چرخه‌های خورشیدی،
- \* مقایسه یافته‌ها در بازه سه چرخه خورشیدی اخیر.

### منطقه مورد مطالعه

پهنه مطالعاتی این پژوهش شامل استان‌های خوزستان، چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد است. این منطقه جغرافیایی بخشی از جنوب غربی ایران را در بر می‌گیرد و از ارتفاعات زاگرس مرکزی تا سواحل خلیج فارس گسترش یافته است (شکل ۱). این سه استان در مجموع مساحتی معادل ۹۶،۴۹۸ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهند و از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۹۲ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۹۸ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۸۸ دقیقه شرقی قرار دارند. بر اساس آخرین سرشماری نفوس و مسکن (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵)، جمعیت ساکن در این سه استان برابر با ۶،۳۷۱،۳۲۴ نفر گزارش شده است. این منطقه علاوه بر تنوع جمعیتی، دارای ویژگی‌های متنوع توپوگرافی است که آن را از نظر اقلیمی و محیطی

به یک منطقه منحصربه‌فرد تبدیل می‌کند. اختلاف ارتفاع در این پهنه به ۴۲۸۳ متر می‌رسد که از نواحی کم‌ارتفاع حاشیه خلیج فارس تا ارتفاعات مرتفع زاگرس مرکزی را شامل می‌شود. شرایط اقلیمی این منطقه به شدت تحت تأثیر ارتفاعات زاگرس و جریان‌های جوی مختلف است که به ایجاد تنوع در الگوهای بارشی و دمایی منجر شده است. اقلیم این ناحیه تحت تأثیر سه توده هوایی عمده شامل توده هوای مرطوب مدیترانه‌ای، سامانه کم‌فشار سودانی و سامانه پرفشار عربستان قرار دارد. هر یک از این توده‌های هوایی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد دمایی و رطوبتی، نقش مهمی در شکل‌دهی الگوهای جوی منطقه ایفا می‌کنند (محمدی و لشکری، ۱۳۹۵؛ علیجانی، ۱۳۸۲؛ لشکری، ۱۳۸۲).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی انتخابی منطبق با دوره آماری

### داده‌ها و روش پژوهش

برای انجام این پژوهش، داده‌های مربوط به رخداد طوفان‌های تندری از گزارش‌های دیدبانی ۲۴ ساعته ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور طی یک دوره‌ی بلندمدت از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ گردآوری و استانداردسازی شدند. بازه‌ی زمانی انتخاب‌شده به‌گونه‌ای تعیین شده که با سه چرخه‌ی کامل ۱۱ ساله‌ی خورشیدی (چرخه‌های ۲۲ تا ۲۴) هم‌پوشانی داشته باشد. این انتخاب، علاوه بر پوشش تغییرات اقلیمی بلندمدت، امکان بررسی تأثیرات احتمالی نوسانات فعالیت خورشیدی بر فراوانی و شدت طوفان‌های تندری را نیز فراهم می‌کند. چرخه‌ی خورشیدی ۲۲ شامل سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۶، چرخه‌ی ۲۳ شامل سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۷ و چرخه‌ی ۲۴ بازه‌ی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ را در بر می‌گیرد. همچنین، داده‌های مربوط به شمار لکه‌های خورشیدی از پایگاه داده‌ی <sup>۱</sup>Royal Observatory of Belgium استخراج شده‌اند. با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و تبیین الگوهای همدیدی مؤثر در شکل‌گیری طوفان‌های تندری در مناطق جنوب‌غربی ایران است، برای بهره‌برداری حداکثری از داده‌های ایستگاه‌های دیدبانی و تعیین دقیق‌تر گستره‌ی اثر این پدیده، تنها ایستگاه‌هایی در تحلیل وارد شدند که در هر چرخه‌ی خورشیدی دارای

داده‌های کامل و پیوسته بودند. بر این اساس، تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده در هر سیکل با سیکل دیگر متفاوت است؛ به گونه‌ای که در چرخه‌ی اول ۸ ایستگاه، در چرخه‌ی دوم ۱۷ ایستگاه و در چرخه‌ی سوم ۲۶ ایستگاه دارای داده‌های کامل شناسایی و در فرایند تحلیل لحاظ شدند. از این رو، در این مطالعه ضمن تحلیل تأثیرپذیری طوفان‌های تندری از سامانه‌های جوی، تغییرات این پدیده در میان سه چرخه‌ی خورشیدی نیز مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در گام بعدی، داده‌های استخراج‌شده از پایگاه سازمان هواشناسی کشور، بر اساس ایستگاه‌های منتخب و مناطق مربوطه، در محیط نرم‌افزار Excel سامان‌دهی و طبقه‌بندی شدند. به منظور دستیابی به تحلیلی دقیق‌تر، روزهایی که وقوع طوفان تندری در گزارش‌های دیدبانی ۶ ساعته ثبت شده بود، به تفکیک هر ایستگاه و برای هر ماه از سال استخراج گردید. به عبارت دیگر، هر گزارش ۶ ساعته تندر در هر ایستگاه، به عنوان یک تندر تلقی شده و در شمارش تعداد تندرهای در هر روز ماه و سال محاسبه شده است. ولی برای انتخاب نمونه‌ها برای تحلیل هم‌دیدگی روزهایی به عنوان روز تندری انتخاب شده است که پدیده تندر حداقل در یک نوبت ۶ ساعته و در یک سوم ایستگاه-های همان سیکل گزارش شده باشد. در ادامه، فراوانی رخداد طوفان‌های تندری برای هر سال طی دوره‌ی آماری ۳۳ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸)، بر اساس گزارش‌های ۶ ساعته، محاسبه و ثبت شد.

به این ترتیب، تمام سامانه‌هایی که در آن حداقل یک سوم ایستگاه‌های هر سیکل و حداقل در یک گزارش ۶ ساعته درگیر پدیده طوفان تندری بوده است، در هر سال و به تفکیک هر سیکل استخراج شد. سپس داده‌های جوی مربوط به ترازهای دریا، ۱۰۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال برای این نمونه‌ها ترسیم گردید. آنگاه با بررسی چشمی چندین باره، الگوهای هم‌دیدگی مشابه جداسازی گردید. این سامانه‌های بارشی همراه با تندر به چهار دسته‌ی اصلی طبقه‌بندی شدند: سامانه‌ی سودانی، سامانه‌ی مدیترانه‌ای، سامانه‌ی مونسونی و سامانه‌ی ترکیبی (حاصل ادغام همزمان سامانه‌های سودانی و مدیترانه‌ای). این طبقه‌بندی برای هر یک از سه چرخه‌ی خورشیدی مورد مطالعه، بر پایه‌ی داده‌های ثبت‌شده در بازه‌های ۶ ساعته و با توجه به ایستگاه‌های دارای داده‌ی کامل، به صورت منظم و دقیق انجام شده است.

در نهایت و پس از طی مراحل پیشین، نمونه‌های شاخص جهت انجام تحلیل هم‌دیدگی انتخاب شدند. برای شناسایی این نمونه‌ها، از دو رویکرد مکمل شامل تحلیل چشمی و تحلیل عاملی استفاده گردید. در فاصله زمانی بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸، در مجموع ۱۷۸ مورد بارش تندری شناسایی شد که در آن‌ها وقوع تندر در بیش از نیمی از ایستگاه‌های مورد بررسی ثبت شده بود. در این موارد، با بهره‌گیری از تحلیل چشمی و تحلیل عاملی، نمونه‌های منتخب برای تحلیل‌های هم‌دیدگی تعیین شدند. در روش تحلیل چشمی، نمونه‌ها بر پایه شاخص‌هایی نظیر بیشترین فراوانی روزانه تندر در سطح ایستگاه‌ها، بیشترین تعداد وقوع همزمان تندر، مجموع بارش روزانه و بیشینه‌ی بارش ثبت‌شده در هر روز، انتخاب گردیدند. به عنوان نمونه، جدول (۱)، نتایج تحلیل چشمی مربوط به سامانه‌های ترکیبی را نشان می‌دهد. باین حال، به منظور ارتقاء دقت در انتخاب نمونه‌ها، از تحلیل عاملی نیز استفاده شد. در این روش، داده‌های فشار سطح دریا که از پایگاه داده‌ی NCEP/NCAR استخراج شده بودند، برای روزهایی که در بیش از نیمی از ایستگاه‌ها وقوع طوفان تندری گزارش شده بود، به صورت عددی در محیط نرم‌افزار GrADS پردازش و سامان‌دهی شدند. این داده‌ها در قالب ماتریسی با ابعاد ۱۷۸×۱۷۸ سازمان‌دهی گردیدند و سپس در محیط نرم‌افزار SPSS و با بهره‌گیری از روش تحلیل عاملی و چرخش متعامد واریماکس<sup>۱</sup>، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای تعیین تعداد

عوامل معنادار، از نمودار سنگ‌ریزه‌ای بهره گرفته شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، از مجموع ۱۷۸ متغیر اولیه، تعداد ۱۵ عامل اصلی استخراج گردید و سایر عوامل با مقدار ویژه کمتر از یک حذف شدند. این ۱۵ عامل توانستند در مجموع ۹۱٫۸ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین نمایند. به‌عبارت دیگر، بیش از ۹۱ درصد از واریانس متغیرهای اولیه توسط عوامل استخراج‌شده تبیین گردیده است که این امر نشان‌دهنده‌ی دقت و کارایی بالای روش تحلیل عاملی در خلاصه‌سازی داده‌ها و شناسایی الگوهای غالب در مجموعه داده‌ی مورد بررسی است. در راستای ارزیابی کفایت نمونه و بررسی مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی، خروجی آزمون KMO و آزمون بارتلت نیز گزارش شده است. مقدار آماره KMO برابر با ۰٫۹۱۸، به‌دست آمد که نشان‌دهنده‌ی کفایت مناسب حجم نمونه برای انجام تحلیل عاملی است. همچنین، مقدار معناداری آزمون بارتلت برابر با ۰٫۰۰۰ محاسبه شد که نشان‌دهنده‌ی معنادار بودن همبستگی بین متغیرها و مناسب بودن داده‌ها برای اجرای تحلیل عاملی می‌باشد.

