

Spatial and temporal changes in aviation hazards of thunderstorm and low-level wind shear in Iran

Mohsenbeigi, A.¹  | Gharaylou, M.¹   | Sabetghadam, S.¹ 

1. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: gharaylo@ut.ac.ir

(Received: 26 April 2026, Revised: 22 July 2026, Accepted: 15 Aug 2026, Published online: 5 Sep 2026)

Summary

Weather condition is one of the most important natural factors affecting the aviation industry. Although many details of climatological characteristics and long-term changes in some basic meteorological variables such as temperature, wind, and precipitation have been investigated, a few studies have focused on aviation-specific meteorological hazard. The present study analyzes the spatial and temporal variability of thunderstorm (TSTM) and low-level wind shear (LLWS), which both are aviation hazards. In this regard, ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) has been used to identify areas and airports prone to thunderstorms and low-level wind shear in Iran over a 45-year period from 1979 to 2023.

In order to determine the number of occurrences of hazardous conditions due to TSTM and LLWS, it is necessary to extract a threshold as an indicator of the potential hazard of each phenomenon. The CAPE index is often used to identify thunderstorm-prone environments. The convective precipitation index is also considered. Determining a threshold for LLWS is challenging. A value of 3 knots per 100 feet has been applied in this study. It should also be noted that due to the resolution limitations of the reanalysis data and the parameterization of many processes, the wind shear obtained in this study is mainly the result of synoptic-scale pressure gradients and is not related to local phenomena such as microbursts. Although the defined thresholds have a physical basis, it should be noted that they are merely indicators of a potential situation for hazardous occurrence. Such analyses are subject to probabilistic interpretation and may be accompanied by uncertainty. Therefore, the results obtained should be interpreted with caution.

The results of this study show that the areas located in the northern half, west, southwest and parts of the southern strip of Iran are more affected by the risk of thunderstorms than other areas. Additionally, regions in the east and center of Iran and limited parts of the northwest and west of Khuzestan and a major part of the Persian Gulf are affected by the risk of low-level wind shear formation. In summer, TSTM activity is mainly limited to the northern regions of the country, while in winter, this threat is transferred to the southern regions. The reason for this seasonal shift is that in the southern regions, the arrival of cyclonic systems from the northwest of Iran, along with the moisture transport from the Persian Gulf, leads to the strengthening of convective instabilities and an increase in the occurrence of this hazard. In the northern regions of Iran, during the summer season, the process of evapotranspiration caused by vegetation and local water resources plays a dominant role in providing moisture and, together with the intense heating of the earth's surface, leads to the formation of the TSTM hazard. The largest spatial extent covered by TSTM is observed in the spring season and the maximum hours of occurrence of this hazard are observed in the summer. LLWS has the smallest spatial extent in the autumn and summer seasons. However, in the summer, its maximum values are observed in limited areas of eastern Iran. This is mainly influenced by the activity of the 120-day Sistan winds. Also, in the west of Khuzestan province and a significant part of the Persian Gulf, the maximum occurrence of this phenomenon is observed in this season, which is due to the impact of the dynamic activity of the summer Shamal wind in this region.

Keywords: thunderstorm, low-level wind shear, ERA5, Iran.

Cite this article: Mohsenbeigi, A., Gharaylou, M., & Sabetghadam, S. (2026). Spatial and temporal changes in aviation hazards of thunderstorm and low-level wind shear in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 52(2), 419-434. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.412939.1007770>

E-mail: (1) azimeh.beigi@ut.ac.ir | ssabet@ut.ac.ir



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.412939.1007770>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

تغییرات مکانی و زمانی مخاطرات هوانوردی ناشی از توفان تندری و چینش باد ترازپایین در منطقه ایران

عظیمه محسن بیگی^۱ | مریم قرایلو^۱ | سمانه ثابت قدم^۱

۱. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: gharaylo@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۵/۲/۶، بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۳۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۵/۲۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۶/۱۴)

