



Synoptic Analysis of Patterns Influencing the Occurrence of Thunderstorms in Tehran Province

Mina Daneshvar¹, Hassan Lashkari^{2*}, Reza Borna³

¹ Department of Climatology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Department of Geography, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 23 July 2026

Revised: 27 September 2026

Accepted: 01 October 2026

Available Online:

05 October 2026

Keywords:

Synoptic Patterns

Thunderstorms

Tehran Province

Convective Systems

Synoptic Climatology

ABSTRACT

Thunderstorms are among the most important short-term atmospheric hazards in urban and piedmont areas, and identifying the synoptic patterns governing their occurrence is of great importance for climatic risk management. The present study was conducted to investigate the synoptic patterns influencing thunderstorm occurrences in Tehran Province during solar cycles 22, 23, and 24 over the statistical period 1986–2019. For this purpose, daily data from synoptic stations in Tehran Province, based on the present weather code ww, were obtained from the Iran Meteorological Organization and, after quality control, thunderstorm events were identified according to the criteria of spatial simultaneity and repeated observations. The events were then classified according to duration, from one-day to five-day and longer events, and the 90th percentile threshold was used to extract extreme cases. Atmospheric data related to the selected samples were acquired from the NCEP/NCAR reanalysis database at the 1000, 925, 850, 700, and 500 hPa levels, and composite maps of geopotential height, specific humidity, wind components, and omega were prepared and analyzed. The results showed that more than 70% of thunderstorm systems in Tehran Province had a one-day duration, and that the highest frequency of occurrences was mainly observed in spring, especially in April and May. Among the 49 extreme one-day systems, 14 synoptic patterns were identified, of which the “Saudi Low–Migratory High,” “Pakistan Low–Migratory High,” and “Sudan Low–European Cyclone” patterns had the highest frequencies. The findings indicate that the coincidence of low-level moisture advection, dynamic instability in the middle troposphere, and the role of the Alborz topography constitutes the main mechanism for the development of extreme thunderstorms in Tehran Province.

* Corresponding author: Hassan Lashkari

E-mail address: h-lashkari@sbu.ac.ir

How to cite this article: Daneshvar, M., Lashkari, H., & Borna, R. (2026). Synoptic Analysis of Patterns Influencing the Occurrence of Thunderstorms in Tehran Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 2(2), 2-?. <https://doi.org/10.22067/geoh.2026.100019.1687>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Thunderstorms are among the most significant short term and high impact atmospheric hazards, primarily due to their abrupt onset and their capacity to produce destructive phenomena such as severe downbursts, intense rainfall, hail, lightning strikes, and sudden reductions in visibility. These events can disrupt transportation networks, damage energy infrastructures, threaten public safety, and impose substantial economic losses. In this context, Tehran Province—characterized by its dense population, concentrated urban development, and critical infrastructures, including airports, power facilities, and communication networks—is considered one of the most vulnerable regions to convective hazards in Iran. Its location along the southern foothills of the Alborz Mountains creates a unique atmospheric environment in which large scale synoptic systems, regional scale circulations, and local topographic processes interact. These interactions often enhance atmospheric instability and intensify convective development. Despite the importance of this hazard, comprehensive synoptic studies focusing on thunderstorm events in Tehran remain limited. Accordingly, the present study aims to identify, classify, and analyze the dominant synoptic patterns associated with severe thunderstorm occurrences in Tehran Province, in order to provide a scientific foundation for improved forecasting, hazard assessment, and early warning development. The novelty of this study lies in integrating an objective 90th-percentile statistical threshold with a multi-decadal chronological classification based on solar cycles (22–24) to evaluate the recurrence and dynamic configurations of multi-level synoptic patterns (MSLP, 850, and 500 hPa) governing high-impact convective storms over the complex topography of Tehran Province.

Material and Methods

This research follows an applied and descriptive–analytical approach. The database consists of all thunderstorm events recorded at synoptic stations across Tehran Province during the 1986–2019 period, which covers solar cycles 22, 23, and 24. Thunderstorm days were identified using present weather codes (*ww*) obtained from the Iran Meteorological Organization. The data underwent a rigorous quality-control process to ensure temporal continuity, observational consistency, and spatial coherence among stations. Thunderstorm occurrences were then filtered based on spatial simultaneity and repeated observations across the stations. To assess temporal persistence, events were classified into one-day, two-day, three-day, four-day, and five-day-plus systems. Extreme cases were extracted using the 90th percentile (*P90*) threshold to differentiate high-impact events from ordinary ones. After identifying extreme events, atmospheric variables associated with each case were extracted from the NCEP/NCAR reanalysis database at standard pressure levels of 1000, 925, 850, 700, and 500 hPa. Variables included geopotential height, specific humidity, zonal and meridional wind components, and vertical velocity (*omega*). Composite maps were generated for each extreme event, and synoptic patterns were diagnosed through comparative and overlay analyses. This process allowed the recognition of distinct synoptic configurations and the extraction of their governing atmospheric mechanisms. Finally, a frequency analysis was conducted to determine the most recurrent synoptic structures responsible for severe convective activity in Tehran Province.

Results and Discussion

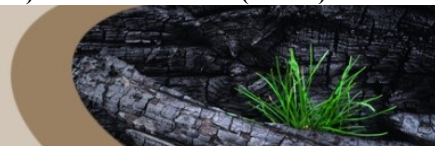
Statistical analysis indicates that thunderstorms in Tehran are predominantly short-lived, with over 70% classified as one-day events. Seasonally, activity peaks during April and May, driven by the synergy of intensified surface heating, moisture availability, and thermodynamic instability during this transition period. Synoptic evaluation of the 49 selected events identified 14 distinct patterns, with three configurations proving most recurrent and influential: (1) Saudi Low–Migratory High, (2) Pakistan Low–Migratory High, and (3) Sudan Low–European Cyclone.

In the first two configurations, the juxtaposition of thermal lows over the Arabian Peninsula or Pakistan with migrating anticyclones generates robust pressure gradients, promoting strong lower-tropospheric convergence and enhancing upward motion along the Alborz foothills. The third pattern, involving the Sudan Low coupled with an upper-level European cyclone, fosters a dynamically active environment characterized by enhanced cyclonic vorticity, widespread vertical motion, and intense thermodynamic instability. Moisture advection analysis confirms that the Persian Gulf and Gulf of

Oman serve as the primary moisture sources, while the Caspian Sea occasionally contributes supplementary water vapor. When this moisture influx coincides with upper-level divergence and mid-level ascent, deep convective clouds develop rapidly. Furthermore, the topography of the Alborz Mountains plays a critical role by inducing orographic uplift, which localizes and amplifies convective potential over the southern slopes. Consequently, high-impact thunderstorms in Tehran stem from a complex multi-scale interaction involving synoptic forcing, thermodynamic instability, moisture transport, and local topographic enhancement.

Conclusion

The monthly distribution of thunderstorms shows a peak frequency during April and May, highlighting the dominance of convective instability during the seasonal transition. Synoptic analysis identifies the ‘Arabian Low – Migratory High’ pattern as the primary lower-tropospheric driver (accounting for 17 of the 49 selected events). This configuration intensifies surface thermal and pressure gradients across Southwest Asia, while its cyclonic circulation, coupled with middle-tropospheric instability, channels essential moisture from the Caspian and Black Seas to fuel convective development over Tehran. Spatially, thunderstorm occurrences are concentrated in elevated northeastern stations (e.g., Firuzkuh) and southern plain areas (e.g., Imam Khomeini Airport), driven by the combined effects of orographic uplift and surface thermal inflows. Given the strategic importance and high event frequency at Imam Khomeini International Airport, establishing rapid, impact-based convective early warning systems is vital for aviation safety.



واکاوی الگوهای همدیدی مؤثر بر رخداد توفان‌های رعدوبرق در استان تهران

مینا دانشور^۱، حسن لشکری^{۲*}، رضا برنا^۳

^۱ گروه آب و هواشناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳ گروه جغرافیا، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹	توفان‌های رعدوبرقی از مهم‌ترین مخاطرات جوی کوتاه‌مدت در نواحی شهری و کوهپایه‌ای‌اند و شناخت الگوهای همدیدی مؤثر بر وقوع آن‌ها می‌تواند در پایش و مدیریت مخاطرات جوی سودمند باشد. این پژوهش با هدف واکاوی الگوهای همدیدی مؤثر بر رخداد توفان‌های رعدوبرقی در استان تهران، در سه چرخه خورشیدی ۲۲، ۲۳ و ۲۴ و طی دوره آماری ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹ انجام شد. در این پژوهش، چرخه‌های خورشیدی صرفاً به‌عنوان چارچوب زمانی برای مقایسه تغییرات رخدادها در دوره‌های مختلف به‌کار گرفته شدند. داده‌های روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان تهران، بر پایه کد وضعیت جوی WW، از سازمان هواشناسی کشور دریافت و پس از کنترل کیفی، رخدادهای رعدوبرقی با استفاده از معیار هم‌زمانی و تکرار دیده‌بانی شناسایی شدند. رخدادها سپس برحسب دوره تداوم، از یک‌روزه تا پنج‌روزه و بیشتر، طبقه‌بندی شدند. برای انتخاب نمونه‌های مناسب تحلیل همدیدی، از آستانه صدک ۹۰ فراوانی ثبت رعدوبرق استفاده شد. داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR برای نمونه‌های منتخب، در ترازهای ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال دریافت و نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل، نم و ویژه، باد و امگا برای روزهای نماینده الگوهای پرتکرار ترسیم و تحلیل شد. نتایج نشان داد که حدود ۷۰ درصد رخدادهای رعدوبرقی استان تهران دارای تداوم یک‌روزه بوده‌اند و بیشترین فراوانی آن‌ها عمدتاً در فصل بهار، به‌ویژه در ماه‌های آوریل و مه، رخ داده است. از میان ۴۹ نمونه یک‌روزه منتخب بر پایه صدک ۹۰، الگوی همدیدی شناسایی شد که سه الگوی «کم‌فشار عربستان-پرفشار مهاجر»، «کم‌فشار پاکستان-پرفشار مهاجر» و «کم‌فشار سودان-چرخند اروپایی» بیشترین فراوانی را داشتند. نتایج بیانگر آن است که هم‌زمانی فرارفت رطوبت در لایه‌های زیرین، واداشت‌های دینامیکی و صعود در ترازهای میانی، و اثر تعدیل‌کننده ناهمواری‌های البرز، از سازوکارهای کلیدی مؤثر بر شکل‌گیری رخدادهای رعدوبرقی منتخب در استان تهران هستند.

مقدمه

توفان‌های رعدوبرقی از جمله مخاطرات جوی کوتاه‌مدت‌اند که با رشد ابرهای همرفتی، رعدوبرق، بارش‌های رگباری، تندبادهای ناگهانی و در برخی موارد تگرگ همراه می‌شوند. این پدیده‌ها، به‌ویژه در نواحی شهری و کوهپایه‌ای، می‌توانند در حمل‌ونقل، فعالیت‌های هوانوردی، زیرساخت‌های شهری، کشاورزی و ایمنی عمومی اختلال ایجاد کنند؛ از این‌رو، شناخت شرایط شکل‌گیری و الگوهای جوی مؤثر بر آن‌ها اهمیت دارد (Doswell, 2001; Markowski & Richardson, 2010). وقوع و شدت پاسخ همرفتی به برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل شامل رطوبت در لایه‌های زیرین جو، ناپایداری، سازوکارهای صعود، برش باد، گرمایش سطحی، گردش جو در مقیاس‌های مختلف و ویژگی‌های ناهمواری وابسته است (Emanuel, 1994; Markowski & Richardson, 2010; Trapp, 2013).

پراکنش زمانی و مکانی توفان‌های رعدوبرقی در مناطق کوهستانی و نواحی دارای ناهمواری پیچیده، به دلیل اثر متقابل گردش بزرگ‌مقیاس و فرایندهای محلی، از پیچیدگی بیشتری برخوردار است (Brooks, Lee & Craven, 2003; Nisi, Martius & Hering, 2016). ناهمواری‌ها می‌توانند از طریق تقویت صعود اجباری، تغییر میدان باد، همگرایی موضعی و تعدیل فرارفت رطوبت، احتمال فعال‌شدن ناپایداری همرفتی را افزایش دهند. افزون بر آن، ویژگی‌های سطحی و حرارتی نواحی شهری ممکن است در کنار واداشتهای همدیدی، بر الگوی بارش همرفتی و رخدادهای تندی اثرگذار باشند (Tinsley, 2008; Singh et al., 2011). پژوهش‌های انجام‌شده در مناطق مختلف جهان نیز بر نقش توأمان رطوبت، ناپایداری، گردش ترازهای میانی و توپوگرافی در شکل‌گیری و توزیع توفان‌های رعدوبرقی تأکید کرده‌اند (Galanaki, Lagouvardos, Kotroni, Flaounas & Argiriou, 2018).

در ایران، مطالعات متعددی ابعاد زمانی، مکانی و همدیدی توفان‌های رعدوبرقی را بررسی کرده‌اند. برای نمونه، نقش همگرایی لایه‌های زیرین و ناوهای تراز میانی در رخداد توفان‌های تندی جنوب‌غرب ایران گزارش شده است (Lashkari & Hejati, 2012). همچنین، پژوهش‌های انجام‌شده در تبریز، کهگیلویه و بویراحمد، اهواز و سواحل جنوبی ایران نشان داده‌اند که آرایش سامانه‌های کم‌فشار ناحیه‌ای، ناوهای تراز میانی، انتقال رطوبت از پهنه‌های آبی پیرامونی و شرایط دینامیکی جو در تکوین توفان‌های تندی نقش مهمی دارند (Masoumpour Samakoush, Miri & Rahimi, 2016; Lashkari, Yarmohammadi & Mousavi, 2016). بررسی‌های ملی نیز ناهمگنی آشکار پراکنش مکانی و تفاوت در چرخه فصلی رخدادهای تندی را در ایران نشان داده‌اند؛ به‌گونه‌ای که فراوانی این پدیده در شمال‌غرب، غرب و بخش‌هایی از جنوب کشور بیشتر است (Azizi, Gerami, 2025; Dananyani, Mojarad, Masoumpour, Koushki & Miri, 2019; Sharifi, 2017; Alizadeh, Asakereh & Raeis Pour, 2025; Soreh & Mohammadi, 2023).