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های چشمی و تحلیل عاملی، تاریخ‌های ۲۹ نوامبر ۱۹۸۶ و ۱۳ دسامبر ۲۰۱۰ به‌عنوان نمونه‌های منتخب برای تحلیل همدیدی شناسایی شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این دو سامانه علاوه بر کسب بالاترین امتیاز در هر دو شاخص تحلیل چشمی و تحلیل عاملی، در تمامی معیارهای انتخابی نظیر بیشترین بارش ایستگاهی، مجموع بارش روزانه، بیشترین تعداد تندر روزانه و بیشترین تعداد تندر در سطح ایستگاه‌ها، رتبه‌های بالایی را به خود اختصاص داده‌اند. این تحلیل‌ها با استفاده از داده‌های جوی شامل نقشه‌های فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، میدان باد و نم ویژه که از پایگاه داده‌ی NCEP/NCAR استخراج شده‌اند، انجام پذیرفته است.

جدول ۱: تحلیل چشمی برای سامانه‌های ادغامی (۱۹۸۶ الی ۲۰۱۸)

تاریخ	بیشترین بارش ایستگاهی	بارش کلی روزانه	بیشترین تندر روزانه	بیشترین تندر روزانه ایستگاهی
۲۹ نوامبر ۱۹۸۶	✓	✓	✓	✓
۲۶ آوریل ۱۹۹۲	✓	x	x	x
۱۱ اکتبر ۱۹۹۸	x	x	x	✓
۱۸ نوامبر ۲۰۰۱	x	✓	x	x
۱۲ آوریل ۲۰۰۶	✓	x	x	x
۲۹ آوریل ۲۰۰۶	✓	x	x	x
۳ نوامبر ۲۰۰۹	x	✓	✓	x
۱۳ دسامبر ۲۰۱۰	✓	✓	✓	✓
۲۰ نوامبر ۲۰۱۱	x	x	✓	✓
۲۲ مارس ۲۰۱۵	x	✓	✓	✓
۳۰ اکتبر ۲۰۱۵	x	x	✓	✓
۳ فوریه ۲۰۱۷	x	✓	✓	✓
۲۰ اکتبر ۲۰۱۷	✓	x	x	x
۱۲ آوریل ۲۰۱۸	x	x	✓	x
۲۳ آوریل ۲۰۱۸	✓	✓	✓	x
۶ نوامبر ۲۰۱۸	✓	✓	✓	x

## نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا فراوانی رخداد طوفان‌های تندری بر اساس تأثیر سامانه‌ها و الگوهای همدیدی مؤثر مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. سامانه‌های مورد مطالعه شامل سامانه سودانی، سامانه مدیترانه‌ای، سامانه مونسونی و سامانه ترکیبی (که ناشی از ادغام سامانه‌های سودانی و مدیترانه‌ای است) می‌باشند. تحلیل‌ها بر اساس داده‌های مربوط به

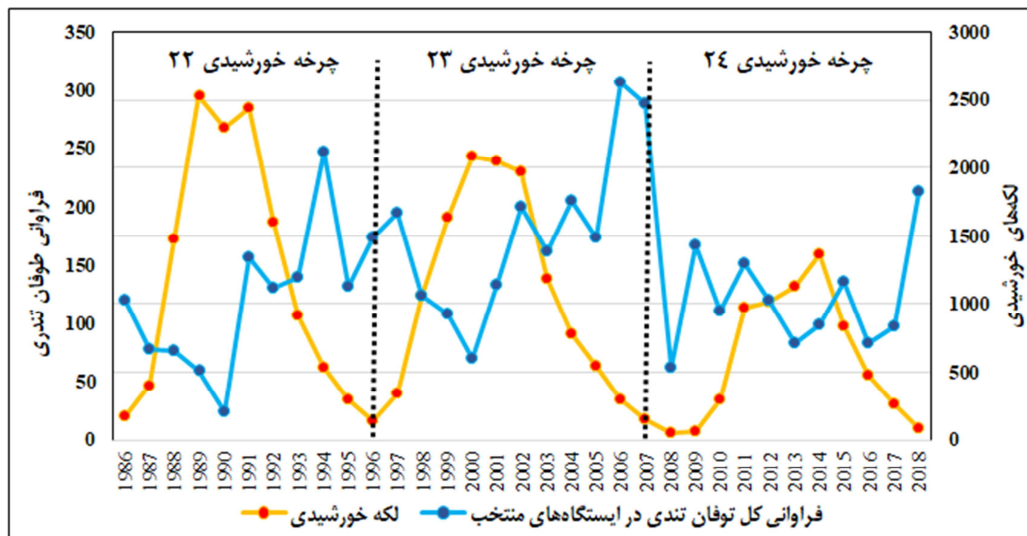
سه چرخه خورشیدی اخیر انجام گرفته و فراوانی هر یک از این سامانه‌ها در ایجاد طوفان‌های تندری در دوره‌های مختلف ارزیابی می‌شود. در ادامه، به منظور درک دقیق‌تر سازوکارهای فیزیکی و ترمودینامیکی مؤثر بر شکل‌گیری طوفان‌های تندری، تحلیل‌های همدیدی بر روی دو نمونه منتخب از رخداد‌های برجسته انجام خواهد شد.

### فراوانی چرخه‌ای طوفان تندری

شکل ۲، نحوه پراکنش تعداد لکه‌های خورشیدی را طی سه چرخه خورشیدی اخیر (چرخه‌های ۲۲ تا ۲۴) به تصویر می‌کشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با وجود نظم نسبی در تکرار حدوداً ۱۱ ساله این چرخه‌ها، روند تغییرات تعداد لکه‌های خورشیدی در آغاز، میانه و پایان هر چرخه، یکنواخت و مشابه نیست. از چرخه ۲۲ به بعد، به تدریج از ارتفاع قله‌های فعالیت خورشیدی کاسته شده و چرخه‌ها از منظر تعداد لکه‌های خورشیدی کم‌رقت‌تر ظاهر شده‌اند. در این میان، چرخه ۲۴ به‌عنوان کم‌فعال‌ترین و ضعیف‌ترین چرخه خورشیدی در بازه‌ی یک قرن اخیر شناخته می‌شود. همچنین، این شکل تقارن نسبی در توزیع سالانه فراوانی رخداد‌های طوفان تندری را در ایستگاه‌های منتخب طی بازه‌ی زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸، در ارتباط با نوسانات تعداد لکه‌های خورشیدی، به تصویر می‌کشد. این تحلیل مبتنی بر داده‌های ثبت‌شده در هفت ایستگاه شامل آبادان، اهواز، بستان، دوگنبدان، مسجدسلیمان، امیدیه و شهرکرد انجام شده است. در چرخه خورشیدی شماره ۲۲، یک رابطه‌ی کاملاً معکوس بین تعداد لکه‌های خورشیدی و فراوانی وقوع طوفان‌های تندری مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که بیشینه‌ی رخداد‌های طوفان تندری در سال‌های پایانی این چرخه گزارش شده است. این چرخه یکی از فعال‌ترین و قدرتمندترین چرخه‌های خورشیدی در چند دهه‌ی اخیر محسوب می‌شود (ابراهیم<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۵)؛ به‌طوری‌که شمار لکه‌های خورشیدی از حدود ۲۵۰ لکه در سال‌های ابتدایی چرخه، به بیش از ۲۵۰۰ لکه در سال‌های میانی آن افزایش یافته است. با این حال، روند وقوع طوفان‌های تندری در خلاف جهت افزایش فعالیت خورشیدی حرکت کرده؛ به نحوی که تعداد این رخدادها از ۷۸ مورد در ابتدای چرخه به تنها ۲۴ مورد در میانه‌ی آن کاهش یافته است (Solar Influences Data Analysis Center, n.d<sup>۲</sup>).