چکیده

وضع هوا یکی از مهم‌ترین عوامل طبیعی تأثیرگذار در صنعت حمل‌ونقل هوایی می‌باشد. اگرچه تاکنون بسیاری از جزئیات جنبه‌های اقلیمی و تغییرات بلندمدت برخی متغیرهای اساسی هواشناسی مانند دما، باد و بارش مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما تعداد محدودی از مطالعات بر شرایط هواشناسی تأثیرگذار بر هوانوردی متمرکز شده‌اند. در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 برگرفته از مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی (ECMWF)، تغییرات مکانی و زمانی دو مخاطره مهم هوانوردی یعنی توفان تندری (TSTM) و چینش باد ترازپایین (LLWS) در ایران طی سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳ بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مخاطره ناشی از توفان تندری بیشتر در نیمه شمالی، غرب، جنوب غرب و بخش‌هایی از جنوب کشور رخ می‌دهد، درحالی‌که LLWS مخاطره غالب در شرق، مرکز، شمال غرب خوزستان و خلیج فارس است. توزیع فصلی این دو پدیده متفاوت است؛ فعالیت TSTM در تابستان محدود به شمال است و در زمستان به جنوب کشور منتقل می‌شود و به نقش سامانه‌های جوی و منابع رطوبتی وابسته است. بیشترین گستره مکانی مخاطره ناشی از توفان تندری مربوط به فصل بهار و بیشترین ساعات وقوع آن مربوط به تابستان است. LLWS در تابستان و پاییز کمترین وسعت مکانی را دارد، اما در بخش‌هایی از شرق ایران و خلیج فارس و غرب خوزستان شدت می‌گیرد؛ در فصل تابستان، بیشینه وقوع این پدیده در شرق ایران عمدتاً تحت تأثیر فعالیت بادهای ۱۲۰ روزه سیستم است، در حالی‌که در غرب استان خوزستان و بخش قابل توجهی از خلیج فارس، این بیشینه ناشی از اثرات دینامیکی باد شمال تابستانی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: توفان تندری، چینش باد ترازپایین، ERA5، منطقه ایران.

۱. مقدمه

ایمنی و کارایی صنعت حمل‌ونقل هوایی به شدت تحت تأثیر شرایط جوی و پدیده‌های هواشناختی قرار دارد. شرایط جوی از اصلی‌ترین عوامل تأخیر و لغو پروازها و در بدترین شرایط، رخداد سوانح هوایی می‌باشد (تافرنر و همکاران، ۲۰۱۰؛ گرز و همکاران، ۲۰۱۲؛ گالتپ و همکاران، ۲۰۱۹؛ بورسکی و آنتربرگر، ۲۰۱۹). عوامل هواشناختی مخاطره‌آمیز در هوانوردی را می‌توان به عوامل مخاطره در مسیر و عوامل مخاطره در فرودگاه تقسیم کرد (ژو و همکاران، ۲۰۱۶). عوامل مخاطره در مسیر به عوامل جوی اطلاق می‌شود که اثرات زیان‌باری بر هواپیما در طول پرواز دارد، در حالی‌که عوامل مخاطره در فرودگاه، عواملی هستند که تأثیر قابل توجهی در روند نشست و

برخاست هواپیما دارند. اطلاعات ارائه‌شده توسط ایستگاه‌های هواشناسی می‌تواند پشتیبانی به موقع و کارآمدی برای تصمیم‌گیری عملیاتی لازم به منظور مدیریت و کاهش خطرات پرواز ناشی از عوامل هواشناختی فرودگاهی را فراهم کند. بنابراین تحلیل انواع شرایط مخرب جوی در فرودگاه‌ها ضروری است (لی و همکاران، ۲۰۲۲).

بر اساس نتایج مطالعات اخیر، با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش تدریجی دما، تغییرات جدی در شدت و تعداد مخاطرات جوی مشاهده شده است (تاشارک و همکاران، ۲۰۲۰). از پدیده‌های جوی مؤثر در مخاطرات هوانوردی در مرحله نشست و برخاست هواپیما می‌توان به دو مورد

استناد: محسن بیگی، عظیمه، قرایلو، مریم و سمانه (۱۴۰۵). تغییرات مکانی و زمانی مخاطرات هوانوردی ناشی از توفان تندری و چینش باد ترازپایین در منطقه ایران.

مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۲(۲)، ۴۱۹-۴۳۴. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.412939.1007770>

رایانامه: (۱) azimeh.beigi@ut.ac.ir | ssabet@ut.ac.ir



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.412939.1007770>

زیر اشاره کرد: ۱-توفان‌های تندری که تلاطم شدید، آذرخش، بارش سنگین و تگرگ را به دنبال دارند. ۲-وزش بادهای شدید که با چینش باد همراه هستند (تافرنو همکاران، ۲۰۱۰؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۶؛ احمدلو و همکاران، ۲۰۲۲). مخاطرات جوی مذکور بسته به رده‌بندی ناوگان پروازی اثرات متفاوتی دارند؛ هواپیماهای سبک به دلیل جرم کمتر و سرعت کم در فاز پرواز، بیشترین حساسیت را نسبت به چینش باد ترازپایین دارند، در حالی که هواپیماهای سنگین مسافربری عمدتاً در فاز حساس تقرب نهایی در معرض خطرات ناشی از اُفت ناگهانی رانش قرار می‌گیرند (اداره هوانوردی فدرال، ۲۰۰۹).