در استان تهران، پژوهش احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2015) الگوی زمانی-مکانی توفان‌های تندی را بررسی و ناهمگونی پراکنش رخدادها در سطح استان را نشان داد. با این حال، با وجود اهمیت این یافته‌ها، سازوکارهای گردش جوی در مقیاس همدیدی و آرایش قائم سامانه‌های مؤثر بر رخدادهای رعدوبرقی در استان تهران، به‌ویژه برای نمونه‌های دارای فراوانی بالای ثبت رعدوبرق، به‌صورت نظام‌مند واکاوی نشده است. این خلأ از آن جهت اهمیت دارد که استان تهران در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی واقع شده و اثر هم‌زمان ناهمواری، تفاوت‌های ارتفاعی، شرایط حرارتی دشت جنوبی و مسیرهای انتقال رطوبت می‌تواند پاسخ همرفتی منطقه را در برابر الگوهای بزرگ‌مقیاس تعدیل یا تشدید کند.

برخی مطالعات، تغییرپذیری زمانی فعالیت الکتریکی جو و رخدادهای تندی را در ارتباط با چرخه‌های خورشیدی بررسی کرده‌اند (Tinsley, 2008; Singh et al., 2011). باین‌حال، در پژوهش حاضر چرخه‌های خورشیدی ۲۲ تا ۲۴ صرفاً به‌منزله چارچوبی زمانی برای دسته‌بندی و مقایسه تغییرات فراوانی رخدادهای رعدوبرقی در زیردوره‌های مورد بررسی به‌کار گرفته شده‌اند؛ بنابراین، هدف این مطالعه آزمون یا اثبات رابطه علی میان فعالیت خورشیدی و رخداد توفان‌های رعدوبرقی نیست. بر این اساس، پژوهش

حاضر با هدف بررسی پراکنش زمانی رخدادهای رعدوبرقی و واکاوی الگوهای همیدیدی مؤثر بر نمونه‌های یک‌روزه منتخب در استان تهران، طی دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۹ انجام شده است. در این راستا، ابتدا رخدادها بر پایه داده‌های دیده‌بانی ایستگاه‌های سینوپتیک و با توجه به دوره تداوم آن‌ها طبقه‌بندی شدند؛ سپس، نمونه‌های یک‌روزه واقع در دهک بالای توزیع فراوانی ثبت رعدوبرق، بر اساس آستانه صدک ۹۰، برای تحلیل همیدیدی انتخاب شدند. در ادامه، ساختار سامانه‌ها و نقش فرارفت رطوبت در لایه‌های زیرین، میدان باد، ارتفاع ژئوپتانسیل و صعود قائم در ترازهای مختلف جو بررسی شد. نتایج این پژوهش می‌تواند به شناخت دقیق‌تر سازوکارهای همیدیدی مؤثر بر رخدادهای رعدوبرقی در البرز مرکزی و بهبود پایش و پیش‌بینی کوتاه‌مدت مخاطرات مرتبط در استان تهران کمک کند.

منطقه مورد مطالعه

استان تهران با مساحت حدود ۱۳۳۶۸ کیلومترمربع در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی و دشت‌های شمالی فلات مرکزی ایران واقع شده است. اختلاف ارتفاع چشمگیر در گستره استان، از حدود ۹۷۳ متر در ورامین تا ۲۹۸۶ متر در امین‌آباد فیروزکوه، همراه با توپوگرافی متنوع از ناهمواری‌های یکپارچه البرز در شمال استان، پایکوه‌های گسترده جنوبی رشته کوه البرز تا دشت‌های منتهی به دشت پهناور جنوبی، تفاوت‌های محلی دما، بارش و رطوبت، تنوع اقلیمی و رخدادهای جوی مترتب بر آن را سبب شده است. این ویژگی‌های محیطی می‌توانند از طریق ایجاد میدان‌های باد گاستی، تقویت صعودهای اروگرافیکی در دامنه‌ها شمالی آن و پدیده‌های همرفتی متاثر از واداشت‌های سطحی در فصول انتقالی و به تبع توفان‌های تندری همراه با رعد و برق‌های شدید را ایجاد نمایند.

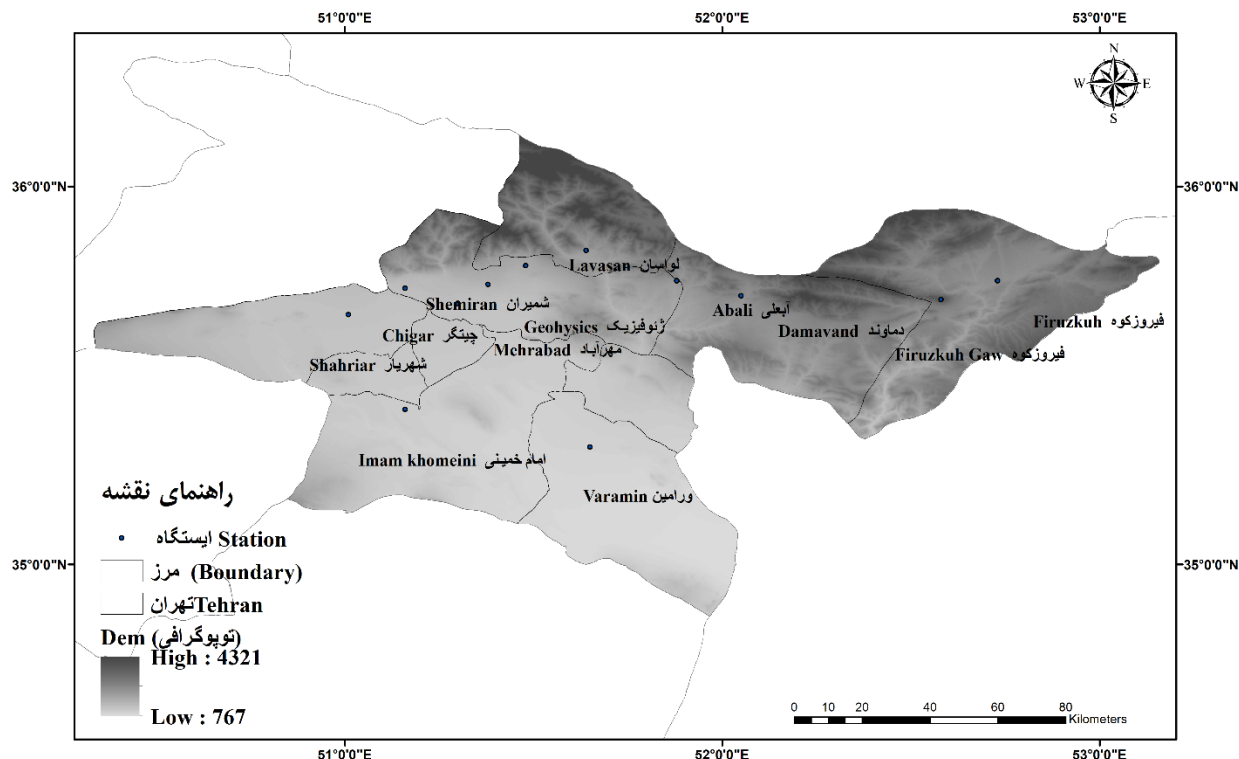
استان تهران همچنین تحت تأثیر سامانه‌های همیدیدی گوناگون، از جمله سامانه‌های مدیترانه‌ای، سودانی و کم‌فشارهای حرارتی ناحیه‌ای، قرار دارد. برهم‌کنش این سامانه‌ها با ویژگی‌های توپوگرافی البرز مرکزی، به‌ویژه در فصل‌های انتقالی، می‌تواند شرایط مساعدی برای شکل‌گیری ابرهای همرفتی و وقوع توفان‌های رعدوبرقی فراهم کند. افزون بر اهمیت اقلیمی این پدیده، تمرکز جمعیت، در کلانشهر تهران و فعالیت‌های اقتصادی، شبکه‌های حمل‌ونقل و زیرساخت‌های شهری در استان تهران، ضرورت شناخت بهتر الگوهای جوی مؤثر بر رخدادهای رعدوبرقی را برجسته می‌سازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گام‌های اجرایی زیر انجام شده است:

گام اول شناسایی ایستگاه‌های نمونه در سطح استان

در این مرحله تمام ایستگاه‌های همیدیدی که پراکنش مناسبی در بخش‌های مختلف استان، از دامنه‌های البرز، نواحی کوهپایه‌ای، محدوده شهری و دشت‌های جنوبی و شرقی استان را پوشش می‌دادند، انتخاب گردید. از این‌رو، امکان بررسی رخدادهای رعدوبرقی در محیط‌های دارای ارتفاع و شرایط جغرافیایی متفاوت فراهم شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل ۱، و مشخصات مکانی، ارتفاع و سال آغاز به کار آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. جزئیات دوره فعالیت مؤثر هر ایستگاه، داده‌های قابل استفاده و نحوه کنترل ناهمگنی ناشی از تفاوت در زمان تأسیس ایستگاه‌ها در ادامه تشریح شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه و ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Location of the study area and the stations

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و عملیاتی ایستگاه‌های مورد استفاده در استان تهران

Table 1- Geographical and operational characteristics of the stations used in Tehran Province

طول و عرض جغرافیایی Latitude and Longitude						ارتفاع از سطح دریا Elevation (m)	سال تاسیس Establishment Year	نوع ایستگاه Station Type	نام شهر یا دهستان محل استقرار Location (City/District)	ایستگاه Station
عرض شمالی Latitude (N)			طول شرقی Longitude (E)							
درجه Degree	دقیقه Minute	ثانیه Second	درجه Degree	دقیقه Minute	ثانیه Second					
35	45	0	51	53	0	2465	1343	سینوپتیک اصلی Synoptic Main	گلخندان Golkhandan	آبلی Abali
35	43	0	52	23	59	2986	1374	سینوپتیک اصلی Synoptic Main	ابرشیوه Abrshivah	فیروزکوه Aminabad Firuzkuh
35	43	59	51	10	0	1305	1369	خودکار Automatic	تهران Tehran	چیتگر Chitgar
35	43	0	52	2	59	2051	1387	سینوپتیک اصلی Synoptic Main	دماوند Damavand	دماوند Damavand
35	44	48	51	23	12	1419	1367	خودکار Automatic	تهران Tehran	ژئوفیزیک Geophysics
35	47	56	51	29	7	1549	1366	سینوپتیک اصلی Synoptic Main	تجریش Tajrish	شمیران Shemiran
35	40	0	51	1	0	1163	1384	سینوپتیک اصلی Synoptic Main	شهریار Shahriar	شهریار Shahriar

35	25	0	51	10	0	990	1382	فرودگاه امام خمینی (ره) Imam Khomeini	ری Rey	سینوپتیک فرودگاهی Airport Synoptic
35	45	0	52	43	59	1976	1372	فیروزکوه Firuzkuh	فیروزکوه Firuzkuh	سینوپتیک اصلی Synoptic Main
35	41	35	51	18	33	1191	1321	مهرآباد Mehrabad	تهران Tehran	سینوپتیک فرودگاهی جو بالا Upper-Air Airport
35	49	54	51	38	32	1863	1390	لواسان Lavasan	لواسان Lavasan	خودکار Automatic
35	19	0	51	38	59	973	1379	ورامین Varamin	ورامین Varamin	سینوپتیک اصلی Synoptic Main

گام دوم انتخاب دوره آماری

آنچه که در عموم تحقیقات موجود جاری است دوره آماری ده، بیست یا سی ساله با شروع و پایان متفاوت انتخاب می گردد. با توجه به این که منبع اصلی انرژی مورد نیاز برای همه پدیده های جوی و گردش عمومی جو از خورشید تامین می شود و این انرژی در تمام دوره فعالیت چرخه ی خورشید یکسان و یکنواخت نیست، در این پژوهش، انتخاب دوره آماری منطبق با سه چرخه خورشیدی اخیر، به این منظور بوده است که دوره آماری با یک پدیده اقلیمی منطبق بوده باشد. با توجه به این که فعالیت های خورشیدی تابع دوره ۱۱ ساله منظم می باشد که در هر بخش از آن مقادیر انرژی خروجی از انتظام معینی برخوردار است. این انرژی کنترل کننده گردش عمومی جو می باشد. به همین دلیل بسیاری از پدیده های اقلیمی دارای دوره برگشت و یا تکرار معینی هستند. پدیده هایی مانند خشکسالی ها و ترسالی ها و بسیاری از پدیده های مشابه تابع این چرخه های خورشیدی می باشند. به همین دلیل انتخاب هدفمند این دوره آماری به همین منظور انجام شده است تا پراکنش و فراوانی توفان های تندی در هر بخش از چرخه و از چرخه ی به چرخه دیگر مورد مقایسه قرار گیرد. این انطباق می تولد زمینه مطالعه جدیدی برای خوانندگان نکته سنج باشد. لذا در این تحقیق مجالی برای پرداختن به رابطه میزان انرژی خروجی از خورشید نبوده است. لذا چرخه های خورشیدی صرفاً مبنایی برای طبقه بندی زمانی و مقایسه درون دوره ای فراوانی رخداد های رعدوبرقی هستند و هیچ گونه آزمون آماری یا تحلیل علی برای بررسی اثر فعالیت خورشیدی یا لکه های خورشیدی بر رخداد های رعدوبرقی انجام نشده است. در این تحقیق تلاش شد دوره آماری انتخابی با چرخه های مرسوم خورشیدی منطبق گردد. در نتیجه سه چرخه خورشیدی اخیر (سیکل های ۲۲ تا ۲۴ خورشیدی سال های ۱۹۸۶-۲۰۱۸) به عنوان دوره آماری این تحقیق انتخاب شده است. مطابق با تقسیم بندی استاندارد چرخه های فعالیت خورشیدی به سه دوره تفکیک شد: چرخه خورشیدی ۲۲: ۱۹۸۶-۱۹۹۶؛ چرخه خورشیدی ۲۳: ۱۹۹۷-۲۰۰۸؛ و چرخه خورشیدی ۲۴: ۲۰۰۹-۲۰۱۹ را در بر می گیرد.