در ادامه و در سال‌های انتهایی چرخه، بار دیگر فراوانی این پدیده روندی افزایشی به خود گرفته و در سال ماقبل پایانی چرخه، تعداد گزارش‌شده‌ی طوفان‌های تندری به بیش از ۲۶۰ مورد رسیده است. الگویی مشابه نیز در چرخه خورشیدی شماره ۲۳ قابل مشاهده است. با وجود آن‌که چرخه خورشیدی شماره ۲۳ نسبت به چرخه‌ی ۲۲ از نظر ارتفاع قله‌های فعالیت خورشیدی (تعداد لکه‌ها) ضعیف‌تر و کوتاه‌قدرت‌تر ظاهر شده است؛ اما الگوی کلی پراکنش لکه‌های خورشیدی و رخداد‌های طوفان تندری در آن، شباهت قابل‌توجهی با چرخه‌ی پیشین دارد. در این چرخه نیز، حداقل تعداد طوفان‌های تندری در میانه‌ی چرخه ثبت شده است. حال آن‌که در نیمه‌ی دوم چرخه، روندی صعودی و چشمگیر در تعداد این پدیده‌ها مشاهده می‌شود. به‌طور مشخص، در سال ۲۰۰۷ که هم‌زمان با کمینه‌ی فعالیت خورشیدی و کاهش تعداد لکه‌ها به پایین‌ترین سطح ممکن است، بیشترین تعداد طوفان‌های تندری به ثبت رسیده است؛ به‌طوری‌که شمار این رخدادها از مرز ۳۲۰ مورد فراتر رفته و به‌عنوان بالاترین فراوانی ثبت‌شده در کل دوره‌ی آماری ۳۳ ساله برای منطقه‌ی جنوب‌غرب کشور شناخته می‌شود. در چرخه‌ی ۲۴ که ضعیف‌ترین و کم‌فعال‌ترین چرخه خورشیدی در یک قرن اخیر محسوب می‌شود، الگوی کاهش تعداد طوفان‌های تندری در میانه‌ی چرخه (هرچند با یک سال تقدم زمانی) بار دیگر تکرار شده است. در این چرخه نیز، بیشینه‌ی رخداد‌های طوفان

تندری در سال‌های ابتدایی و انتهایی ثبت شده است. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان اظهار داشت که طوفان‌های تندری در تقارن زمانی با فعالیت خورشیدی، الگویی معکوس را دنبال می‌کنند؛ به این معنا که بیشترین فراوانی آن‌ها در سال‌های پایانی هر چرخه خورشیدی، یعنی هم‌زمان با کاهش تعداد لکه‌ها، رخ داده است. به‌عنوان نمونه، تعداد لکه‌های خورشیدی که در دوره اوج به ۲۰۸۵ مورد رسیده بود، تا سال ۲۰۰۷ به ۱۵۷ مورد کاهش یافت. هم‌زمان با این افت شدید فعالیت خورشیدی، در سال یادشده افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در فراوانی رخداد تندرهای مشاهده شد، به‌طوری‌که ۲۸۸ مورد گزارش ثبت گردید.

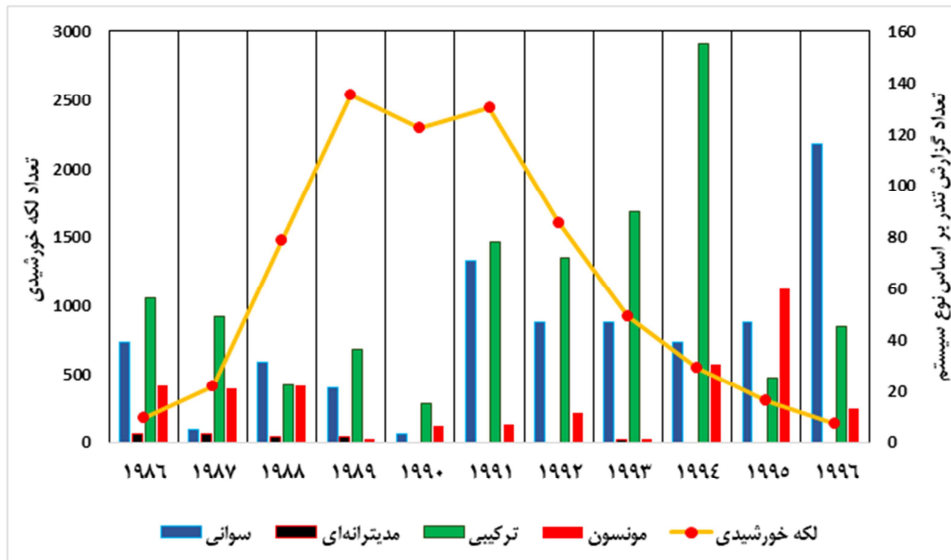


شکل ۲: روند تغییرات فراوانی طوفان تندری طی بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ و تعداد لکه‌های خورشیدی (سه چرخه خورشیدی ۲۲، ۲۳، ۲۴).

### فراوانی رخداد طوفان‌های تندری براساس سامانه‌ها و الگوهای همدیدی موثر در چرخه خورشیدی ۲۲

بر اساس داده‌های ارائه‌شده در شکل ۳ و با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه، چهار الگوی همدیدی غالب شامل سامانه‌های مونسونی، سودانی، مدیترانه‌ای و ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای جنوب غرب کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با این حال، شدت و فراوانی هر یک از این الگوها در طول سال‌های مختلف ثابت نبوده و به‌عنوان تابعی از تغییرات اقلیمی و نوسانات در گردش عمومی جو قابل‌تیین هستند. تحلیل توزیع فراوانی این سامانه‌ها نشان می‌دهد که الگوهای ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای به دلیل سازگاری با عرض جغرافیایی منطقه و نیز بهره‌مندی از منابع رطوبتی گرمسیری، بیشترین اثرگذاری را بر منطقه دارند. پس از آن، سامانه‌های سودانی نقش قابل توجهی ایفا کرده و سامانه‌های مونسونی در رتبه‌ی بعدی قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، با توجه به استقرار منطقه در عرض‌های جغرافیایی میانی، نفوذ مستقل سامانه‌های مدیترانه‌ای به این ناحیه محدود بوده و معمولاً این سامانه‌ها به‌صورت ترکیبی و هم‌زمان با سامانه‌های سودانی در منطقه فعال می‌شوند. در میان سال‌های بررسی‌شده، بیشینه‌ی فعالیت خورشیدی و تعداد لکه‌های خورشیدی در بازه‌ی ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۱ ثبت شده است. هم‌زمان با این اوج خورشیدی، کاهش فراوانی سامانه‌های سودانی و سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای مشاهده می‌شود که می‌تواند گویای تأثیرپذیری سامانه‌های همدیدی منطقه از تغییرات ناشی از افزایش تابش خورشیدی باشد. در مقابل، در سال‌های پایانی چرخه‌ی ۲۲ که با کاهش تعداد لکه‌های خورشیدی همراه است، افزایشی در فراوانی سامانه‌های همدیدی به‌ویژه سامانه‌های سودانی و ترکیبی مشاهده شده است. به‌عبارت دیگر، افزایش تابش خورشیدی و

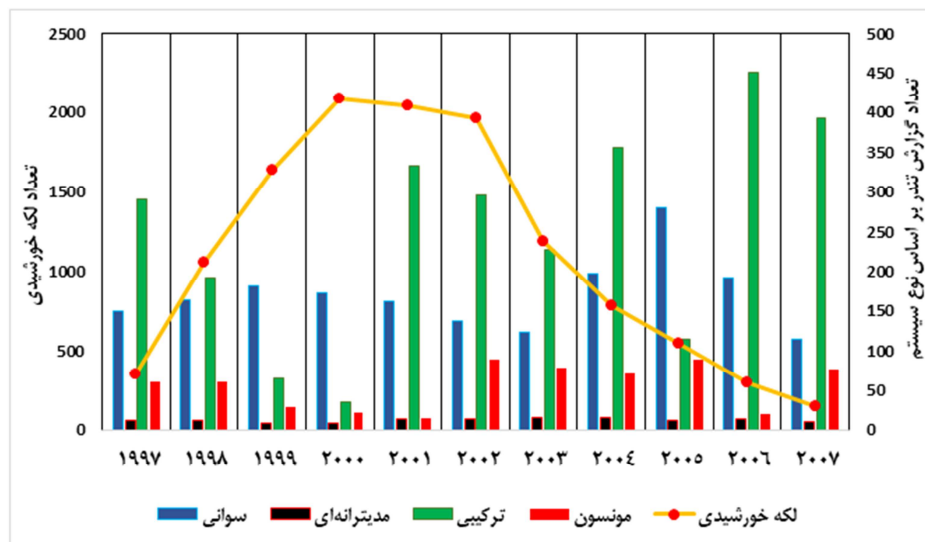
پیامدهای آن بر الگوی گردش عمومی جو می‌تواند زمینه‌ساز تضعیف فعالیت سامانه‌های گرمسیری، به‌ویژه سودانی‌ها و در نتیجه کاهش فراوانی و دامنه‌ی نفوذ آن‌ها باشد.