توفان تندری بارزترین شکل ناپایداری جو است و رخداد آن عمدتاً در ابرهای کومه‌ای باران بوده و برای هوانوردی مخاطره‌آمیز است. از سوی دیگر، چینش باد حاصل از تغییرات ناگهانی سمت و یا سرعت باد در یک مسافت کوتاه در جهت افقی یا قائم نیز در رویدادها و سوانح هوایی نقش اساسی دارند. همچنین، خردانفجار (microburst) شکل گرفته در زیر ابرهای تندری و چینش باد همراه آن، تاکنون موجب سقوط چندین فروند از ناوگان خطوط هواپیمایی در جهان شده است (مک‌کارتی و همکاران، ۲۰۲۲). برای نمونه، در اوت ۱۹۸۵ هواپیمایی که در حال رسیدن به باند برای فرود و نشستن در یکی از فرودگاه‌های شمال دالاس در آمریکا بود، در زیر یک ابر تندری کوچک اما شدید، با چینش باد بسیار شدید روبرو شد و سقوط کرد و در آن سانحه ۱۰۰ مسافر جان خود را از دست دادند (آرنز، ۲۰۰۹). امروزه شرکت‌های هواپیمایی و محققین، منابع مالی، زمان و نیروی انسانی زیادی صرف می‌کنند تا از وقوع این رویدادهای ناخواسته جلوگیری کرده و یا تعداد رخداد آنها را کاهش دهند. با توجه به آنچه بیان شد، بررسی زمانی-مکانی عوامل هواشناختی تأثیرگذار در مخاطرات هوانوردی می‌تواند کمک زیادی به شناسایی قوانین وقوع و تعیین ظرفیت مناطق مختلف کند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که مخاطرات جوی می‌توانند

نقش مهمی در اختلال عملکرد فرودگاه‌ها داشته باشند. آلن و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که ۴۱ درصد از تأخیر پروازهای ورودی در فرودگاه بین‌المللی نیوآرک آمریکا در روزهای همراه با توفان تندری رخ داده است. یانگ (۲۰۰۷) نیز در بررسی رخداد توفان تندری مؤثر بر فرودگاه بریستول انگلستان نشان داد که همگرایی محلی، رطوبت کافی و گرمایش سطحی در شکل‌گیری این رخداد نقش داشته‌اند. در مقیاس اقلیمی، تاشارک و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی ۱۲ فرودگاه اصلی اروپا نشان دادند که فراوانی و توزیع زمانی-مکانی مخاطراتی مانند توفان تندری و چینش باد ترازپایین به شدت تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های همدیدی هر فرودگاه قرار دارد. همچنین، لی و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی فرودگاه‌های چین نشان دادند که چینش باد ترازپایین عمدتاً در زمستان و توفان‌های تندری بیشتر در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی چین در تابستان رخ می‌دهند.

در ایران نیز مطالعاتی درباره خردانفجار پایین‌سو، فروپیکش (downburst)، جبهه‌های جستانک و چینش باد ترازپایین انجام شده است (تاج‌بخش و مرادی، ۱۳۸۱؛ علی‌اکبری بیدختی و همکاران، ۱۳۸۳؛ فیض‌آبادی و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۸۷؛ مرادی و همکاران، ۱۳۹۳). با این حال، این پژوهش‌ها عمدتاً موردی، محلی یا کوتاه‌مدت بوده‌اند و تاکنون تحلیل بلندمدت از توزیع مکانی-زمانی دو مخاطره اصلی توفان تندری و چینش باد ترازپایین در فرودگاه‌های ایران ارائه نشده است. این خلأ، ضرورت انجام مطالعه‌ای منطقه‌ای و بلندمدت برای شناسایی مناطق و فرودگاه‌های آسیب‌پذیر را نشان می‌دهد.