گام سوم جمع آوری داده های ایستگاهی

با توجه به ماهیت تحقیق و پدیده مورد بررسی لازم بود تا سرحد امکان از تعداد بیشتری از ایستگاه ها در فرایند تحقیق استفاده شود. به همین منظور تمام ایستگاه هایی که در هر سیکل خورشیدی دارای آماری کامل بوده اند به عنوان ایستگاه معیار انتخاب گردیده است. در نتیجه تعداد ایستگاه ها از سیکل ۲۲ به سیکل ۲۴ افزایش یافته است. در مقایسه سیکلی نتایج، این پدیده مد نظر بوده است.

گام چهارم دریافت داده های هواشناسی و استاندارد سازی داده ها

در این مرحله داده‌های دیده‌بانی روزانه پدیده رعد و برق (کدهای ۹۳ تا ۹۹) ایستگاه‌های نه گانه از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. داده‌های خام ابتدا در محیط Microsoft Excel پالایش شدند. مراحل کنترل کیفیت شامل حذف داده‌های ناقص، شناسایی ناهماهنگی‌های زمانی در برخی سال‌ها و ایستگاه‌ها، و کنترل سازگاری ثبت‌ها انجام شد. پس از پالایش، یک پایگاه داده رخدادمحور شامل تاریخ، نام ایستگاه، متغیرهای جوی و کد وضعیت جوی ایجاد شد. شناسایی توفان‌های تندری بر اساس کد وضعیت هوای حاضر (ww) انجام شد.

گام پنجم انتخاب نمونه‌های مطالعاتی

در این مرحله، برای انتخاب نمونه‌های مطالعاتی، روزهایی که ویژگی‌های زیر را داشته‌اند به‌عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شدند: پیوستگی زمانی داده‌ها و مشارکت حداکثری ایستگاه‌ها در تحقیق: برای این که از بیشترین تعداد ایستگاه‌ها استفاده شود هر ایستگاهی که در هر چرخه دارای آمار کامل بوده است مورد استفاده قرار گرفته شده است. به همین تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده از چرخه خورشیدی ۲۲ به چرخه ۲۴ افزایش یافته است. به دلیل تفاوت در زمان تأسیس و دوره فعالیت ایستگاه‌ها، تعداد ایستگاه‌های واجد شرایط در چرخه‌های مختلف یکسان نبود. بر این اساس، بسته به چرخه خورشیدی، بین ۵ تا ۹ ایستگاه سینوپتیک در تحلیل‌ها وارد شدند. در چرخه ۲۲ پنج ایستگاه، در چرخه ۲۳ هفت ایستگاه و در چرخه ۲۴ نه ایستگاه در تحلیل وارد شدند. تغییر تعداد ایستگاه‌ها میان چرخه‌ها ناشی از توسعه تدریجی شبکه دیده‌بانی در دهه‌های اخیر بود. به‌منظور بهره‌گیری از حداکثر پوشش داده‌ای، تمامی ایستگاه‌هایی که دارای آمار کامل در بازه زمانی هر چرخه بودند، در فرآیند تحلیل لحاظ شدند.

۱- نمایندگی مکانی مناسب از همه مناطق توپوگرافی استان

۲- پدیده رعد و برق حداقل در دو ایستگاه فعال در همان چرخه گزارش شده باشد.

۳- حداقل در یک ایستگاه در دو دیده بانی با فواصل ۶ ساعته پدیده رعد و برق گزارش شده باشد.

جدول ۲- ایستگاه‌های مورد استفاده در هر چرخه خورشیدی

Table 2- Stations used in each solar cycle

ردیف	ایستگاه‌های استفاده شده در سیکل 22	ایستگاه‌های استفاده شده در سیکل 23	ایستگاه‌های استفاده شده در سیکل 24
No	Stations Used in Cycle 22	Stations Used in Cycle 23	Stations Used in Cycle 24
1	مهرآباد (Mehrabad)	مهرآباد (Mehrabad)	مهرآباد (Mehrabad)
2	آبعلی (Abali)	آبعلی (Abali)	آبعلی (Abali)
3	شیمیران (Shemiran)	شیمیران (Shemiran)	شیمیران (Shemiran)
4	ژئوفیزیک (Geophysics)	ژئوفیزیک (Geophysics)	ژئوفیزیک (Geophysics)
5	فیروزکوه (Firuzkuh)	فیروزکوه (Firuzkuh)	فیروزکوه (Firuzkuh)
6		امام خمینی (Imam Khomeini)	امام خمینی (Imam Khomeini)
7		چیتگر (Chitgar)	چیتگر (Chitgar)
8			دماوند (Damavand)
9			شهریار (Shahrivar)

گام ششم انتخاب رخداد رعد و برق بر اساس طول دوا

برای انتخاب سامانه‌های همدیدی بر اساس تداوم رخداد، سامانه بر اساس با شروط ذکر شده در گام پنجم به سامانه‌های یک‌روزه، دوازده‌روزه، سه‌روزه، چهارروزه، پنج‌روزه و بیش از پنج‌روزه طبقه‌بندی شدند.

گام هفتم انتخاب نمونه‌های نهایی برای تحلیل همدیدی

همان‌طور که بیان شد، با توجه به حجم بالای نمونه‌ها و ضرورت تحلیل دقیق داده‌های جوی، به‌منظور انتخاب نمونه‌های مناسب برای تحلیل همدیدی، رویکرد آماری صدک نودم (P_{90}) به کار گرفته شد. بدین منظور، تمامی رخداد‌های شناسایی شده در هر کلاس

تداوم، به صورت جداگانه در هر چرخه بر اساس فراوانی گزارش‌های ثبت‌شده (تعداد دیده بانی‌های گزارش شده در یک روز) مرتب‌سازی شدند و نمونه‌هایی که فراوانی آن‌ها فراتر از آستانه P_{90} بود، به عنوان «نمونه‌های منتخب صدک ۹۰» برای مراحل بعدی تحلیل انتخاب شدند. به کارگیری این آستانه صرفاً ابزاری برای گزینش رخدادهای دارای فراوانی ثبت بالاتر و کاهش حجم نمونه‌ها برای تحلیل تفصیلی نقشه‌های جوی بود؛ بنابراین، این نمونه‌ها در مقاله «رخدادهای فرین» یا «سامانه فرین» نامیده نمی‌شوند. با توجه به فراوانی بیشتر سامانه‌های یک روزه نسبت به سایر سامانه‌ها با طول دوام بالاتر و همچنین تفاوت ساختار هم‌پیدی این سامانه‌ها با سایر سامانه‌ها، در این تحقیق الگوهای هم‌پیدی سامانه‌ها با طول دوام یک روزه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و سامانه‌های با طول دوام دو روزه و بالاتر در مقاله دیگری ارائه خواهد شد.

گام هشتم گردآوری داده‌های جوی برای تحلیل هم‌پیدی

در این مرحله داده‌های جوی فشار و ارتفاع ژئوپتانسیل مربوط به ترازهای دریا و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای تمام نمونه‌های انتخابی بر اساس صدک نودام از پایگاه NCEP/NCAR دریافت و در محیط GrADS پردازش شد.

گام نهم استخراج الگوهای هم‌پیدی

برای شناسایی و استخراج الگوهای هم‌پیدی، با روش بررسی چشمی و تحلیل تطبیقی آرایش سامانه‌های جوی غالب بر منطقه در ترازهای زیرین وردسپهر، الگوهای هم‌پیدی متمایز استخراج شدند.

گام دهم تحلیل ویژگی‌های هم‌پیدی الگوهای منجر به رعد و برق

برای واکاوی هم‌پیدی و دینامیکی الگوها، متغیرهای ارتفاع ژئوپتانسیل، باد مداری و نصف‌النهاری، نم و یژه و امگا در ترازهای ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال استخراج شد. در ترازهای ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل، نم و یژه و بردار باد مداری و نصف‌النهاری با اسکریپت نویسی مناسب در محیط GrADS به صورت نقشه‌های ترکیبی چندمتغیره ترسیم شدند. با توجه به اهمیت پدیده فرافرت رطوبت در لایه‌های زیرین وردسپهر بخصوص برای پدیده‌های با ترمودینامیک قوی در لایه زیرین وردسپهر از ترکیب داده‌های جوی نم و یژه و بردار باد استفاده شده است. در مقابل با توجه به اهمیت پدیده‌های دینامیکی در ترازهای میانی وردسپهر در نقشه‌های ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال نقشه ترکیبی بر پایه داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل، باد مداری و نصف‌النهاری (باد برداری) و امگا ترسیم و تحلیل شده است.

نتایج و بحث

تحلیل آماری رخدادهای رعدوبرقی

پراکنش تداوم رخدادهای رعدوبرقی در چرخه‌های خورشیدی

در این بخش، تداوم رخدادهای رعدوبرقی منتخب در استان تهران طی سه چرخه خورشیدی ۲۲ تا ۲۴ بررسی شده است. جدول ۳، فراوانی رخدادهای رعدوبرقی را برحسب طول تداوم در هر چرخه خورشیدی نشان می‌دهد. مطابق نتایج، رخدادهای یک‌روزه در هر سه چرخه بیشترین فراوانی را دارند. در چرخه خورشیدی ۲۲، ۱۰۲ رخداد یک‌روزه و ۲۱ رخداد دوروزه ثبت شده است و رخدادهای با تداوم بیش از دو روز فراوانی کمتری داشته‌اند. در چرخه ۲۳ نیز رخدادهای یک‌روزه با ۱۰۷ مورد و رخدادهای دوروزه با ۲۹ مورد، بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. در چرخه ۲۴ نیز ۱۳۸ رخداد یک‌روزه و ۴۲ رخداد دوروزه ثبت شده است.

در مجموع، بر پایه جدول ۳، رخدادهای یک‌روزه با سهم حدود ۷۰ درصد، فراوان‌ترین گروه را تشکیل می‌دهند؛ رخدادهای دوروزه نزدیک به ۱۹ درصد از کل رخدادهای را شامل می‌شوند و سهم رخدادهای با تداوم بیش از دو روز محدودتر است. این الگو نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از رخدادهای رعدوبرقی منتخب استان تهران، ماهیتی کوتاه‌تداوم دارند. البته با توجه به ماهیت

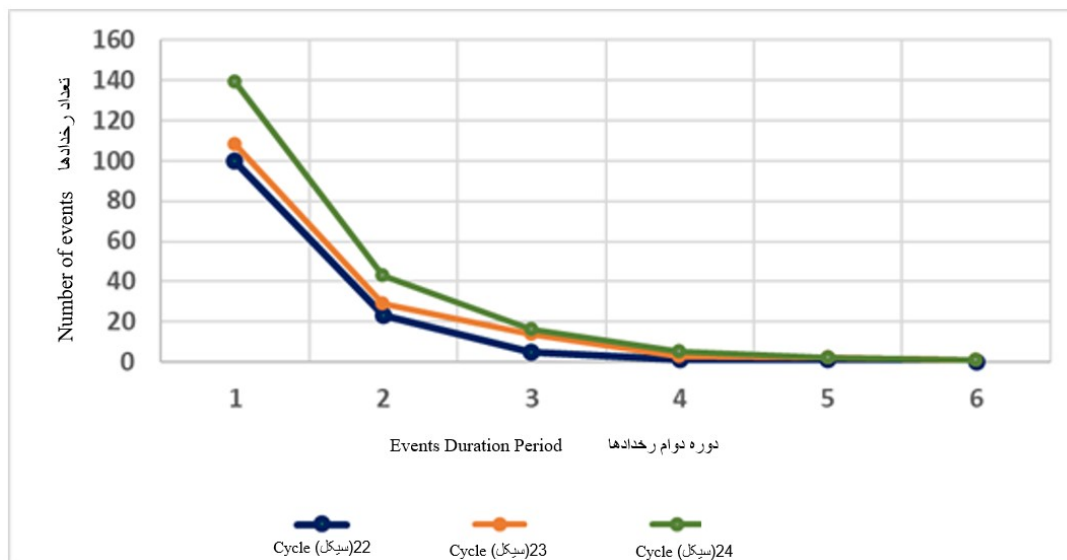
توفان‌های تندی که پدیده‌ای با ترمودینامیک قوی هستند و این ترمودینامیک نمی‌تواند عمری طولانی مدت داشته باشند، فراوانی بیشتر توفان‌های رعد و برقی یک روزه نسبت به توفان‌های تندی با عمر بیش از یک روز طبیعی به نظر می‌رسد. بالاین‌حال، رخدادهای چندروزه نیز، با وجود فراوانی کمتر، از نظر استمرار شرایط ناپایدار و امکان تداوم مخاطرات جوی در منطقه اهمیت دارند.

پراکنش تداوم رخدادهای رعدوبرقی در سه چرخه خورشیدی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۳- فراوانی رخدادهای رعدوبرقی منتخب برحسب طول تداوم در چرخه‌های خورشیدی ۲۲ تا ۲۴

Table 3- Frequency of selected thunderstorm events by duration in Solar Cycles 22-24

سهم به درصد از مجموع کل Percentage Share of Total (%)	مجموع کل Total	تعداد رخداد در سیکل ۲۴ Number of events in Cycle 24	تعداد رخداد در سیکل ۲۳ Number of events in Cycle 23	تعداد رخداد در سیکل ۲۲ Number of events in Cycle 22	دوره دوام رخداد events Duration Period
71/69	347	138	107	102	۱ روزه (1day)
19	92	42	29	21	۲ روزه (2day)
5/78	28	10	14	4	۳ روزه (3day)
1/65	8	5	3	1	۴ روزه (4day)
1/01	5	2	2	1	۵ روزه (5day)
0/4	2	1	1	0	۶ روزه (6day)
100	484	200	156	128	مجموع Total



شکل ۲- پراکنش فراوانی رخدادهای رعدوبرقی منتخب برحسب طول تداوم در سه چرخه خورشیدی

Fig. 2. Frequency distribution of selected thunderstorm events by duration across the three solar cycles

انتخاب نمونه‌های دارای فراوانی ثبت بالاتر از صد ۹۰

با توجه به فراوانی قابل ملاحظه رخدادهای یک روزه (۳۴۷ مورد) به منظور محدود کردن حجم نمونه‌ها و انتخاب رخدادهای دارای فراوانی ثبت رعدوبرق بیشتر برای تحلیل تفصیلی نقشه‌های جوی، نمونه‌ها بر اساس تعداد دیده بانی گزارش شده در یک روز مرتب

سازی شده و آستانه صدک ۹۰ (P_{90}) به طور جداگانه برای رخدادهای هر طبقه تداوم و در هر چرخه محاسبه شد. جدول ۴، نتایج این سطح بندی را نشان می دهد.