شکل ۳: فراوانی رخداد و تعداد گزارشات تندر جنوب غرب براساس الگوهای همدید موثر و تعداد لکه خورشیدی در چرخه ۲۲ (۱۹۸۶-۱۹۹۶)

### فراوانی رخداد طوفان‌های تندری براساس سامانه‌ها و الگوهای همدیدی موثر در چرخه خورشیدی ۲۳

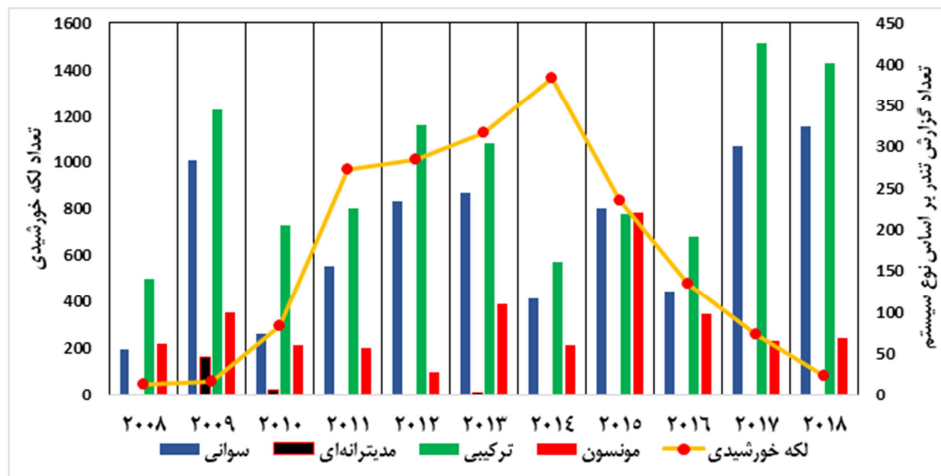
بر اساس اطلاعات ارائه‌شده در شکل ۴ و در چارچوب تحلیل‌های همدیدی مرتبط با چرخه خورشیدی شماره ۲۳، مشخص می‌شود که سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای بیشترین تأثیرگذاری را بر نواحی جنوب‌غربی کشور طی این دوره داشته‌اند. در رتبه‌ی دوم، سامانه‌های سودانی با اختلافی اندک ایفای نقش کرده‌اند و پس از آن، الگوهای مونسونی در جایگاه سوم قرار دارند. این توزیع فراوانی، بیانگر آن است که سامانه‌های سودانی و ترکیبی، به‌دلیل سازگاری با شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی منطقه، از انسجام و نفوذپذیری بالاتری برخوردار بوده‌اند. درحالی‌که سامانه‌های مدیترانه‌ای، به‌دلیل موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه که در عرض‌های پایین‌تری نسبت به نواحی شمالی‌تر واقع شده است، کمتر قادر به نفوذ مستقل در منطقه بوده و بیشتر در قالب الگوهای ترکیبی با سامانه‌های سودانی فعال شده‌اند. تحلیل هم‌زمان تغییرات تعداد لکه‌های خورشیدی با فراوانی سامانه‌های جوی نشان می‌دهد که با کاهش تعداد لکه‌های خورشیدی در سال‌های پایانی چرخه که نمایانگر کاهش فعالیت خورشیدی است، شدت و فراوانی سامانه‌های جوی وابسته به منابع انرژی خورشیدی افزایش یافته است. به‌طور مشخص، در چرخه‌ی بیست‌وسوم خورشیدی (۱۹۹۷-۲۰۰۷)، تعداد لکه‌ها در آغاز چرخه (۱۹۹۷) در پایین‌ترین سطح قرار داشته و در فاصله‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ به اوج خود رسیده است. با این حال، برخلاف انتظار مبتنی بر رابطه‌ی معکوس میان فعالیت خورشیدی و فراوانی سامانه‌ها، در همین دوره‌ی اوج خورشیدی، افزایشی در فراوانی سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای مشاهده شده است.



شکل ۴: فراوانی رخداد و تعداد گزارشات تندر جنوب غرب براساس الگوهای همدید موثر و تعداد لکه خورشیدی در چرخه ۲۳ (۱۹۹۷-۲۰۰۷)

**فراوانی رخداد طوفان‌های تندری براساس سامانه‌ها و الگوهای همدیدی موثر در چرخه ۲۴ خورشیدی**

در شکل ۵، تأثیرات تغییرات همدیدی در طی چرخه ۲۴ خورشیدی بر منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. در این دوره، سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای همچنان بالاترین میزان نفوذ را در جنوب منطقه دارند. سامانه‌های مدیترانه‌ای در عمده سال‌ها، پایین‌ترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند. تعداد لکه‌های خورشیدی در این چرخه از حدود مقادیر پایین در ابتدای دوره (۲۰۰۸-۲۰۱۰) به اوج خود در بازه ۲۰۱۳-۲۰۱۴ می‌رسد و پس از آن، روندی برگشتی تا سال ۲۰۱۸ را تجربه می‌کند. روند تغییرات لکه‌های خورشیدی هرچند می‌تواند با تغییراتی در شدت و فراوانی فعالیت سامانه‌های همدیدی مرتبط باشد، اما این ارتباط همواره رابطه‌ای مستقیم و یکنواخت نمی‌باشد. در واقع ارتباطات غیرمستقیم بین تغییرات خورشیدی و فراوانی سامانه‌ها، بیانگر پیچیدگی‌های دوجانبه‌ای است که از هم‌تأثیرگذاری تابش خورشیدی، برهم‌کنش با ویژگی‌های جغرافیایی منطقه و تغییرات اقلیمی در مقیاس بزرگ‌مقیاس حاصل می‌شود. باین‌حال، باید توجه داشت که علاوه بر چرخه‌های خورشیدی، عوامل متعددی نیز می‌توانند در شکل‌گیری و تغییرات فراوانی طوفان‌های تندری نقش داشته باشند که بررسی هم‌زمان آن‌ها برای دستیابی به تحلیل دقیق‌تر ضروری است.



شکل ۵: فراوانی رخداد و تعداد گزارشات تندر جنوب غرب براساس الگوهای همدید مؤثر و تعداد لکه خورشیدی در چرخه ۲۴ (۲۰۱۸-۲۰۰۸)

### تحلیل همدیدی الگوهای پر تکرار در ایجاد طوفان‌های تندری جنوب غرب ایران

در این بخش از پژوهش، الگوهای همدیدی مؤثر در شکل‌گیری طوفان‌های تندری در نواحی جنوب غربی ایران مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحلیل انجام‌شده بر روی ۱۷۸ سامانه منجر به طوفان تندری طی بازه زمانی سه چرخه خورشیدی اخیر (سیکل‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴، معادل سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸)، نشان می‌دهد که طوفان‌های تندری در این منطقه بیشتر از سه الگوی همدیدی مشخص تبعیت می‌کنند. این الگوها بر پایه ویژگی‌های سامانه‌های چرخندی تأثیرگذار و نحوه استقرار آن‌ها در منطقه استخراج شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل، سه نوع سامانه‌ی عمده در تکوین طوفان‌های تندری شناسایی شدند که شامل سامانه‌ی کم‌فشار سودانی، سامانه‌ی کم‌فشار مونسونی و الگوی ترکیبی حاصل از ادغام سامانه‌ی سودانی با سیکلون‌های مدیترانه‌ای است. در این میان، دو الگوی نخست یعنی سامانه‌ی سودانی و الگوی ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای، از بیشترین فراوانی در میان سامانه‌های بررسی شده برخوردار بوده‌اند. به نظر می‌رسد حضور هم‌زمان رطوبت گرمسیری، ناپایداری همرفتی و ویژگی‌های دینامیکی ناشی از ادغام این سامانه‌ها، زمینه‌ساز بیشترین رخداد‌های تندری در منطقه شده است. این موضوع اهمیت نقش سامانه‌های سودانی (چه به صورت مستقل و چه در قالب تعامل با الگوهای مدیترانه‌ای) را در تحریک و توسعه‌ی شرایط همرفتی مؤثر بر طوفان‌های تندری در جنوب غرب ایران برجسته می‌سازد.