این پژوهش با توجه به نقش مهم شرایط جوی در ایمنی پروازها، بر دو مخاطره اصلی هوانوردی یعنی توفان‌های تندری (TSTM) (Thunderstorm) و چینش باد ترازپایین LLWS (Low-Level Wind Shear) تمرکز دارد که هر دو می‌توانند موجب تأخیر، لغو پرواز یا حتی سوانح شوند. این پدیده‌ها به‌ویژه در مراحل نشست و برخاست اهمیت دارند و نمونه‌های تاریخی، مانند سقوط هواپیمایی در

محدوده بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴ درجه غربی تا ۶۴ درجه شرقی واقع شده است. منطقه مورد مطالعه و موقعیت جغرافیایی فرودگاه‌های منتخب ایران در شکل ۱ ارائه شده است.

۲-۲. داده‌ها

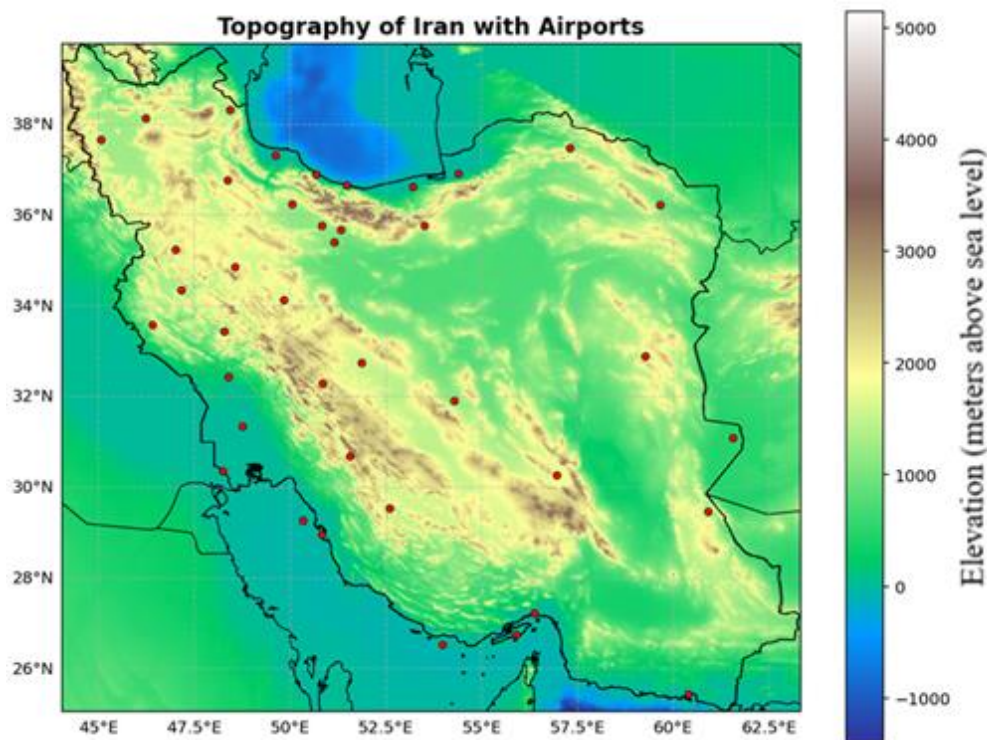
در پژوهش حاضر برای بررسی نقش مخاطره ناشی از توفان تندری و چینش باد ترازپایین، از داده‌های بازتحلیل شبکه‌ای ERA5 متعلق به ECMWF استفاده شده است. بدین منظور یک دوره آماری با پوشش چهل و پنج ساله از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳ در نظر گرفته شده است. این بانک داده دارای تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی، ۱۳۷ سطح فشاری و تفکیک زمانی یک ساعته می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، منطقه مورد مطالعه شامل ۶۰ نقطه شبکه‌ای نصف‌النهاری از ۲۵ درجه شمالی تا ۴۰ درجه شمالی و ۷۶ نقطه شبکه‌ای عرض جغرافیایی از ۴۴ درجه غربی تا ۶۴ درجه شرقی است که در مجموع ۴۵۶۰ نقطه شبکه‌ای را تشکیل می‌دهد.

دالاس آمریکا در سال ۱۹۸۵، اهمیت آنها را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش دما، شدت و فراوانی این مخاطرات در حال تغییر است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 مرکز ECMWF طی دوره ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳، الگوی مکانی و زمانی این مخاطرات در ایران بررسی و فرودگاه‌های مستعد وقوع آنها شناسایی می‌شوند. نوآوری این مطالعه در آن است که برای نخستین بار در سطح کشور، مخاطرات ناشی از TSTM و LLWS با بهره‌گیری از شاخص‌های هواشناسی مانند CAPE و بارش همرفتی در چارچوب بلندمدت تحلیل شده و مناطق آسیب‌پذیر تعیین می‌شوند. هدف اصلی پژوهش پاسخ به این پرسش‌هاست: الگوی مکانی-زمانی این پدیده‌ها در ایران چیست و کدام مناطق و فرودگاه‌ها آسیب‌پذیرترند.