نتایج نشان می دهد که با افزایش طول تداوم رخدادهای فراوانی آنها کاهش می یابد. به همین منظور نمونه های واقع در بخش بالایی توزیع فراوانی ثبت رعدوبرق، یعنی نمونه های بالاتر از آستانه صدک ۹۰، برای مراحل بعدی واکاوی همیدی انتخاب شدند. تأکید می شود که به کارگیری صدک ۹۰ در این پژوهش، صرفاً یک ابزار غربالگری آماری برای انتخاب نمونه های دارای ثبت بیشتر (تعداد دیده بانی های رعد و برق گزارش شده بیشتر در یک روز) و مدیریت حجم تحلیل نقشه ها بوده است؛ بنابراین، این نمونه ها به عنوان «رخدادهای فرین» یا «سامانه فرین» تفسیر نمی شوند. جدول ۵ نیز تاریخ رخدادهای یک روزه منتخب بالاتر از صدک ۹۰ را به تفکیک چرخه های خورشیدی ارائه می کند. این رخدادهای مبنای اولیه دسته بندی الگوهای همیدی در بخش های بعدی پژوهش بوده اند.

جدول ۴- خلاصه آماری رخدادهای رعدوبرقی منتخب برحسب طول تداوم و چرخه خورشیدی بر پایه آستانه صدک ۹۰

Table 4- Statistical summary of selected thunderstorm events by duration and solar cycle based on the 90th-percentile threshold

طول دوام رخداد Events Duration	سیکل خورشیدی Solar Cycle	تعداد رخداد Number of Events	صدک ۹۰ 90th Percentile	تعداد $\geq$ صدک ۹۰ Count $\leq$ 90th Percentile	تعداد $<$ صدک ۹۰ Count $>$ 90th Percentile
یک روزه 1 Day	22	64	4	56	8
یک روزه 1 Day	23	92	3	62	30
یک روزه 1 Day	24	89	4	65	14
دو روزه 2 Days	22	27	5	25	2
دو روزه 2 Days	23	36	4	31	5
دو روزه 2 Days	24	30	5	29	1
سه روزه 3 Days	22	8	3	7	1
سه روزه 3 Days	23	9	4	8	1
سه روزه 3 Days	24	5	5	3	2
چهار روزه 4 Days	هر سه سیکل All Three Cycles	10	4	9	1
پنج روزه 5 Days	هر سه سیکل All Three Cycles	8	4	7	1

جدول ۵- تاریخ رخدادهای رعدوبرقی یک روزه منتخب بالاتر از آستانه صدک ۹۰، به تفکیک چرخه خورشیدی

Table 5- Dates of selected one-day thunderstorm events exceeding the 90th-percentile threshold by solar cycle

یک روزه (Day)			
سیکل ۲۴ (Cycle)	سیکل ۲۳ (Cycle)	سیکل ۲۲ (Cycle)	
2008.04.14	2004.09.20	1997.06.16	1986.08.30
2009.04.30	2005.03.24	1997.06.19	1987.06.20
2009.09.19	2005.05.03	1998.04.05	1987.10.08
2010.05.10	2005.05.06	1998.04.29	1991.10.11
2010.05.20	2005.06.16	1998.06.21	1992.05.04

2012.04.15	2005.08.31	1998.08.06	1993.05.13
2012.05.04	2005.11.06	1999.04.27	1996.08.29
2013.04.21	2006.02.15	1999.07.15	1996.10.16
2014.04.23	2006.05.21	1999.11.01	
2015.10.17	2006.05.23	2000.07.15	
2016.03.22	2006.05.25	2000.09.30	
2016.05.25	2006.10.27	2001.04.26	
2017.04.27	2007.06.05	2002.04.03	
2019.05.30	2007.08.11	2002.05.04	
	2007.10.07	2003.05.19	

تحلیل پراکنش ماهانه و سالانه رخدادهای رعدوبرقی یک‌روزه

با توجه به فراوانی بیشتر رخدادهای یک‌روزه و به‌منظور تمرکز تحلیل همدیدی بر رخدادهای کوتاه‌تداوم، پراکنش ماهانه و سالانه این گروه در هر چرخه خورشیدی بررسی شد. رخدادهای با تداوم بیش از یک روز نیز در پژوهش حاضر شناسایی و طبقه‌بندی شده‌اند؛ با این حال، واکاوی تفصیلی الگوهای همدیدی آن‌ها، به دلیل تفاوت احتمالی در سازوکارهای جوی و نیز محدودیت حجم مقاله، در این مقاله ارائه نمی‌شود و توفان‌های بیش از یک روزه با توجه تفاوت ویژگی‌های همدیدی و ترمودینامیکی در مقاله دیگری ارائه خواهد شد.

توفان‌های رعدوبرقی با تداوم یک‌روزه

جداول (۶ تا ۸)، پراکنش سالانه، ماهانه و مجموع فراوانی توفان‌های رعد و برق را در هر سیکل نشان می‌دهند. در سیکل ۲۲، مجموعاً ۶۵ رخداد یک‌روزه بر اساس معیارهای انتخابی شناسایی شد. بیشترین تعداد رخداد های یک‌روزه با فراوانی ۱۷ مورد در ماه «می» رخ داده است و ماه «آوریل» با ۱۴ رخداد در رتبه دوم قرار دارد. ماه‌های مارس (۸ رخداد)، اکتبر (۷ رخداد) و ژوئن (۶ رخداد) نیز به ترتیب در رتبه‌های سوم تا پنجم قرار گرفته‌اند. در مجموع، فصل بهار با برخورداری از ۳۷ رخداد از کل ۶۵ رخداد گزارش شده در این سیکل، سهم قابل توجهی از رخدادها را به خود اختصاص داده است. همان طور که بیان شد ساختار قائم و افقی رخداد های با دوام بیش از دو روزه تفاوت چشمگیری با رخداد های یک روزه داشتند. رخداد های یک روزه دارای دو ویژگی اساسی بودند. پدیده همرفت در الگوی شکل گیری این رخدادها نقش غالب تری داشته و توپوگرافی نقش مهمی در تشدید این پدیده داشته است. به همین دلیل در توفان های تندری در ایستگاه های پایکوهی از فراوانی بیشتری برخوردار بوده است. با توجه به این که واداشت های سطحی نقش مهمی در شکل گیری توفان های تندری با ویژگی همرفتی دارد بیشترین فراوانی توفان های تندری یک روزه در ماه های می و آپریل رخ داده است.

از منظر توزیع سالانه نیز، سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۶ به ترتیب با ۱۱ و ۱۰ رخداد، بالاترین میزان وقوع توفان‌های رعد و برق را داشته‌اند. در یک تحلیل کلی، تعداد رخدادهای تندری در نیمه دوم این سیکل افزایش چشمگیری نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که ۴۵ رخداد (حدود ۶۹ درصد از کل موارد) در نیمه دوم دوره مذکور به وقوع پیوسته است.

جدول ۶- پراکنش ماهانه رخدادهای رعدوبرقی یک‌روزه در چرخه خورشیدی ۲۲

Table 6- Monthly distribution of one-day thunderstorm events in Solar Cycle 22.

سال	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	جمع کل
Year	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Total
1986	1		1			1					1		4
1987	1						2	1	1				5
1988							1		2				3
1989	1	1				1	1	2					6
1990	1					1							2

11				2	2	4	1		1			1	1991	
8			2			4	1	1					1992	
4						2	1	1					1993	
4				1			1		1			1	1994	
8	1					4	1	2					1995	
10		2				2	2		1			1	2	1996
65	1	3	2	6	17	14	8	1	2	1	3	7	جمع کل	

در سیکل ۲۳، مجموعاً ۹۳ رخداد رعد و برق یک‌روزه رخ داده است که در مقایسه با سیکل ۲۲، افزایشی معادل ۲۸ رخداد را نشان می‌دهد. در این سیکل نیز بیشترین میزان رخداد های رعد و برق با رقم ۲۲ رخداد، همچنان در ماه «می» به ثبت رسیده است. ماه آوریل با ۱۵ رخداد در رتبه دوم، و ماه‌های ژوئن با ۱۳، اکتبر با ۱۱ و مارس با ۹ رخداد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. بار دیگر فصل بهار با ۵۰ سامانه از کل ۹۳ رخداد، بیش از نیمی از رخداد های توفان‌های رعد و برق را به خود اختصاص داده است. فصل تابستان با ۱۷ مورد در رتبه دوم و فصل پاییز با ۱۵ مورد در رتبه سوم قرار گرفته‌اند؛ از این رو، در مجموع، فصول انتقالی بیشترین سهم را در وقوع توفان‌های رعد و برق دارند. از منظر پراکنش سالانه، سال ۱۹۹۸ با ۱۵ رخداد، بالاترین میزان رخداد توفان‌های تندری را داشته است و سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ نیز هر یک با ۱۳ رخداد، به‌طور مشترک در رتبه دوم قرار دارند. در این سیکل نیز مشابه دوره‌ی قبل، بیش از نیمی از رخداد ها در نیمه دوم سیکل به وقوع پیوسته‌اند. به این ترتیب همچنان عامل همرفت و واداشت های سطحی پدیده غالب در شکل‌گیری توفان های تندری یک روزه داشته است.

جدول ۷- پراکنش ماهانه رخداد های رعدوبرقی یک‌روزه در چرخه خورشیدی ۲۳

Table 7- Monthly distribution of one-day thunderstorm events in Solar Cycle 23

سال	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	جمع کل
Year	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Total
1997	1							3	4				8
1998	1					1	2	3	4	1	2	2	16
1999		1					2			1			4
2000							2			1		1	4
2001	2						1	1	1				5
2002	1		1				2	2			1	1	8
2003					1	1		5			1		8
2004	2						2	3		1		1	9
2005	1	1					4	2	2		1		13
2006	2				1	1	4	3	1			1	13
2007	1								1	1	1		4
جمع	11	2	2	0	2	9	15	22	13	5	6	6	93

در سیکل ۲۴، تعداد رخداد های تندری به ۷۴ مورد کاهش یافته است. در این سیکل، زمان اوج رخداد توفان‌های تندری از ماه «می» به ماه «آوریل» تغییر یافته؛ به‌طوری‌که بیشترین فراوانی با رقم ۲۱ رخداد در ماه آوریل گزارش شده است. ماه «می» با ۱۳ رخداد در رتبه دوم، و ماه‌های اکتبر با ۱۱ مورد و ژوئن با ۸ مورد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. فصل بهار با ۴۲ مورد از کل رخداد ها، همچنان بالاترین سهم (بیش از نیمی از رخداد ها) را به خود اختصاص داده است. فصل پاییز با ۱۷ مورد در رتبه دوم و فصل زمستان با ۱۱ مورد در رتبه سوم قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب، بسامد رخداد های تندری در فصل زمستان روند افزایشی نشان می‌دهد؛ افزایش نسبی سهم رخداد های زمستانه در این چرخه، صرفاً یک ویژگی مشاهده‌شده در داده‌های این پژوهش است. با توجه به تفاوت تعداد ایستگاه‌های فعال بین چرخه‌ها و نبود آزمون روند بلندمدت، این الگو را نمی‌توان به‌طور مستقیم به تغییر اقلیم، گرمایش جهانی یا اثر جزیره حرارتی شهر تهران نسبت داد. از منظر پراکنش سالانه نیز، سال ۲۰۰۹ با ۱۱ سامانه بالاترین میزان رخداد را داشته

است. در سایر سال‌ها، فراوانی رخدادهای تندری تفاوت فاحشی با یکدیگر ندارند و برخلاف دوره‌های قبل، تمرکز رخدادها در نیمه اول یا دوم سیکل نیز دستخوش تغییر شده و بیشترین تعداد رخدادهای رعد و برق در نیمه اول سیکل رخ داده است. همان طور که بیان شد ساختار قائم و افقی رخداد های با دوام بیش از دو روزه تفاوت چشمگیری با رخ داده ای یک روزه داشتند. رخ داده ای یک روزه دارای دو ویژگی اساسی بودند. پدیده همرفت در الگوی شکل گیری این رخدادها نقش غالب تری داشته و توپوگرافی نقش مهمی در تشدید این پدیده داشته است. به همین دلیل در توفان های تندری در ایستگاه های پایکوهی از فراوانی بیشتری برخوردار بوده است. با توجه به این که واداشت های سطحی نقش مهمی در شکل گیری توفان های تندری با ویژگی همرفتی دارد بیشترین فراوانی توفان های تندری یک روزه در ماه های می و آپریل رخ داده است.

جدول ۸- پراکنش ماهانه رخداد های رعدوبرقی یک روزه در چرخه خورشیدی ۲۴

Table 8- Monthly distribution of one-day thunderstorm events in Solar Cycle 24

سال	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	کل
Year	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Total
2008	2						4		2				8
2009					2		3	2	2			2	11
2010	1				1		1	3				2	8
2011		1			1		3	3	1				9
2012		1		1			3	2					7
2013	1	1			1		2	1					6
2014	2					1	2		1				6
2015	2	1				1							4
2016		2				1	1		2	۲			8
2017	1						1	2					4
2018					1	1	1						4
جمع	11	6	0	1	6	4	21	13	8	2	0	2	74

استخراج و فراوانی الگوهای همدیدی

در این تحقیق، بر اساس معیارهای ذکر شده در بخش روش‌شناسی، ۴۹ رخداد همدیدی یک روزه با ویژگی تندری و رعد و برق در طول دوره‌ی آماری شناسایی شد. جدول ۹، الگوهای همدیدی و فراوانی نمونه‌های عضو هر الگوی همدیدی را نشان می‌دهد. در این مقاله، یک نمونه از هر یک از سه الگوی «کم فشار پاکستان - مهاجر» (با ۱۰ عضو)، «کم فشار سودان - چرخند اروپایی» (با ۵ عضو) و «الگوی کم فشار عربستان - پرفشار مهاجر» (با ۱۷ عضو) که در قیاس با سایر الگوها پرتکرار بودند، انتخاب و تحلیل شده است.