تحلیل سه نمودار مربوط به سه چرخه خورشیدی که در آن‌ها فراوانی الگوهای همدیدی با تعداد لکه‌های خورشیدی مقایسه شده است، دو نتیجه کلیدی را آشکار می‌سازد. نخست، در هر سه چرخه، تعداد سامانه‌های همراه با طوفان تندری در نیمه نخست چرخه (پنج سال ابتدایی)، به‌ویژه در سال‌های نزدیک به اوج فعالیت لکه‌های خورشیدی، کاهش معناداری را نشان می‌دهد؛ در مقابل، در نیمه دوم چرخه (پنج سال پایانی) این فراوانی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. دوم، سهم چشمگیر سامانه‌های ترکیبی در میان سایر الگوهای همدیدی حاکی از نقش برجسته آن‌ها در بروز این پدیده‌هاست. به‌طور خاص، شکل‌گیری یک طوفان تندری نیازمند وجود رطوبت فراوان انتقال‌یافته به درون سامانه سودانی و جابه‌جایی این رطوبت به سمت شمال است. هم‌زمان، ادغام سامانه مدیترانه‌ای با این ساختار، انرژی دینامیکی لازم برای تشدید جریانات صعودی و در نهایت تکوین طوفان‌های تندری را فراهم می‌سازد.

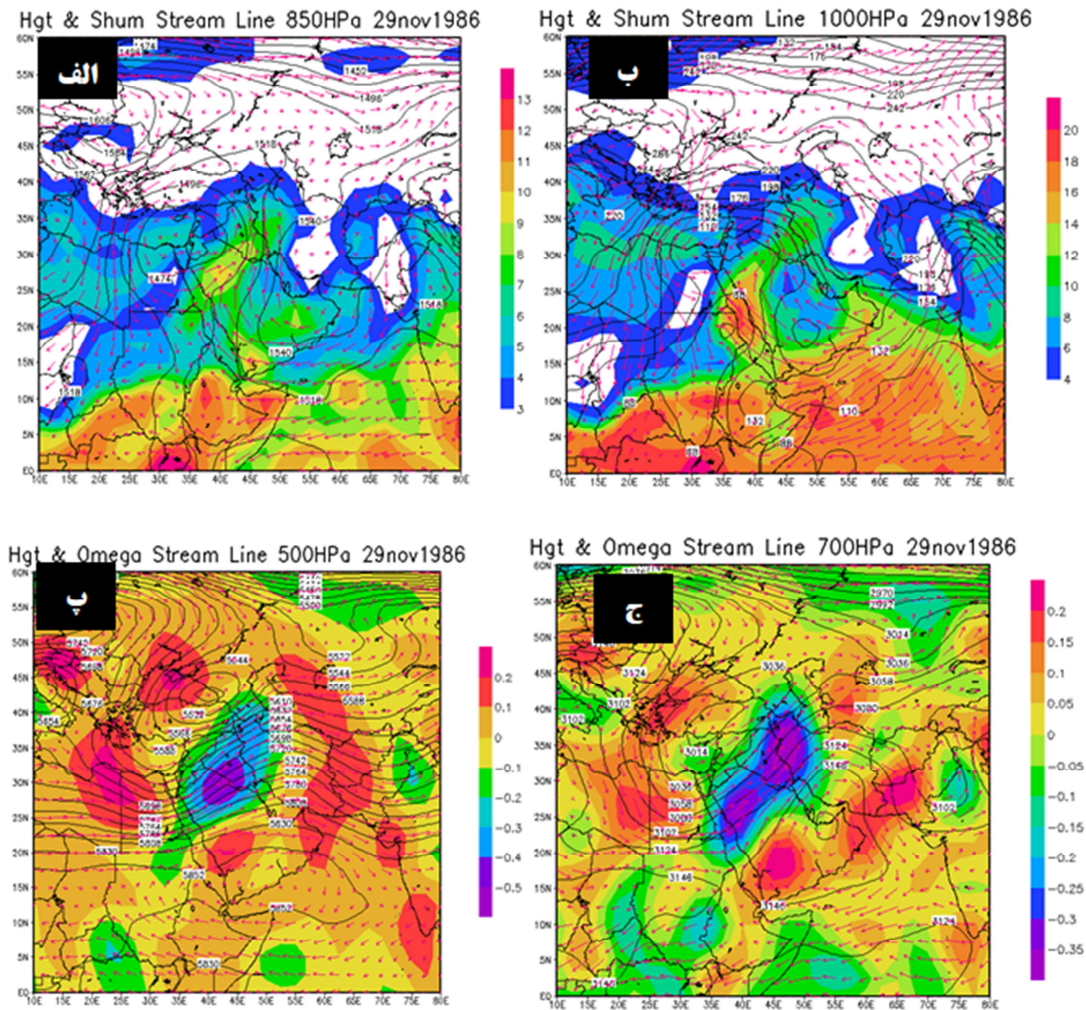
**الگوی کم‌فشار سودانی (الگوی نماینده سامانه ۲۹ نوامبر ۱۹۸۶)**

شکل ۶ - الف، نحوه‌ی آرایش و استقرار سامانه‌های جوی مؤثر بر شکل‌گیری یکی از رخداد‌های قوی طوفان تندری در نواحی جنوب‌غربی ایران را نشان می‌دهد. در این روز پدیده‌ی تندر و رعد و برق در بازه‌ی زمانی دو نوبت دیده‌بانی و در پنج ایستگاه از ایستگاه‌های منتخب منطقه ثبت شده است. بیشترین تعداد وقوع تندر از ایستگاه دزفول گزارش شده که بیانگر شدت ناپایداری همرفتی و تمرکز فعالیت سامانه‌ی عامل در این ناحیه بوده است. در این الگو سامانه‌های اصلی مؤثر در شکل‌گیری تندر بر روی منطقه در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (به‌عنوان نماینده تراز زیرین وردسپهر) کم‌فشار سودان و زبانه توسعه‌یافته آن بر روی خلیج فارس و منطقه جنوب غرب و غرب ایران می‌باشد. تندباد‌های ایجاد‌شده بر روی دریاهای عمان و عرب به‌وسیله مرکز واچرخندی عربستان، در گردشی واچرخندی رطوبت این دریاهای گرم را در دو بخش به درون سامانه‌های کم‌فشاری مستقر بر روی سودان و زبانه شمالی آن بر روی عربستان فرارفت نموده است. تندی این بادها بر روی دریاهای عرب و عمان و در ادامه بر روی تمام پهنه شبه-جزیره عربستان به بیش از ۲۰ نات بر ثانیه می‌رسد. این تندی بیانگر شیو فشاری و ژئوپتانسیلی شدید بر روی منطقه می‌باشد. همان‌طور که در نقشه مشهود است، بخشی از رطوبت ورودی به منطقه از طریق جریانات شرقی - جنوب‌شرقی بر روی سواحل شرقی شبه‌جزیره عربستان فرارفت شده و بخش دیگری نیز به واسطه جریانات شرقی به درون خلیج عدن و در ادامه به درون منطقه همگرایی ایجاد‌شده بر روی دریای سرخ فرارفت شده است. میدان‌های رطوبتی شکل‌گرفته بر روی این دو منطقه حاصل فرارفت رطوبتی از طریق این جریان واچرخندی می‌باشد. به‌طوری-که مقادیر نم ویژه بر روی منطقه همگرایی دریای سرخ به بیش از ۱۸ تا ۲۲ گرم بر کیلوگرم و بر روی استان خوزستان به بیش از ۱۰ تا ۱۴ گرم بر کیلوگرم رسیده است. این مقدار نم ویژه در لایه زیرین وردسپهر انرژی ترمودینامیکی لازم برای شکل‌گیری جریانات همرفتی قوی و در نهایت طوفان‌های تندری فراهم شده است.

شکل شماره ۶ - ب، شرایط همدیدی حاکم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال یا حد بالایی لایه مرزی را در این روز نشان می‌دهد. در این تراز با دور شدن از واداشتهای سطحی سامانه‌های با ماهیت دینامیکی تقویت است. در انطباق با الگوی تراز زیرین، همچنان زبانه‌ای با راستای شمالی - جنوبی پس از عبور از نیمه شرقی ایران بر روی آب‌های گرم دریاهای عمان و عرب گسترش یافته و تا خلیج عدن امتداد می‌یابد. همچنان تندباد‌های حاکم بر روی این دریاها رطوبت قابل‌توجهی را در گردشی واچرخند به جلو زبانه کم‌فشار سودانی فرارفت می‌نماید. میدان رطوبتی شکل‌گرفته بر روی شبه‌جزیره عربستان حاصل این گردش واچرخندی است. این رطوبت در امتداد جریانات جلو ناوه بر روی بخش جنوب غربی ایران فرارفت شده است.