جدول ۹- فراوانی الگوهای همدیدی مؤثر بر رخداد های رعدوبرقی یک روزه منتخب در سه چرخه خورشیدی

Table 9- Frequency of synoptic patterns associated with selected one-day thunderstorm events across the three solar cycles

شماره (No.)	الگوی همدیدی (Synoptic pattern)	تعداد عضو (Number of members)
1	مدیترانه - سودان - وچرند قطبی (Mediterranean - Sudan - Polar Vortex)	2
2	آفریقا - لوت (Africa - Lut)	1

3	آفریقا - عربستان - پاکستان (Africa - Arabia - Pakistan)	3
2	پاکستان (Pakistan)	4
10	پاکستان - مهاجر (Pakistan - Mohajer)	5
5	سودان - مهاجر (Sudan - Mohajer)	6
2	عربستان - لوت - سیبری (Arabia - Lut - Siberia)	7
17	عربستان - مهاجر (Arabia - Mohajer)	8
1	عربستان - لوت - آفریقا (Arabia - Lut - Africa)	9
1	عربستان - ترکمنستان (Arabia - Turkmenistan)	10
1	پاکستان - پرفشار عربستان (Pakistan - Arabian High Pressure)	11
2	عربستان - پاکستان (Arabia - Pakistan)	12
1	لوت - عربستان - مهاجر (Lut - Arabia - Mohajer)	13
1	مهاجر - ترکمنستان (Mohajer - Turkmenistan)	14
49	کل (Total)	

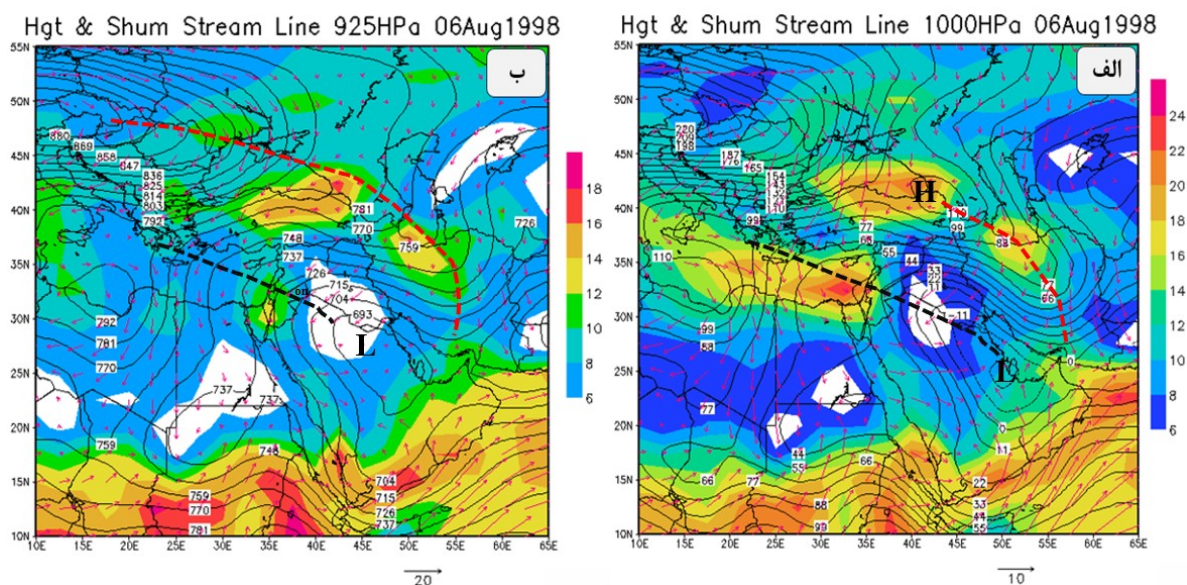
تحلیل الگوهای همدیدی پرتکرار

همان طور که مشاهده شد، از مجموع ۴۹ رخداد یک روزه، سه الگو بیش از سایر الگوها تکرار شده‌اند. برای پرهیز از افزایش بی دلیل حجم تحقیق و با توجه به فراوانی کمتر سایر الگوها، این سه الگوی پرتکرار انتخاب و تحلیل شده‌اند.

الگوی کم فشار عربستان - پرفشار مهاجر

همان طور که در جدول پراکنش الگوهای همدیدی ملاحظه شد، این الگو پرتکرارترین الگوی همدیدی در میان ۱۴ الگوی همدیدی می‌باشد؛ به طوری که ۱۷ نمونه از ۴۹ نمونه‌ی انتخاب شده برای تحلیل همدیدی توفان‌های رعد و برق را به خود اختصاص داده است. در این الگو، دو سامانه‌ی کم فشار حرارتی عربستان در ترازهای زیرین وردسپهر و سامانه‌ی واچرخندی مهاجر در تمام پهنه‌ی زیرین و میانی وردسپهر که کنترل کننده‌ی شرایط همدیدی هستند، منجر به رخداد توفان تندی می‌شوند. در این الگو، بر روی نقشه‌های ترازهای ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ و گاه تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، کم فشار عربستان در الگوی تابستانه‌ی خود قرار دارد؛ یعنی یک کم فشار حرارتی بسیار قوی که در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال هسته‌ی مرکزی آن دارای ارتفاع ژئوپتانسیل منفی (گاه تا منفی ۵۰ تا ۷۰ متر ژئوپتانسیل) است و تظاهر پیدا می‌کند. زاویه‌ی تابش بالا، بیابان‌های پهن‌آور و شنی و هسته‌های گرمایی بسیار قوی بر روی شبه جزیره‌ی عربستان، تکوین یافته و تقریباً در تمام طول دوره‌ی گرم سال (از خرداد تا اواخر شهریور)، پدیده‌ی غالب جوی این منطقه می‌باشد. در ماه‌های گرم تابستان، به خصوص ماه‌های ژوئیه و اوت، به دلیل زاویه‌ی تابش بالا، آسمان صاف و روزهای طولانی تر، هسته‌های دمایی را بر روی منطقه شکل می‌دهد که واداشت‌های سطحی آن را تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. همان طور که در همین سامانه‌ی نمونه نیز دیده می‌شود، کم فشار حرارتی تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال را نیز تحت تأثیر خود قرار داده است. ساختار این سامانه در عمده روزهای گرم تابستان به گونه‌ای است که هسته‌ی مرکزی آن در محدوده جنوبی شهر ریاض قرار دارد و پهنه‌ی گسترش آن الگویی جنوب شرقی - شمال غربی دارد؛ به طوری که زبانه شمال غربی آن تمام پهنه‌ی غرب آسیا را در بر گرفته و در عموم روزها، غرب آسیا، نیمه‌ی شرقی دریای مدیترانه و شمال شرق صحرای آفریقا را در بر می‌گیرد. استقرار این سامانه‌ی حرارتی قوی بر روی شبه جزیره‌ی عربستان و تمام پهنه‌ی غرب آسیا، با توجه به الگوی گردشی آن (پادساعت گرد)، این سامانه نقش آنچنانی در فرارفت رطوبت به داخل ایران ندارد؛ بلکه رطوبت انتقالی آن از روی دریاهای گرم عرب و عمان با جریانات مونسونی تابستانه ادغام شده و به سمت شرق و بر روی هند و پاکستان تغییر مسیر می‌دهد. ولی این سامانه‌ی حرارتی نقش یک محرک را برای گسترش جنوب سویی واچرخند مهاجر بر روی کشور ایران فراهم می‌کند. در این الگو، از دو تا سه روز قبل از شروع فعالیت سامانه‌ی تندی، زبانه‌ای از واچرخند مهاجر که در این الگو هسته‌ی مرکزی آن در محدوده‌ای بین دریاچه‌ی مازندران و دریای سیاه

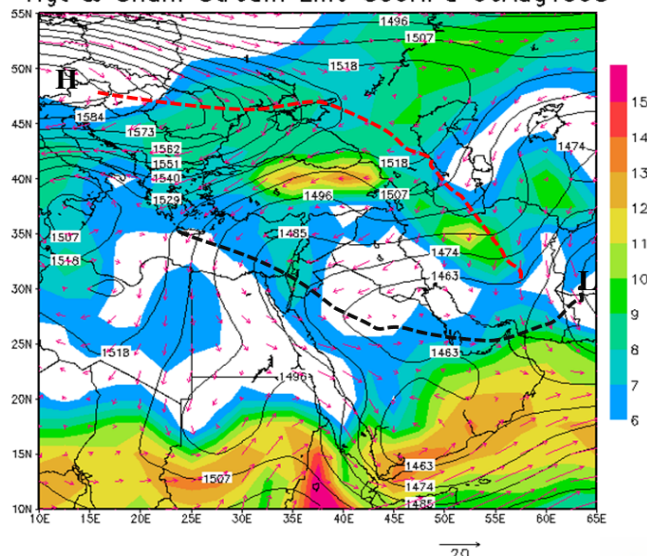
استقرار دارد، با تقویت کم‌فشار حرارتی عربستان و شیو حرارتی و فشاری ایجادشده، به سمت عرض‌های جنوبی گسترش می‌یابد. با تکمیل شرایط همدیدی، زبانه‌ای از این سلول و اچرخندی با گسترش بر روی آب‌های دریاچه‌ی مازندران، رطوبت انتقالی بوسیله‌ی این دریاچه را در گردشی و اچرخندی و بوسیله‌ی جریانات شمال-شمال‌غربی به سواحل جنوبی دریاچه‌ی مازندران و در ادامه، پس از بارش‌های تابستانه، از استان‌های گیلان و مازندران وارد منطقه‌ی شمال شرق استان تهران می‌کند. میدان‌های رطوبتی شکل‌گرفته در ساحل جنوبی دریاچه‌ی مازندران و پایکوه‌های جنوبی البرز، بیانگر این فرارفت رطوبتی بوسیله‌ی زبانه‌های و اچرخند مهاجر می‌باشد. در ترازهای ۱۰۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال، سامانه‌ی کم‌فشار حرارتی عربستان و زبانه و اچرخند مهاجر پدیده‌ی غالب منطقه‌ی غرب آسیا می‌باشند (شکل ۳ الف و ب)؛ ولی از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، سامانه‌ی کم‌فشار پاکستان با کم‌فشار عربستان ادغام شده و تمام پهنه‌ی کشور ایران، شبه‌جزیره‌ی عربستان و غرب آسیا تا مدیترانه شرقی تحت حاکمیت زبانه‌های این دو سامانه قرار دارند (شکل ۴). این رطوبت فراوان انتقالی به منطقه‌ی شمالی کشور در لایه‌ی زیرین و ردسپهر، نیازمند استقرار و حاکمیت جوی ناپایدار همراه با جریانات همرفتی قوی در لایه‌های میانی جو می‌باشد تا توفان‌های تندری تابستانه را رقم بزند.



شکل ۳- نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل (خطوط هم‌ارتفاع)، بردار باد و نم ویژه (سایه‌رنگ) در روز ۶ اوت ۱۹۹۸: (الف) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال؛ (ب) تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال.

Fig. 3. Multi-variable maps of geopotential height (contours), wind vectors, and specific humidity (shading) on 6 August 1998: (a) 1000 hPa; (b) 925 hPa.

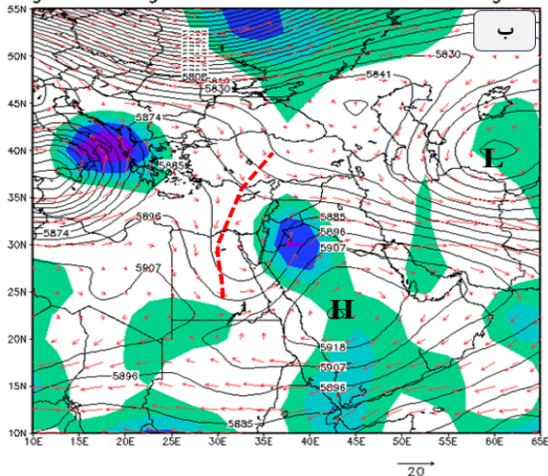
Hgt & Shum Stream Line 850HPa 06Aug1998



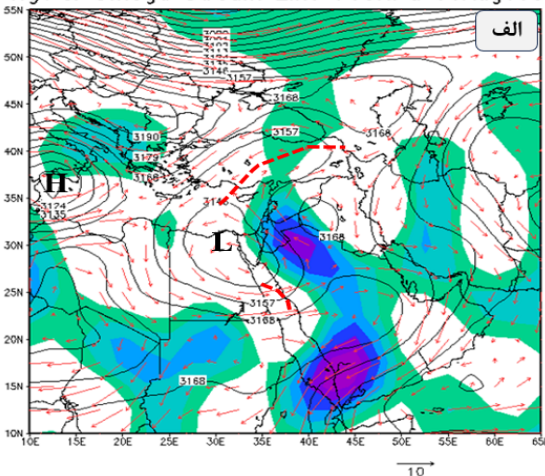
شکل ۴- نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و نم ویژه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روز ۶ اوت ۱۹۹۸

Fig. 4. multi-variable map of geopotential height, wind vectors, and specific humidity at 850 hPa on 6 August 1998.