شکل شماره ۶ - پ، نقشه ترکیبی بردار باد و جریانات بالاسوی حاکم در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال را بر روی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. انرژی ترمودینامیکی ایجاد‌شده در ترازهای زیرین وردسپهر نیازمند جریانات بالاسوی قوی می‌باشد تا بتواند جریانات همرفتی ایجادکننده تندر را تقویت نماید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میدانی از امگای منفی گسترده با راستایی جنوب غربی - شمال شرقی از دریای سرخ تا جنوب غرب ایران شکل گرفته است. میدانی از امگای منفی با بزرگای منفی ۰,۳۵ پاسکال بر ثانیه بر روی منطقه مطالعاتی ایجاد شده است که بیانگر حاکمیت جریانات بالاسوی قوی در این منطقه است. این جریانات بالاسوی قوی شرایط ایجاد تندرهای قوی را بر روی منطقه فراهم نموده است. شکل شماره ۶ - ج، شرایط همدیدی حاکم در تراز میانی وردسپهر (تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال) را نمایش می‌دهد. در انطباق با جریانات بالاسوی قوی حاکم در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در تراز میانی

نیز ناوه عمیقی در شرق مدیترانه که دامنه آن در امتداد جنوبی تا جنوب عربستان و دریای سرخ و دامنه شرقی آن تا نیمه غربی ایران را در بر می‌گیرد، تکوین پیدا کرده است. در یال شرقی ناوه میدانی با امگای منفی با بزرگای منفی ۰.۵ پاسکال بر ثانیه بر روی جنوب غرب ایران تکوین پیدا کرده است. به این ترتیب در ضخامت قابل توجهی از وردسپهر جریانات بالاسوی قوی شرایط همرفتی قوی را برای شکل‌گیری تندرهای قوی بر روی بخش جنوب غربی ایران فراهم نموده است.



شکل ۶: الف: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم و بزه (سایه‌های رنگی) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم و بزه (سایه‌های رنگی) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم و بزه (سایه‌های رنگی) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ج: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

**الگوی ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای (الگوی نماینده سامانه ۱۰ دسامبر ۲۰۱۰)**

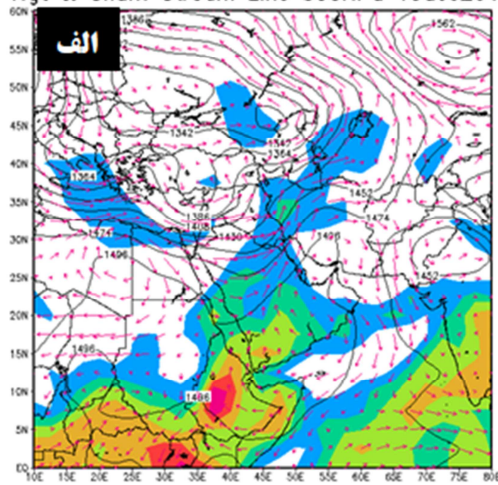
شکل ۷ - الف، الگوی استقرار سامانه‌های جوی مؤثر در شکل‌گیری یکی دیگر از رخداد‌های شدید طوفان تندری در جنوب غربی ایران را نمایش می‌دهد. طی این روز، پدیده‌ی تندر و رعدوبرق طی سه نوبت دیده‌بانی در سیزده ایستگاه از ایستگاه‌های منتخب منطقه ثبت شده است. بیشترین تعداد وقوع تندر از سوی ایستگاه کوه‌رنگ گزارش شده است.

در این الگو، سامانه جوی اصلی مؤثر در شکل‌گیری پدیده‌ی تندری در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال به‌عنوان نماینده‌ی لایه‌ی زیرین وردسپهر، سیکلون مدیترانه‌ای می‌باشد. ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود، آرایش همدیدی سامانه‌های مؤثر به گونه‌ای است که رطوبت مورد نیاز سامانه از دریا‌های گرم جنوبی تامین شده است. در این روز مرکز و اچرخندی در امتداد زبانه پرفشار سیبری با پربند ۱۳۲ ژئوپتانسیل متر در مرکز ایران بسته شده است. گردش و اچرخندی ایجاد شده به‌وسیله این مرکز و اچرخندی سبب فرارفت رطوبت دریای عمان و خلیج فارس بر روی جنوب غرب ایران در تراز زیرین وردسپهر را فراهم نموده است. تندبادهای ایجاد شده بر روی دریا‌های عمان در اطراف مرکز و اچرخندی عربستان که هم اکنون بر روی شرق خلیج عدن استقرار دارد، در گردشی و اچرخندی رطوبت دریا‌های گرم عرب و عمان را بر روی شبه‌جزیره عربستان فرارفت نموده است.

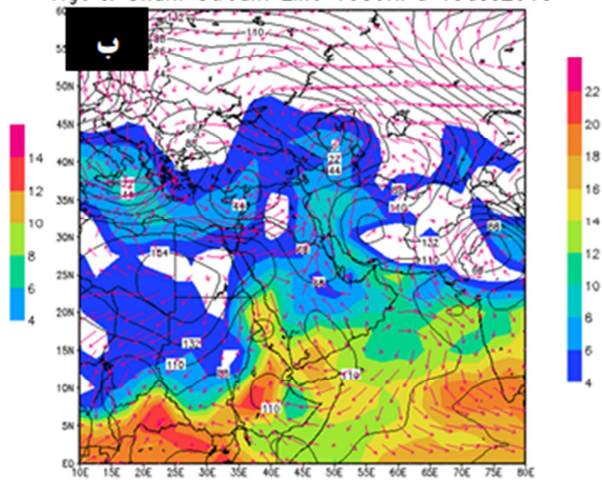
شکل شماره ۷ - ب، شرایط همدیدی حاکم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال را در این روز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این تراز با دور شدن از واداشتهای سطحی سامانه‌ها با ماهیت دینامیکی تقویت شده و ناوه عمیقی با راستای شمالی - جنوبی تمام پهنه غربی ایران تا جنوب شبه‌جزیره عربستان را فرا گرفته است. در نتیجه، جریانات جنوب - جنوب غربی جلو ناوه رطوبت انباشته شده بر روی شبه‌جزیره عربستان را در لایه زیرین وردسپهر بر روی منطقه فرارفت شده بود، بر روی منطقه جنوب غرب و غرب ایران فرارفت نموده است.

شکل شماره ۷ - پ و ج، نقشه ترکیبی بردار باد و جریانات بالاسوی حاکم بر روی منطقه مورد مطالعه را در تراز ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد. در ترازهای بالایی به‌دلیل فرارت سرد عرض‌های جنب قطبی از طریق جریانات شمالی پشت ناوه و فرارت هوای گرم و مرطوب از عرض‌های جنوبی در جلو ناوه و ترمودینامیک قوی حاصل از آن ناوه شرق مدیترانه بیش از پیش تقویت شده است. به‌طوری که دامنه جنوبی ناوه تا جنوب دریای سرخ گسترش یافته است. فرارفت رطوبتی قوی در ترازهای زیرین و میانی جو و تامین انرژی ترمودینامیکی قوی برای ایجاد جریانات همرفتی در جنوب غرب و غرب ایران، میدان امگای منفی قوی در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال فراهم شده است. این نشان‌دهنده شکل‌گیری جریانات همرفتی قوی و در نهایت طوفان‌های تندری بر روی منطقه است. بزرگای مقادیر امگای منفی در هر دو تراز به بیش از منفی ۰٫۵ پاسکال بر ثانیه افزایش یافته است که برای ایجاد تندری‌های رعد و برق قوی انرژی مناسبی می‌باشد.

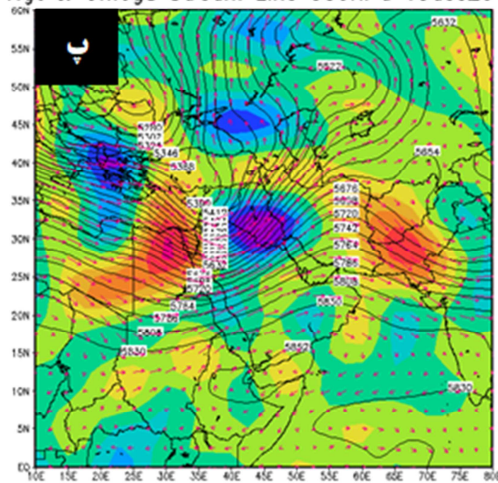
Hgt &amp; Shum Stream Line 850HPa 13dec2010



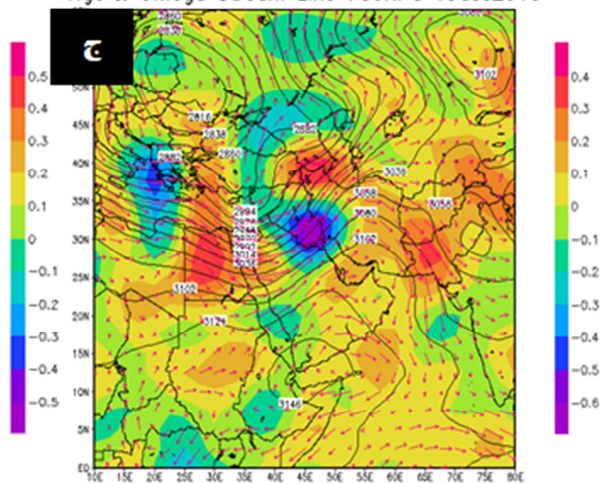
Hgt &amp; Shum Stream Line 1000HPa 13dec2010



Hgt &amp; Omega Stream Line 500HPa 13dec2010



Hgt &amp; Omega Stream Line 700HPa 13dec2010



شکل ۷: الف: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم ویژه (سایه‌های رنگی) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم ویژه (سایه‌های رنگی) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم ویژه (سایه‌های رنگی) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ج: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

### نتیجه‌گیری

مخاطرات طبیعی، سالانه جان هزاران نفر را در سراسر جهان تهدید می‌کنند و بخش قابل توجهی از این تلفات ناشی از پدیده‌های اقلیمی است. در این میان، طوفان‌های تندری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات جوی، نقش چشمگیری در ایجاد خسارت‌های گسترده به زیرساخت‌های حمل‌ونقل هوایی، زمینی و دریایی دارند. جنوب غرب ایران، به‌دلیل ساختار توپوگرافی ویژه، تأثیرپذیری از سامانه‌های جوی با منشاء حاره‌ای و دسترسی به منابع عظیم رطوبتی ناشی از دریاهای گرم جنوبی، از استعداد بالایی برای شکل‌گیری این پدیده برخوردار است. این پژوهش با هدف بررسی پیوندهای میان‌مقیاسی بین چرخه‌های خورشیدی و الگوهای همدیدی مؤثر بر پتانسیل تندری در این

منطقه انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که نوسانات فعالیت خورشیدی، به‌ویژه تغییرات در تعداد لکه‌های خورشیدی طی چرخه‌های ۲۲ تا ۲۴، با تغییرپذیری زمانی طوفان‌های تندری ارتباط آشکاری دارند. تحلیل‌ها حاکی از آن است که بیشینه وقوع این پدیده‌ها بیشتر در سال‌های پایانی هر چرخه و هم‌زمان با کمینه‌های خورشیدی رخ داده است؛ الگویی که در چرخه‌های ۲۲ و ۲۳ به وضوح مشاهده و در چرخه ۲۴ نیز با وجود کاهش کلی فعالیت خورشیدی تکرار شد. از دیدگاه همدیدی، نتایج نشان داد سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای و سامانه‌های سودانی، به دلیل انطباق با ویژگی‌های جغرافیایی منطقه، بیشترین نقش را در شکل‌گیری طوفان‌های تندری ایفا می‌کنند، درحالی‌که نقش سامانه‌های مونسونی محدود بوده و سامانه‌های مدیترانه‌ای بیشتر به صورت ترکیبی با سایر الگوها ظاهر شده‌اند. مقایسه چرخه‌های خورشیدی با فراوانی این سامانه‌ها، بیانگر کاهش فعالیت سامانه‌های گرمسیری در دوره‌های اوج خورشیدی و افزایش آن‌ها در کمینه‌های خورشیدی است. این الگوها مؤید آن است که تابش خورشیدی از طریق سازوکارهای غیرمستقیم و چندوجهی، بر گردش عمومی جو و سامانه‌های اقلیمی اثر می‌گذارد و می‌تواند با تعدیل ساختارهای دینامیکی و ترمودینامیکی جو، در بروز و فراوانی پدیده‌های همرفتی نقش آفرینی کند. در نتیجه، ادغام شاخص‌های خورشیدی در مدل‌های اقلیمی و پیش‌بینی‌های میان‌مدت و بلندمدت پدیده‌های حدی، می‌تواند موجب ارتقاء دقت سامانه‌های هشدار زودهنگام و بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت مخاطرات اقلیمی در مناطق نیمه‌خشک و آسیب‌پذیر شود.

تحلیل‌های همدیدی و ترمودینامیکی مرتبط با رخداد‌های ۲۹ نوامبر ۱۹۸۶ و ۱۳ دسامبر ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که طوفان‌های تندری شدید در جنوب غرب ایران در نتیجه تعامل پیچیده سامانه کم‌فشار مدیترانه‌ای در تراز میانی و پرفشار عربستان در ترازهای پایین شکل گرفته‌اند. این برهم‌کنش موجب انتقال رطوبت مؤثر، افزایش ناپایداری جو و تقویت صعود همرفتی شده و زمینه‌ساز وقوع این طوفان‌ها شده است. این یافته‌ها با نتایج فلک و همکاران (۱۴۰۰) در زمینه تحلیل ترمودینامیکی طوفان‌های تندری جنوب کشور هم‌راستا بوده و اهمیت شناسایی الگوهای ترکیبی جوی را در پیش‌بینی دقیق‌تر چنین پدیده‌هایی برجسته می‌سازد.

در تاریخ ۱۳ دسامبر ۲۰۱۰، تحلیل‌های همدیدی و ترمودینامیکی نشان داد که شکل‌گیری و تقویت طوفان‌های تندری در جنوب غرب ایران تحت تأثیر هم‌زمان سه سامانه عمده شامل پرفشار سبیری، کم‌فشار سودانی و سیکلون مدیترانه‌ای رخ داده است. این سامانه‌ها با برقراری جریان‌های واچرخندی در ترازهای پایین، نقش مهمی در انتقال رطوبت از دریای عرب و دریای عمان به عرض‌های بالاتر ایفا کرده و موجب فراهم شدن انرژی ناپایدار ساز مورد نیاز برای توسعه همرفت عمیق شدند. مطابق با نتایج ایران‌پور و همکاران (۱۳۹۴)، ورود هوای سرد به لایه‌های میانی جو، در کنار نفوذ جریان‌های گرم و مرطوب از جنوب، به تشدید فرآیندهای صعودی و افزایش ناپایداری ترمودینامیکی منجر شده است. علاوه بر این، در ترازهای میانی و ردسپهر (۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال)، وجود جریانات قوی بالارونده، ناهه‌های عمیق در شرق مدیترانه و جنوب شبه‌جزیره عربستان، به همراه میدان‌های امگای منفی، محیط مناسبی برای رشد ابرهای کومولونیمبوس و وقوع طوفان‌های تندری فراهم کرده است. این تحلیل‌ها با یافته‌های گرمی و همکاران (۱۴۰۱) نیز هم‌راستا بوده و تأییدکننده نقش هم‌زمان سامانه‌های دینامیکی و شرایط ترمودینامیکی در تقویت این پدیده‌ها هستند.

در تاریخ ۲۹ نوامبر ۱۹۸۶، شکل‌گیری و گسترش سامانه کم‌فشار سودانی، نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع طوفان‌های تندری شدید در جنوب غرب ایران ایفا کرد. این سامانه که در ابتدا بر فراز شبه‌جزیره عربستان توسعه یافت، با حرکت

به سوی عرض‌های بالاتر، به‌ویژه مناطق جنوبی ایران، شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی مساعدی برای رشد ناپایداری‌های همرفتی فراهم آورد. در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، ساختار چرخندی سامانه با دو تا سه کنتور بسته در نواحی ریاض و جنوب خلیج فارس مستقر شده بود که در ادامه، استان‌های بوشهر، فارس، چهارمحال و بختیاری و جنوب خوزستان را تحت تأثیر قرار داد. برخورد زبانه‌های کم‌فشار سودانی با زبانه‌های پرفشار سیبری، منجر به انتقال مؤثر رطوبت از دریای عرب و دریای عمان به درون سامانه شد، به‌گونه‌ای که همگرایی حاصل از این تقابل، با یافته‌های خوش‌اخلاق و ماهوتچی (۱۳۹۸) و شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۷) هم‌راستا ارزیابی می‌شود. در لایه‌های میانی و بالایی وردسپهر، حضور سامانه‌های چرخندی عمیق، همراه با جریان‌های بالاسو و میدان‌های گسترده امگا و همچنین افزایش سرعت باد، موجب تقویت فرایند فرارفت رطوبت و تأمین انرژی بالقوه مورد نیاز برای توسعه طوفان‌های تندری شد. این شرایط در نهایت به شکل‌گیری طوفان‌های شدید و وقوع گسترده پدیده رعد و برق در مناطق جنوبی ایران انجامید.