Hgt & Omega Stream Line 500HPa 06Aug1998



Hgt & Omega Stream Line 700HPa 06Aug1998



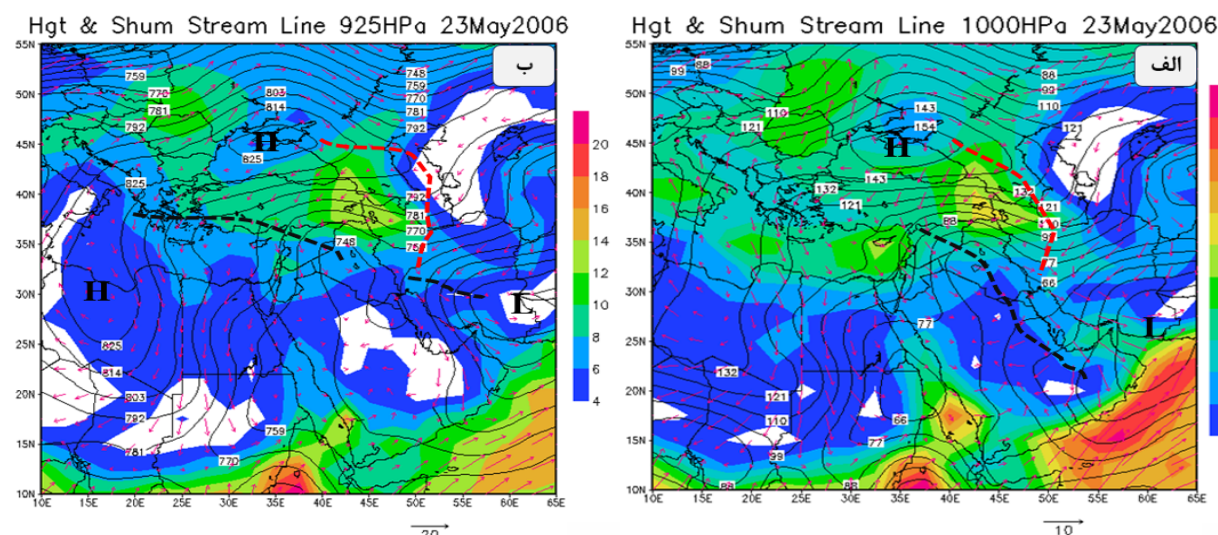
شکل ۵- نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و امگا در روز ۶ اوت ۱۹۹۸: (الف) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ (ب) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال.

Fig. 5. Multi-variable maps of geopotential height, wind vectors, and omega on 6 August 1998: (a) 700 hPa; (b) 500 hPa.

همان طور که بر روی نقشه‌های ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود در این دو تراز به عنوان نماینده ترازهای میانی جو اندرکنش زبانه کم فشار پاکستان و زبانه واچرخند مهاجر بر روی دریاچه مازندران و بخصوص پهنه شمالی ایران سبب شکل گیری تند بادهای شدید بر روی این منطقه از کشور شده است. شکل گیری میدانی از امگای منفی در همین محدوده و بخصوص بر روی نقشه تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بیانگر حاکمیت جریانات بالا سوی قوی در لایه میانی می باشد. این جریانات ناپایدار و بالا سوی قوی در لایه میانی در همزمانی با فرارت رطوبت بسیار خوب (بیش از ۱۸ تا ۲۲ گرم بر کیلوگرم) در لایه زیرین و ردسپهر زمینه شکل گیری توفان های تندی را بر روی کلانشهر تهران وبخصوص ایستگاه های شمال شرقی استان و شهر تهران را فراهم کرده است.

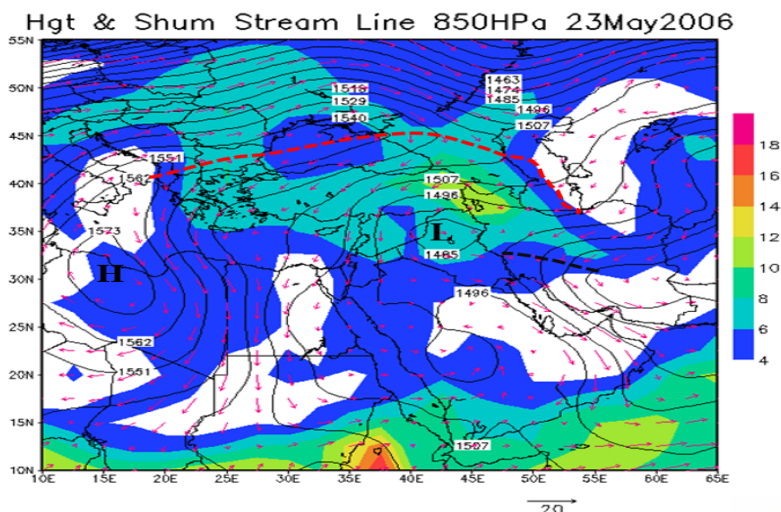
الگوی همدیدی کم فشار پاکستان- پرفشار مهاجر

این الگو ۱۰ نمونه از ۴۹ نمونه‌ی توفان‌های تندری رخ داده در کلان‌شهر تهران را در دوره‌ی آماری ۳۳ ساله به خود اختصاص داده است. در این الگو نیز سامانه‌های عامل در شکل‌دهی توفان تندری در لایه‌های زیرین و میانی وردسپهر، از آرایش متنوع و بعضاً متفاوتی برخوردار بوده‌اند. برای تحلیل عملکرد و ساختار سامانه‌ها در این الگو، سامانه‌ی ۲۳ مه ۲۰۰۶ به‌عنوان نماینده‌ی این الگو انتخاب شده است. اشکال ۴-۴۲ تا ۴-۴۶ ساختار و آرایش سامانه‌ها را در تراز زیرین وردسپهر (ترازهای ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال) نشان می‌دهد. در این الگو، از ۳ تا ۴ روز قبل از شکل‌گیری سامانه‌ی تندری بر روی شمال و شمال غرب ایران، سامانه‌ی مونسونی در بخش شمالی دریای عرب و در تمام پهنه‌ی دریای عمان، با شکل‌دهی تندبادهای مونسونی و فرارفت رطوبتی شدید در ضلع جنوبی کم‌فشار پاکستان و تزریق انرژی گرمایی مناسب به‌درون سامانه، سبب تقویت هرچه‌بیشتر این سامانه می‌گردد. بدین ترتیب، زبانه‌ی غربی آن در گردشی چرخندی بر روی بخش جنوبی ایران و شبه‌جزیره‌ی عربستان گسترش می‌یابد. در این شرایط، کم‌فشار عربستان متأثر از این سامانه‌ی قدرتمند و در ادغام با این سامانه، تمام پهنه‌ی غربی آسیا را دربر می‌گیرند. با گسترش غرب‌سوی این سامانه‌ی حرارتی و ایجاد شیو دمایی در غرب آسیا، زبانه‌ی پرفشار مهاجر با عبور از بخش شمال غربی و شمالی ایران، پهنه‌ی شمالی ایران را دربر می‌گیرد. تندبادهای شکل‌گرفته در بخش شمال و شمال شرق ایران، مؤید این شیو دمایی قوی بر روی منطقه است. جریانات و اچرخندی شکل‌گرفته بر روی دریای سیاه و دریایچه‌ی مازندران سبب فرارفت رطوبتی از دریاهای منطقه به بخش شمالی و شمال غربی ایران شده است. این پدیده در تمام ضخامت لایه‌ی زیرین وردسپهر (ترازهای ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال) و بالاتر به چشم می‌خورد. میدان‌های رطوبتی قوی شکل‌گرفته در تمام پهنه‌ی بین دریای سیاه تا شمال و شمال غرب ایران مؤید این پدیده می‌باشد (شکل ۶ الف و ب و شکل ۷).



شکل ۶- نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و نم و برف در روز ۲۳ مه ۲۰۰۶: (الف) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال؛ (ب) تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال

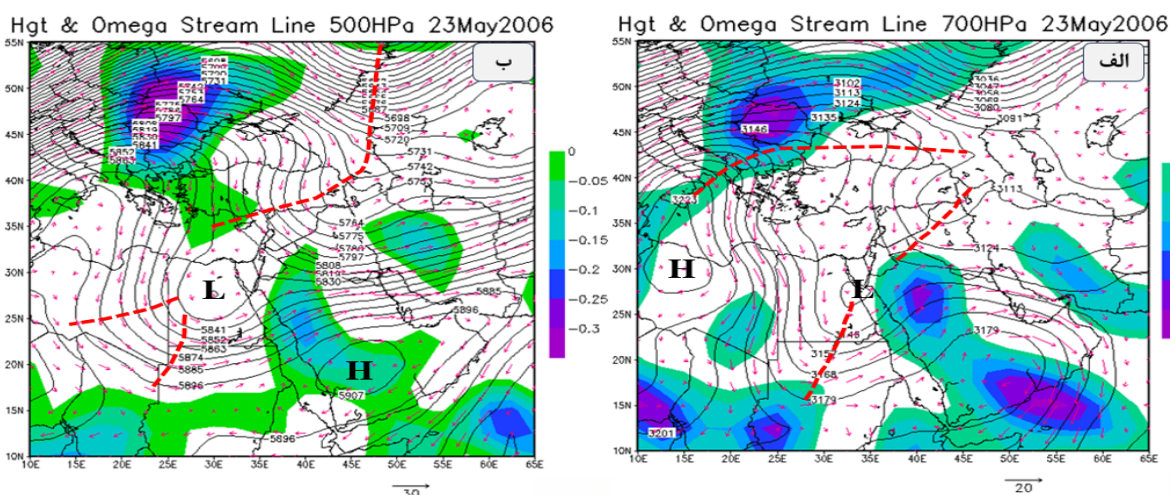
Fig. 6. Multi-variable maps of geopotential height, wind vectors, and specific humidity on 23 May 2006: (a) 1000 hPa; (b) 925 hPa.



شکل ۷- نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و نم ویژه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روز ۲۳ مه ۲۰۰۶.

Fig. 7. Multi-variable map of geopotential height, wind vectors, and specific humidity at 850 hPa on 23 May 2006

در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، باید این رطوبت فراوان فرارفت‌شده در ترازهای زیرین همگرا شده و با میعان و آزادسازی گرمای نهان و بالقوه‌ی تجمع‌یافته در لایه‌ی زیرین، انرژی ترمودینامیکی لازم را برای شکل‌گیری تندرهای شدید فراهم نماید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در محدوده‌ی منطقه‌ی مطالعاتی، هوایی آرام و تقریباً بدون جهت‌گیری افقی حاکم است. این شرایط بیانگر این است که در این الگو، تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به‌عنوان لایه‌ی انتقالی یا لایه‌ی مرزی تراز زیرین و میانی وردسپهر عمل می‌کند؛ هرچند بر روی پهنه‌ی مرکزی کشور جریانات بالاسوی قوی حاکم است. با گذر از تراز ۷۰۰ به ۵۰۰ هکتوپاسکال، میدانی بسیار قوی از امگای منفی حاکم شده و تندبادهای افقی نیز تقویت شده است. این میدان قوی با امگای منفی بر روی منطقه، مؤید حاکمیت جریانات بالاسوی قوی بوده و با همرفت رطوبت فراوان انتقالی از لایه‌ی زیرین و رهاسازی انرژی ترمودینامیکی قوی، زمینه‌ی شکل‌گیری تندرهای قوی را فراهم نموده است (شکل ۸ الف و ب).

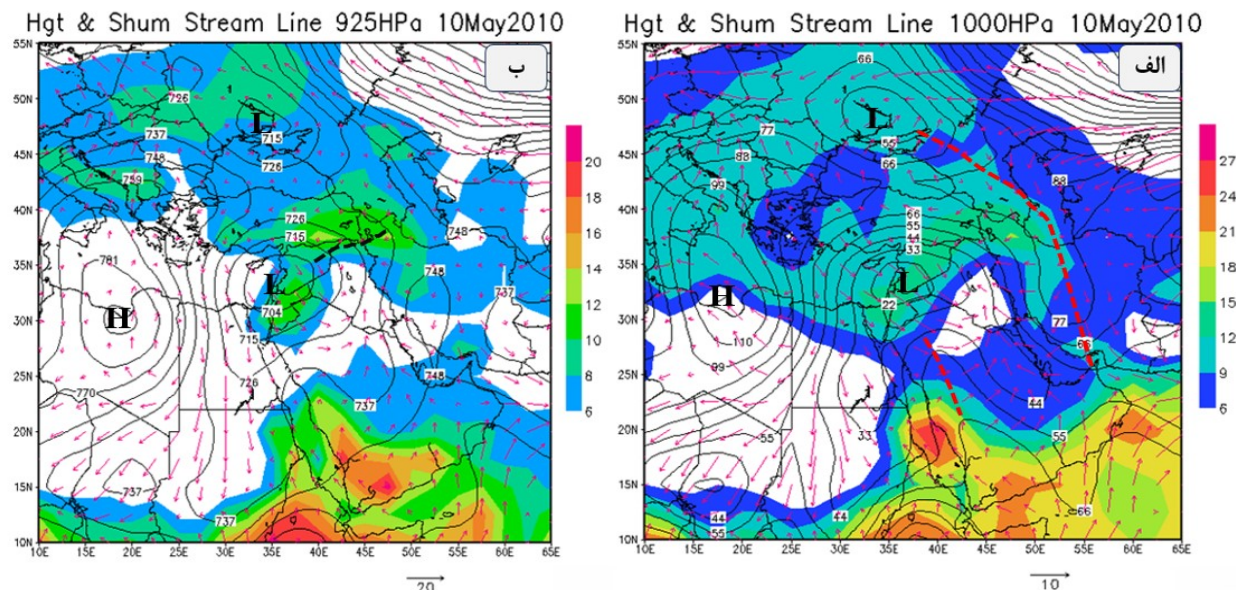


شکل ۸- نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و امگا در روز ۲۳ مه ۲۰۰۶: (الف) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ (ب) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

Fig. 8. Multi-variable maps of geopotential height, wind vectors, and omega on 23 May 2006: (a) 700 hPa; (b) 500 hPa.

الگوی کم‌فشار سودان - چرخند اروپایی

این الگو ۵ نمونه از مجموع ۴۹ نمونه‌ی توفان‌های تندری را به خود اختصاص داده است. در این الگو، دو سامانه‌ی کم‌فشار سودان و واچرخند مهاجر در لایه‌های زیرین وردسپهر، سامانه‌های مؤثر در شکل‌دهی الگو و سازوکار منجر به تکوین توفان تندری بر روی منطقه‌ی مطالعاتی شده‌اند. اشکال ۹ تا ۱۱ الگوی حاکم در لایه‌ی زیرین وردسپهر را در روز شکل‌گیری توفان رعد و برق نشان می‌دهد. در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، زبانه‌ای بسیار عمیق با راستای جنوبی-شمالی با مرکزیت کم‌فشار سودان از محدوده‌ی کشورهای سودان، اتیوپی و خلیج عدن به عرض‌های شمالی گسترش یافته و این زبانه تا جنوب دریای سیاه امتداد دارد. در این محدوده، زبانه‌ی کم‌فشار سودان با چرخند اروپایی که در این روز در محدوده‌ی شمال دریای سیاه استقرار دارد، ادغام شده است. در این آرایش همدیدی و الگوی جریان حاصل از ادغام زبانه‌های این دو سامانه، رطوبت دریاچه‌ی مازندران در گردشی چرخندی توسط جریانات شمال-شمال‌شرقی بر روی بخش شمالی و شرقی، و از طریق جریانات جنوب-جنوب‌شرقی به بخش جنوب‌غربی و غرب ایران فرارفت شده است. پهنه‌ی رطوبتی تقریباً تمام پهنه‌ی کشور را دربر گرفته است؛ با این‌همه، رطوبت فرارفت‌شده در بخش شمالی و شمال‌غربی بیش از سایر نقاط کشور می‌باشد. هسته‌های رطوبتی با بیش از ۱۵ گرم بر کیلوگرم در این محدوده، نشان‌دهنده‌ی این امر است.

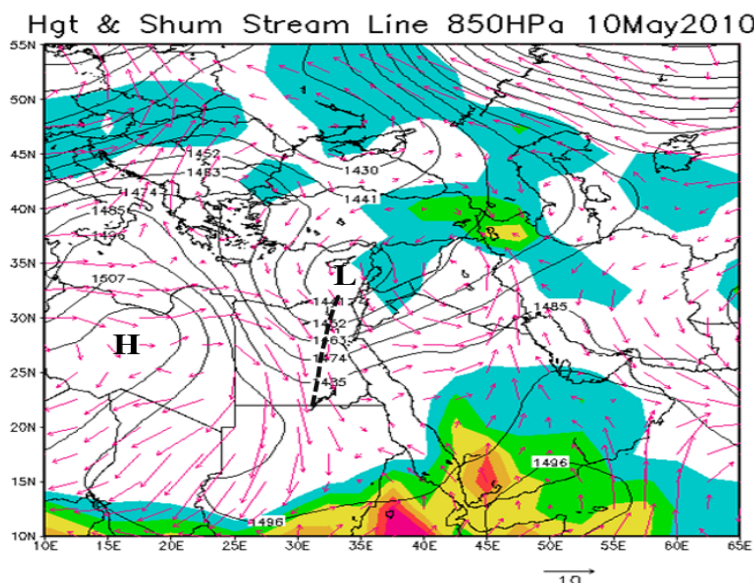


شکل ۹- نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و نم و یژه در روز ۱۰ مه ۲۰۱۰: (الف) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال؛ (ب) تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال

Fig. 9. Multi-variable maps of geopotential height, wind vectors, and specific humidity on 10 May 2010: (a) 1000 hPa; (b) 925 hPa.

در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال، دو سامانه‌ی چرخندی به‌شکل بارزتری بر روی نقشه‌ی همدیدی تظاهر پیدا کرده و تمام پهنه‌ی طول‌های ۳۰ تا ۵۰ درجه‌ی شرقی و عرض‌های ۱۰ تا ۶۰ درجه‌ی شمالی (که تمام پهنه‌ی غرب آسیا را شامل می‌شود) را دربر گرفته است. هسته‌ی مرکزی کم‌فشار سودانی با پربند ۷۰۴ ژئوپتانسیل‌متر بر روی سوریه و لبنان، و هسته‌ی مرکزی چرخند اروپایی با پربند ۷۱۵ ژئوپتانسیل‌متر در شمال دریای سیاه استقرار دارد. این ترکیب همدیدی همانند تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، نقش اساسی در فرارفت رطوبت دریاچه‌ی گرم جنوبی به بخش غربی کشور و رطوبت دریاچه‌ی سیاه و مازندران به بخش شرقی و شمالی کشور بر عهده دارد. در این تراز نیز میدان رطوبتی ایجادشده در بخش شمالی و شمال‌غربی قوی‌تر از سایر بخش‌های کشور است. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، با دور شدن از واداشتهای سطحی، ساختار سامانه‌ها تغییر کرده و الگوهای دینامیکی بر الگوهای حرارتی چیره شده

است. در این تراز، ناوه‌ی عمیقی که تمام پهنه‌ی ۲۵ تا ۵۵ درجه‌ی شرقی (میانه‌ی دریای مدیترانه تا غرب ایران) و عرض‌های ۱۰ تا ۵۵ درجه‌ی شمالی (سودان تا شمال دریای سیاه) را دربر گرفته است، بر روی سامانه‌های چرخندی لایه‌ی زیرین تظاهر پیدا کرده است. تندبادهای شکل گرفته در بخش شرقی ناوه، نشان‌دهنده‌ی چینش قائم شدید می‌باشد. این فرایند زمینه‌ی شکل‌گیری جریانات قائم و همرفتی قوی بر روی منطقه می‌باشد. شکل (۱۱ الف و ب)، الگوی همیدی ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال را نشان می‌دهد. در این ترازها، ناوه در همان محدوده‌ی جغرافیایی ناوه‌ی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، منتها بسیار قوی‌تر ظاهر شده است. شیو ارتفاعی ایجادشده در تمام پهنه‌ی ناوه، بیانگر این شیو ژئوپتانسیلی می‌باشد. منطقه‌ی غربی ایران و استان تهران نیز در مناسب‌ترین بخش از جلوی ناوه قرار دارد. شکل‌گیری میدانی قوی از امگای منفی با بزرگای ۰/۲- و ۰/۱۵- پاسکال بر ثانیه، بیانگر جریانات بالاسوی قوی بر روی منطقه است. الگوی ساختاری ایجادشده، شرایط بسیار مناسبی را برای تکوین و تقویت جریانات همرفتی و شکل‌گیری توفان تندی بر روی منطقه فراهم کرده است. فرارفت رطوبت مناسب در لایه‌های زیرین برای تأمین رطوبت و انرژی ترمودینامیکی جریانات بالاسو، و وجود میدانی گسترده و قوی از جریانات بالاسو در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، شکل‌گیری ابرهای همرفتی قوی همراه با تندر را فراهم نموده است.



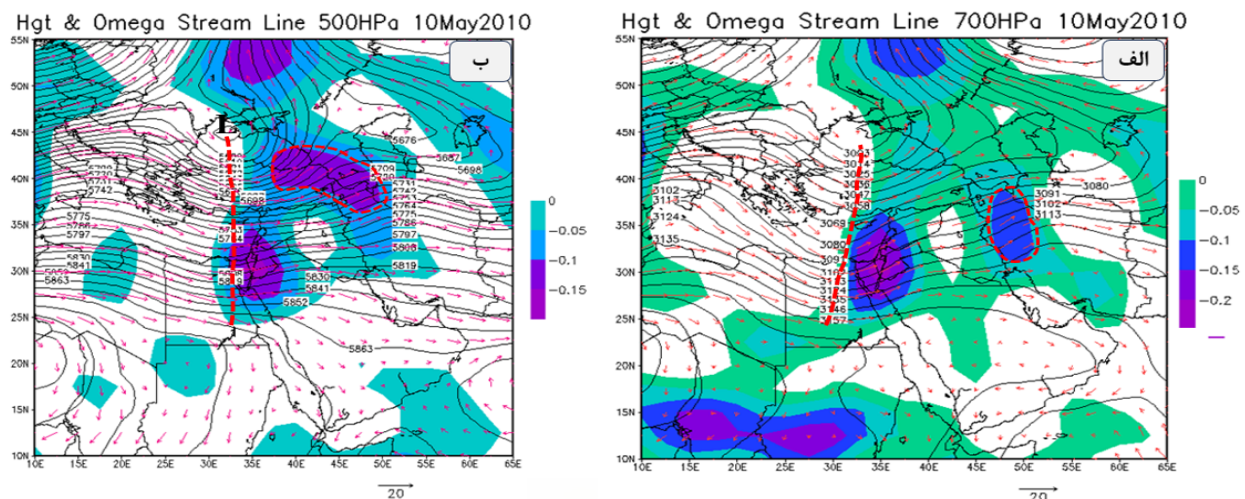
شکل ۱۰- نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و نم ویژه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روز ۱۰ مه ۲۰۱۰

Fig. 10. Multi-variable map of geopotential height, wind vectors, and specific humidity at 850 hPa on 10 May 2010

نتایج این پژوهش نشان داد که رخدادهای رعدوبرقی منتخب در استان تهران با برهم‌کنش شرایط همیدی، رطوبت لایه‌های زیرین، واداشتهای دینامیکی و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه ارتباط دارند. تمرکز زمانی این رخدادها در فصل بهار، به‌ویژه در ماه‌های آوریل و مه، نشان می‌دهد که دوره گذار از فصل سرد به گرم، در داده‌های بررسی‌شده، با فراوانی بیشتری از رخدادهای رعدوبرقی همراه بوده است. در این دوره، افزایش گرمایش سطحی، فراهم‌بودن نسبی رطوبت در لایه‌های زیرین جو و هم‌زمانی آن با عبور یا استقرار آرایش‌های همیدی مساعد، می‌تواند زمینه لازم را برای توسعه ابرهای همرفتی و وقوع رعدوبرق فراهم کند. بنابراین، الگوی زمانی مشاهده‌شده بیانگر اهمیت فصل انتقال در رخدادهای رعدوبرقی ثبت‌شده در استان تهران است. غلبه رخدادهای یک‌روزه در میان طبقات مختلف تداوم زمانی نیز نشان می‌دهد که بخش عمده رخدادهای بررسی‌شده ماهیتی کوتاه‌تداوم دارند و با آرایش‌های گذرای جو همراه‌اند. این یافته بیانگر آن است که در بسیاری از موارد، وقوع رعدوبرق در منطقه با هم‌زمانی نسبتاً کوتاه‌مدت، اما مؤثر

رطوبت، گرمایش سطحی و صعود دینامیکی ارتباط دارد. رخدادهای چندروزه، با وجود فراوانی کمتر، از نظر استمرار شرایط ناپایدار و امکان تداوم پیامدهای جوی در منطقه اهمیت دارند؛ باین‌حال، ارزیابی شدت مخاطره یا ظرفیت تولید بارش شدید و تندباد برای این رخدادها، مستلزم استفاده از داده‌های شدت بارش، تندباد و شاخص‌های مخاطره است که در چارچوب این پژوهش بررسی نشده‌اند.

تحلیل همدیدی نمونه‌های منتخب یک‌روزه، که بر پایه آستانه صدک ۹۰ انتخاب شدند، نشان داد که سه الگوی «کم‌فشار عربستان-پرفشار مهاجر»، «کم‌فشار پاکستان-پرفشار مهاجر» و «کم‌فشار سودان-چرخند اروپایی»، پرتکرارترین آرایش‌های جوی مرتبط با این نمونه‌ها هستند. وجه مشترک این الگوها، فرارفت هوای گرم از عرض‌های جنوبی بوسیله سامانه‌های حرارتی عربستان، پاکستان و سودان و فرارفت هوای سرد عرض‌های جنب قطبی و شکل‌گیری یک خط ناپایدار در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی می‌باشد.



شکل ۱۱- نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و امگا در روز ۱۰ مه ۲۰۱۰: (الف) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ (ب) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال
Fig. 11. Multi-variable maps of geopotential height, wind vectors, and omega on 10 May 2010: (a) 700 hPa; (b) 500 hPa

رطوبت این سامانه‌ها از طریق دریا‌های سیاه و مازندران بوسیله واچرخند مهاجر یا چرخند اروپایی در لایه زیرین وردسپهر فراهم شده است این نتایج با یافته‌های پژوهش درستکار گل‌خیلی و همکاران (Dorostkar Golkhaili et al., 2025) تحت عنوان واکاوری الگوهای همدیدی پرتکرار در ایجاد ترسالی‌های شدید شمال ایران همخوانی دارد. نامبرده در این پژوهش نتیجه گرفته است که الگوهای واچرخند مهاجر و الگوی کم‌فشار سودان-واچرخند مهاجر نسبت به سایر الگوها پرتکرار بوده و نقش اساسی را در فرارفت رطوبت از دریای خزر بر روی منطقه داشته است. با وجود این، در هر یک از الگوها آرایش فضایی و سامانه‌های تأثیرگذار تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در برخی موارد، نقش سامانه‌های حرارتی ناحیه‌ای و مسیر انتقال رطوبت برجسته‌تر است و در برخی دیگر، واداشت‌های دینامیکی ترازهای میانی و بالایی جو اهمیت بیشتری دارند. با این همه نقش دریا‌های شمالی بخصوص دریاچه مازندران در تأمین رطوبت سامانه‌ها بسیار چشمگیر می‌باشد. بررسی انجام شده بر روی آرایش سامانه‌ها در ترازهای میانی وردسپهر در همه ۱۴ الگوی همدیدی منجر به رخداد توفان‌های رعد و برقی نشان داد که در همه این الگوها ناوه مدیترانه‌ای با گسترش جنوب‌سوی قابل توجه نقش اساسی در تشدید جریانات بالا‌سوی قوی و شکل‌گیری سلول‌های همرفتی کوچک مقیاس متعدد با فواصل زمانی کوتاه مدت در یک روز داشته است. در اکثر قریب به اتفاق سامانه‌ها مرکز کم‌ارتفاع بریده دورن ناوه جابجایی جنوب‌سوی بسیار قابل توجه داشته است. به‌طوری که گاه این مرکز کم‌ارتفاع در عرض‌های کمتر از ۳۰ درجه شمالی تشکیل پیدا کرده و

تا شمال دریای سرخ گسترش یافته است. نتیجه این گسترش جنوب سوی قابل توجه مرکز کم ارتفاع بریده؛ شیو ارتفاعی و فشاری شدیدی را در نیمه غربی ایران ایجاد کرده است. شکل گیری میدان های قوی با امگای منفی در تمام ترازهای میانی موید این شرایط ناپایدار قوی است. بنابراین سامانه های تندری همراه با رعد و برق تهران در یک الگوی ترکیبی محلی و همدیدی تکوین می یابد. نقش واداشت های سطحی در فصول گذر و توپوگرافی مناسب منطقه در ترازهای زیرین وردسپهر و استقرار سامانه های همدیدی بزرگ مقیاس در ترازهای میانی وردسپهر عامل اصلی این توفان ها می باشند.