## منابع

- ایران پور، فخرالدین؛ یزدان‌پناه، حجت‌اله؛ حنفی، علی. (۱۳۹۴). تحلیل همدیدی و ترمودینامیکی طوفان‌های تندری در ایستگاه‌های هواشناسی همدان. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۴(۱)، صص: ۱۱۵-۱۳۱. doi: 10.22067/geo.v4i1.27949
- برنا، رضا. (۱۳۹۷). بررسی آماری - همدیدی طوفان‌های تندری استان خوزستان. آمایش فضا و ژئوماتیک، ۲۲(۳)، ۲۵-۱. <http://hsmmp.modares.ac.ir/article-21-16524-fa.html>
- شمسی پور، علی اکبر؛ کاکلی، سیف‌اله؛ جاسمی، سیدمیثم؛ جعفری، ایوب. (۱۳۹۷). واکاوی همدیدی- ترمودینامیکی بارش‌های سنگین غرب و جنوب غرب ایران (مطالعه موردی ۱۲ تا ۱۵ آوریل ۲۰۱۶). جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۲(۶۴)، صص: ۱۴۹-۱۶۷.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ ماهوتچی، محمدحسن. (۱۳۹۸). واکاوی همدیدی بارش‌های تندری مخرب مشهد. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۱۲)، صص: ۲۳۵-۲۴۹. <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/837359>
- دانانیانی، پویک؛ سوره، احسان؛ محمدی، بختیار. (۱۴۰۲). بررسی طوفان‌های تندری در ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱۰(۲)، ۱۱۴-۹۲. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3418-fa.html>
- علیچانی، بهلول. (۱۳۸۲). آب‌وهوای ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ پنجم.
- عزیزی، قاسم؛ گرامی، محمدصالح؛ شریفی، لیلا. (۱۳۹۶). تحلیل فضایی طوفان‌های تندری در گستره کشور ایران. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷(۴۷)، صص: ۲۴۳-۲۵۹. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2914-fa.html>
- قویدل رحیمی یوسف، باغبانان پرستو، فرج‌زاده اصل منوچهر. (۱۳۹۳). تحلیل فضایی مخاطره‌ی طوفان‌های تندری بهاره‌ی ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱(۳)، صص: ۵۹-۷۰. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2348-fa.html>
- فدایی‌باش، علیرضا. (۱۴۰۳). تحلیل همدیدی و ترمودینامیکی طوفان‌های تندری در جنوب و جنوب غرب ایران در ۳ دهه اخیر (۱۹۸۶-۲۰۱۸). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما حسن لشکری، رشته آب‌وهواشناسی سینوپتیک، دانشگاه شهید بهشتی.
- فرجی، عبدالله؛ دوستکامیان، مهدی؛ صفری، زهرا. (۱۳۹۴). واکاوی همدیدی الگوهای زمانی و مکانی بارش‌های تندری (مطالعه موردی: استان زنجان)، جغرافیا و مطالعات محیطی، ۴(۱۴)، صص: ۴۶-۴۱.
- فلک، عسل؛ برنا، رضا؛ اسدیان، فریده. (۱۴۰۰). بررسی ترمودینامیک طوفان‌های تندری در جنوب غربی ایران. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۲۱(۶۲)، صص: ۴۳۵-۴۵۷. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3615-fa.html>
- گرامی، محمدصالح؛ کریمی، مصطفی؛ عزیزی، قاسم؛ رفعتی، سمیه. (۱۴۰۱). تحلیل همدیدی بارش‌های همراه با طوفان تندری فراگیر بهاره در شمال غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۴(۱)، صص: ۹۵-۱۱۰. doi: 10.22059/jphgr.2022.334160.1007659

- لشکری، حسن؛ محمدی، زینب؛ ناجی، محمد؛ فدایی باش، علیرضا. (۱۴۰۳). واکاوی پراکنش و تغییرات زمانی - مکانی طوفان‌های تندری در جنوب ایران در سه چرخه خورشیدی اخیر. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۶(۴)، صص: ۸۹-۱۰۶. doi: 10.22059/jphgr.2025.387701.1007864
- لشکری، حسن؛ یارمرادی، زهرا؛ موسوی، حسن. (۱۳۹۵). تحلیل آماری و سینوپتیکی طوفان‌های تندری استان کهگیلویه و بویراحمد. فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۵(۱۸)، صص: ۱۵۱-۱۳۵.
- لشکری، حسن؛ جنتی، زهرا. (۱۳۹۱). تحلیل سینوپتیکی-دینامیکی طوفان‌های تندری در جنوب غرب کشور. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۱(۸۲)، صص: ۱۴-۲۱.
- لشکری حسن، جعفری مهناز. (۱۴۰۰). الگوهای همدید تعیین‌کننده مسیر حرکت سامانه‌های بارشی با منشاء سودانی. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۸(۱)، صص: ۷۸-۵۵. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3104-fa.html>
- لشکری، حسن. (۱۳۸۲). مکانیسم تکوین - تقویت و توسعه مرکز کم فشار سودان و نقش آن بر روی بارش‌های جنوب و جنوب غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۵(۳).
- لشکری، حسن؛ آقاسی، نوشین. (۱۳۹۲). تحلیل سینوپتیکی طوفان‌های تندری تبریز در فاصله زمانی (۲۰۰۵-۱۹۹۶). جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۷(۴۵)، صص: ۲۰۳-۲۳۴.
- مرکز آمار ایران. (۱۳۹۵). داده‌ها و اطلاعات آماری، برگرفته از: [www.amar.org.ir](http://www.amar.org.ir)
- معصوم‌پور سماکوش، جعفر؛ طاهری، فاطمه؛ کوشکی، سمیرا؛ تازارک، ماتیوز. (۱۴۰۱). تأثیر سامانه‌های سینوپتیکی بزرگ مقیاس بر وقوع فراگیر طوفان تندری غرب و شمال غرب ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۱(۵۱)، صص: ۱۴۷-۱۶۲.
- معصوم‌پور سماکوش، جعفر؛ میری، مرتضی؛ رحیمی، مجتبی. (۱۳۹۵). واکاوی آماری - همدیدی طوفان‌های تندری سواحل جنوبی ایران. فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، صص: ۶۹۷-۷۰۸. doi: 10.22059/jesphys.2016.58912
- مجرد، فیروز؛ معصوم‌پور، جعفر؛ کوشکی، سمیرا؛ میری، مرتضی. (۱۳۹۸). تحلیل زمانی - مکانی طوفان‌های تندری در ایران. مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۲۹(۳۲)، صص: ۲۱۳-۲۳۲. doi: 10.30488/gps.2019.91873
- محمدی، زینب؛ لشکری، حسن. (۱۳۹۷). نقش جابه‌جایی مکانی پرفشار عربستان و رودباد جنب‌حاره‌ای در الگوهای همدیدی و ترمودینامیکی ترسالی‌های شدید جنوب و جنوب غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۰(۳)، صص: ۴۹۱-۵۰۹. doi: 10.22059/jphgr.2018.249422.1007165
- محمدی، فهیمه؛ لشکری، حسن. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات بارش سامانه کم‌فشار سودان طی روند تاریخی در منطقه جنوب غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۱(۲)، صص: ۳۷۳-۳۸۷. doi: 10.22059/jphgr.2019.272706.1007323
- محمدی، حسین؛ خزایی، مهدی؛ ماهوتچی، محمدحسن؛ عباسی، اسماعیل. (۱۳۹۵). تحلیل همدیدی طوفان‌های تندری مخرب اهواز. مدیریت مخاطرات محیطی، ۳(۲)، صص: ۱۵۵-۱۷۰. doi: 10.22059/jhsci.2016.60744
- Adelekan, I. O. 1998. Spatio-temporal variations in thunderstorm rainfall over Nigeria. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(11), 1273-1284. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199809\)18:11<1273::AID-JOC298>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199809)18:11<1273::AID-JOC298>3.0.CO;2-4)
- Barry, R. G., & Hall-McKim, E. A. 2014. *Essentials of the Earth's climate system*. Cambridge University Press.
- Dai, A. 2001. Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part I: Seasonal and interannual variations. *Journal of Climate*, 14(6), 1092-1111. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1092:GPATFP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1092:GPATFP>2.0.CO;2)
- Ibrahim, S. F., Hafez, N. K., El-Borie, M. A., Bishara, A. A., & El-Taher, A. M. (2025). NS Asymmetry and Periodicity of Solar Activity from Solar Cycles 21–24. *Solar Physics*, 300(3), 1-27. <https://doi.org/10.1007/s11207-025-02442-y>
- Loginov, V. F., Volchek, A. A., & Shpoka, I. N. (2010). Estimation of the role of various factors in the thunderstorm formation on the territory of Belarus. *Russian Meteorology and Hydrology*, 35, 175-181. <https://doi.org/10.3103/S1068373910030039>
- Pinto Jr, O., Pinto, I. R. C. A., & Ferro, M. A. S. (2013). A study of the long-term variability of thunderstorm days in southeast Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5231-5246. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50282>
- Pizzuti, A., Soula, S., Mlynarczyk, J., Bennett, A., & Fullekrug, M. (2020, March). Analysis of sprite events during small-scale winter thunderstorms in northern Europe. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 20065).
- Taszarek, M., Allen, J. T., Groenemeijer, P., Edwards, R., Brooks, H. E., Chmielewski, V., & Enno, S. E. (2020). Severe convective storms across Europe and the United States. Part I: Climatology of lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. *Journal of Climate*, 33(23), 10239-10261. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0345.1>

Tafferner, A., Forster, C., Hagen, M., Keil, C., Zinner, T., & Volkert, H. (2008). Development and propagation of severe thunderstorms in the Upper Danube catchment area: Towards an integrated nowcasting and forecasting system using real-time data and high-resolution simulations. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 101, 211-227.

<https://doi.org/10.1007/s00703-008-0322-7>

Galanaki, E., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Flaounas, E., & Argiriou, A. (2018). Thunderstorm climatology in the Mediterranean using cloud-to-ground lightning observations. *Atmospheric Research*, 207, 136-144.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.03.004>.