در این پژوهش، چرخه های خورشیدی صرفاً به عنوان چارچوبی برای طبقه بندی زمانی داده ها به کار رفته اند و آزمون علی برای بررسی ارتباط فعالیت خورشیدی با رخداد های رعدوبرقی انجام نشده است. با این همه نتایج بررسی آماری پراکنش سامانه های رعد و برقی نشان داد که تعداد رخداد توفان های رعد و برقی از سیکل ۲۲ به سیکل ۲۳ روند افزایشی داشته است. ولی از سیکل ۲۳ به سیکل ۲۴ تعداد توفان ها سیر نزولی داشته اند. در دو سیکل ۲۲ و ۲۳ تمرکز اصلی توفان های رعد و برقی در نیمه دوم سیکل؛ ولی در سیکل ۲۴ این تمرکز به نیمه اول سیکل منتقل شده است. با این همه بیشترین تعداد توفان های تندری در سالهای ابتدایی و انتهای سیکل تمرکز دارد. از لحاظ پراکنش ماهانه و فصلی در هر سه سیکل تمرکز اصلی توفان های تندری در دو ماه آوریل و می و در مجموع در فصل بهار رخ داده است. در یک جمع بندی کلی میتوان گفت سیکل ۲۴ در مقایسه با دو سیکل خورشیدی قبل از بی نظمی زیادی برخوردار بوده است. این جابجایی هم در تعداد توفان ها و هم در تمرکز سیکلی و ماهانه رخ داده است. به طور ی که تمرکز توفان ها از ماه آوریل به ماه می منتقل شده و همچنین تمرکز توفان ها از نیمه دوم سیکل به نیمه اول سیکل جابجا شده است. این پدیده نه تنها میتواند شواهدی بر تشدید تغییرات اقلیمی در سالهای اخیر باشد بلکه نقش کلانشهر تهران و تشدید نقش خرد اقلیم تهران بر رخداد توفان های تندری را مطرح نماید. بررسی ارتباط نقش خرد اقلیم ها بر رخداد توفان های تندری و نقش تغییرات اقلیمی بر جابجایی سیکلی آنها در تحقیقات آتی توصیه می شود. بر اساس نتایج لشکری و همکاران (Lashkari et al., 2026) در مقاله واکاوری پراکنش و تغییرات زمانی- مکانی توفان های تندری در جنوب غرب ایران بیشترین تعداد رخداد توفان های تندری در ابتدا و انتهای سیکل ها و کمترین تعداد آنها در میانه سیکل رخ داده است که نتایج این تحقیق با نتایج آن همخوانی دارد. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می دهد که رخداد های رعدوبرقی منتخب استان تهران در بستر تعامل میان انتقال رطوبت، گرمایش سطحی، واداشت دینامیکی و ویژگی های ناهمواری منطقه شکل می گیرند. شناسایی آرایش های همدیدی پرتکرار می تواند به درک بهتر سازوکارهای جوی مرتبط با این رخدادها کمک کند و، در کنار داده های تکمیلی مشاهده ای و پیش بینی، برای ارتقای پایش و پیش بینی کوتاه مدت رعدوبرق در استان تهران سودمند باشد. تمرکز بیشتر رخداد های رعدوبرقی منتخب در ماه های آوریل و می، با نتایج پژوهش احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2015) درباره الگوی زمانی- مکانی توفان های تندری استان تهران هم راستا است. همچنین، همراهی رطوبت لایه های زیرین با صعود و واداشت های دینامیکی در ترازهای میانی در الگوهای شناسایی شده، با نتایج لشکری و حجتی (Lashkari & Hejati, 2012) درباره نقش همگرایی لایه های پایین و ناوهای تراز میانی در رخداد توفان های تندری جنوب غرب ایران سازگاری دارد. برجستگی نسبی الگوی سودان- چرخند اروپایی نیز با تأکید لشکری و همکاران (Lashkari et al., 2016؛ et al., 2024) بر اهمیت سامانه های سودانی و رطوبت در شکل گیری توفان های تندری قابل مقایسه است؛ هرچند نقش منابع رطوبتی در پژوهش حاضر بر پایه آرایش باد و نم ویژه تفسیر شده است.

نتیجه گیری

رخداد های رعدوبرقی، به ویژه هنگامی که با بارش، تندباد و بادهای گاستی و تخلیه های الکتریکی جو همراه باشند، می توانند مخاطراتی برای فعالیت های انسانی و زیرساخت های حساس ایجاد کنند. شهر تهران، به عنوان پایتخت کشور و یکی از مهم ترین کانون های جمعیتی و خدماتی ایران، دارای فرودگاه های بین المللی، داخلی، باربری و نظامی متعددی است و روزانه حجم قابل توجهی از پروازهای داخلی و خارجی در آن انجام می شود. از این رو، شناخت شرایط جوی همراه با رخداد های رعدوبرقی در استان تهران،

می‌تواند از منظر پایش و پیش‌بینی کوتاه‌مدت مخاطرات جوی اهمیت داشته باشد. پراکنش ماهانه رخدادهای رعدوبرقی نشان داد که بیشترین فراوانی آن‌ها در ماه‌های آوریل و می رخ داده است. تمرکز رخدادها در این ماه‌ها، با ویژگی دوره گذار از فصل سرد به گرم و احتمال همراهی گرمایش سطحی، رطوبت لایه‌های زیرین و آرایش‌های همدیدی مساعد سازگار است. با وجود این که بیشترین سامانه‌های بارشی در دوره سرد سال رخ می‌دهد تمرکز توفان‌های تندری همراه با رعد و برق در فصول گذر بیانگر نقش غیر قابل انکار واداشت‌های سطحی و نقش توپوگرافی محلی در تشدید سامانه‌های همرفتی دارد. با اینهمه سامانه‌های همدیدی منطقه ای و فرامنطقه ای برای شکل‌گیری ناپایداری‌های محلی شرط لازم می‌باشد. میدان‌های نم‌ویژه گسترده شکل گرفته در تمام پهنه شمالی و شمال غربی کشور نشان از فرارفت رطوبت در یک پهنه همدیدی و سامانه‌های بزرگ مقیاس همدیدی دارد. بررسی الگوهای همدیدی پرتکرار در میان ۴۹ نمونه از رخدادهای یک‌روزه منتخب نشان داد که الگوی کم‌فشار عربستان-پرفشار مهاجر با ۱۷ عضو، پرتکرارترین الگوی شناسایی شده در این پژوهش است. الگوی کم‌فشار پاکستان-پرفشار مهاجر با ۱۰ عضو در مرتبه دوم قرار دارد. به این ترتیب واچرخند مهاجر در ۲۷ سامانه از ۴۹ سامانه منجر به رخداد توفان رعد و برقی و با احتساب دو الگوی کم تکرار دیگر در ۲۹ سامانه مشارکت داشته است. در این الگوها واچرخند مهاجر نقش اساسی در فرارفت هوای سرد عرض‌های جنب قطبی به بخش شمالی کشور و تشدید شیو دمایی و فشاری شدید در مرز برخورد زبانه‌های این سامانه با زبانه سامانه‌های گرم انتقالی از عرض‌های جنوبی در دامنه‌های پیشکوهی رشته کوه‌های البرز شده است. خط ناپایداری شکل گرفته در مرز این دو سامانه در لایه زیرین وردسپهر مهمترین نقش را در شکل‌گیری سلول‌های همرفتی بر روی استان تهران داشته است. همچنان که ملاحظه شد در دو الگوی پرتکرار سامانه واچرخندی مهاجر نقش برتر را در فرارفت رطوبتی از دریاهای سیاه و مازندران بر روی منطقه شمالی و شمالی غربی کشور داشته است. همان‌طور که ملاحظه شد. پراکنش مکانی رخدادهای رعدوبرقی در ایستگاه‌های استان تهران یکنواخت نیست. فراوانی بیشتر رخدادها در ایستگاه‌هایی مانند فیروزکوه و فرودگاه بین‌المللی امام خمینی قابل بحث می‌باشد. فراوانی بیشتر تعداد رخدادهای رعد و برق در ایستگاه‌هایی مانند فیروزکوه دلیل شرایط توپوگرافی (ارتفاع و دالان‌های عبوری رطوبت) کاملاً نقش تشدید کننده پدیده همرفتی ناشی از عامل توپوگرافی را توجیه می‌کند. ولی فراوانی بالای پدیده رعد و برق در ایستگاهی مانند فرودگاه بین‌المللی امام خمینی کاملاً بر نقش واداشت‌های سطحی شدید در پیشانی شمالی دشت در لایه زیرین وردسپهر و وجود شرایط مناسب همدیدی در لایه میانی عامل اصلی شکل‌گیری خط ناپایداری و سلول‌های همرفتی کوچک مقیاس در جنوب استان شده است. با توجه به جایگاه فرودگاه بین‌المللی امام خمینی در شبکه حمل‌ونقل هوایی کشور و فراوانی قابل توجه رخدادهای رعدوبرقی ثبت شده در این ایستگاه، نتایج پژوهش می‌تواند بر ضرورت توجه بیشتر به پایش شرایط رعدوبرقی در محدوده فرودگاه و پیرامون آن تأکید کند. بهره‌گیری تلفیقی از داده‌های ایستگاهی، سامانه‌های آشکارسازی صاعقه، رادار هواشناسی و پیش‌بینی‌های عددی می‌تواند در ارتقای سامانه‌های هشدار کوتاه‌مدت و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های هوانوردی سودمند باشد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

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 باری رساندند، به ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

- Ahmadi, M., Ghavidel Rahimi, Y., & Janathari, M. (2015). Annual spatio-temporal analysis of thunderstorm events in Tehran Province. *Physical Geography*, 8(28), 87-100. [In Persian] https://jgs.khu.ac.ir/article_11676.html
- Alizadeh, H., Asakereh, H., & Raeis Pour, K. (2025). General characteristics of lightning phenomena in Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 140-165. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.89265.1508>
- Azizi, Q., Gerami, M. S., & Sharifi, L. (2017). Spatial analysis of thunderstorms across Iran. *Applied Research in Geographical Sciences*, 17(47), 241-257. [In Persian] <https://jgs.khu.ac.ir/article-1-2914-fa.html>
- Brooks, H. E., Lee, J. W., & Craven, J. P. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, 67-68, 73-94. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00045-0)
- Dananyani, P., Soreh, E., & Mohammadi, B. (2023). Investigation of thunderstorm events in Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 10(2), 97-114. [In Persian] <https://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3418-fa.html>
- Dorostkar Golkhaili, H., Lashkari, H., & Mohammadi, Z. (2025). Analysis of the Spatial Position of the Subtropical Jet Stream and Synoptic Conditions Influencing Extreme Wet Years in Northeast of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 1-20. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.91689.1542>
- Doswell, C. A. (2001). Severe convective storms—An overview. *Meteorological Monographs*, 28(50), 1-26. [https://doi.org/10.1175/0065-9401\(2001\)028<0001:SCSAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/0065-9401(2001)028<0001:SCSAO>2.0.CO;2)
- Emanuel, K. A. (1994). *Atmospheric convection*. New York, NY: Oxford University Press.
- 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>
- Ghavidel Rahimi, Y., Farajzadeh Asl, M., & Baghbanan, P. (2015). Temporal trends of thunderstorm hazard changes in Iran. *Spatial Planning and Geomatics*, 19(2), 185-210. [In Persian] <https://hsmasp.modares.ac.ir/article14474.html>
- Lashkari, H., & Aghasi, N. (2013). Synoptic analysis of thunderstorms in Tabriz during 1996-2005. *Geography and Planning*, 17(45), 203-234. [In Persian] https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_576.html
- Lashkari, H., & Hejati, Z. (2012). Synoptic-dynamic analysis of thunderstorms in southwestern Iran. *Sepehr Journal of Geographical Information*, 21(82), 14-21. [In Persian] <https://doi.org/20.1001.1.25883860.1391.21.82.3.7>
- Lashkari, H., Mohammadi, Z., Naji, M., & Fadaei Bash, A. R. (2024). Spatio-temporal distribution and variability of thunderstorms in southern Iran during the last three solar cycles. *Physical Geography Research*, 56(4), 89-106. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2025.387701.1007864>
- Lashkari, H., Mohammadi, Z., Naji, M., & Fedayi Bash, A. (2026). Analysis of the spatial and temporal distribution and changes of thunderstorms in southwestern Iran over the last three solar cycles. *Researches in Earth Sciences*, 16(4), 176-194. <https://doi.org/10.48308/esrj.2026.238555.1256>
- Lashkari, H., Yarmohammadi, Z., & Mousavi, H. (2016). Statistical and synoptic analysis of thunderstorms in Kohgiluyeh and Boyer Ahmad Province. *Geography and Environmental Studies*, 5(18), 135-151. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/fa/Article978699>
- Markowski, P., & Richardson, Y. (2010). *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Chichester, England: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9780470682104>
- Masoumpour Samakoush, J., Miri, M., & Rahimi, M. (2016). Statistical-synoptic investigation of thunderstorms along the southern coasts of Iran. *Earth and Space Physics*, 42(3), 697-708. [In Persian] <https://doi.org/20.1001.1.2538371.1395.42.3.18.8>

- Mojarad, F., Masoumpour, J., Koushki, S., & Miri, M. (2019). Spatio-temporal analysis of thunderstorms in Iran. *Geographical Space Planning*, 9(32), 213-232. [In Persian] <https://doi.org/10.30488/gps.2019.91873>
- Nisi, L., Martius, O., & Hering, A. (2016). Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(698), 1590-1604. <https://doi.org/10.1002/qj.2771>
- Singh, D., Singh, R. P., Kamra, A. K., Gupta, P. N., Singh, A. K., & Gopalakrishnan, V. (2011). Solar activity, lightning, and climate. *Surveys in Geophysics*, 32(6), 659-703. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9127-1>
- Tinsley, B. A. (2008). The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics. *Reports on Progress in Physics*, 71(6), 066801. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/71/6/066801>
- Trapp, R. J. (2013). *Mesoscale-convective processes in the atmosphere*. Cambridge, England: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139044251>