۲. داده‌ها و روش کار

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه کل کشور ایران را دربرمی‌گیرد و در



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه. نقاط مشخص شده نشان‌دهنده موقعیت فرودگاه‌های انتخاب شده در این مطالعه هستند. ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر (مقیاس رنگی سایه‌دار) مشخص شده است.

شاخص یک سنج راجع برای ناپایداری همرفتی است و بیشینه مقدار سرعت بالارو را تعیین می‌کند. میزان شاخص CAPE در لایه آمیخته که منجر به ایجاد شرایط بالقوه جهت رخداد مخاطره توفان تندری می‌شود، بر اساس مطالعه کراون و همکاران (۲۰۰۴) و تاشارک و همکاران (۲۰۱۷) تخمین زده می‌شود. همچنین میزان شاخص بارش همرفتی بر اساس پژوهش ترب و همکاران (۲۰۰۹) و تاشارک و همکاران (۲۰۱۹) در نظر گرفته می‌شود. مقادیر آستانه برای این پژوهش در جدول ۱ مشخص شده است.

تعیین آستانه برای چینش باد ترازپایین چالش برانگیز است. طبق گزارش سازمان هوانوردی غیرنظامی بین‌المللی (۲۰۰۵) هر مقداری بیش از ۵ نات به ازای هر ۱۰۰ پا، مهم تلقی شده و قابلیت تأثیرگذاری بر کارایی هواپیما را دارد. از آنجاکه داده‌های بازتحلیل، چینش قائم باد را فروتخمین می‌کنند (آلن و همکاران، ۲۰۱۱)، مقدار ۳ نات به ازای هر ۱۰۰ پا معادل ۰/۰۵۱ متر بر ثانیه به ازای هر متر در این پژوهش اعمال شده است. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت توان تفکیک داده بازتحلیل و پارامترسازی بسیاری از فرایندها، چینش باد حاصل در این پژوهش عمدتاً نتیجه یک گرادیان فشار در مقیاس همدیدی است و به پدیده‌های محلی مانند میکروبرست مرتبط نمی‌باشد. اگر چه آستانه‌های تعریف شده، پایه فیزیکی دارند، اما باید در نظر داشت که آنها صرفاً شاخص‌هایی برای وضعیتی بالقوه جهت رخداد مخاطره می‌باشند. چنین تحلیل‌هایی مشمول تفسیر احتمالی بوده و ممکن است با عدم قطعیت همراه باشد (آلن و کارولی، ۲۰۱۴). بنابراین، نتیجه به دست آمده باید با احتیاط تفسیر شود.

هرچند داده‌های ایستگاهی فرودگاهی دارای دقت نقطه‌ای بالایی هستند، اما به دلیل توزیع جغرافیایی ناپیوسته، امکان تحلیل شبکه‌ای و پیوسته را فراهم نمی‌کنند. لذا در این پژوهش از داده‌های بازتحلیل ERA5 استفاده شد که به دلیل تلفیق مشاهدات راداری، ماهواره‌ای و ایستگاهی، توانایی بالایی در شبیه‌سازی متغیرهای همرفتی و بارش در مقیاس شبکه‌ای دارد (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰). در این راستا، نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که داده‌های ERA5 در برآورد پارامترهای همرفتی، به ویژه چینش قائم باد و شاخص صعود (Lifted index)، از دقت و کارایی بالایی برخوردار هستند (پگاه‌فر، ۱۴۰۴).

به منظور محاسبه شاخص ترمودینامیکی مورد استفاده، متغیرهای دما، فشار و رطوبت نسبی از این پایگاه داده در ترازهای فشاری ۱۰۰۰ تا ۱ هکتوپاسکال استخراج شده است. برای انرژی پتانسیل دسترس پذیر همرفتی (CAPE) لایه آمیخته یک لایه میانگین از ۰ تا ۵۰۰ متری بالای سطح زمین به عنوان نقطه شروع برای بسته هوای صعودی استفاده شده است. چینش باد ترازپایین، مقدار بردار باد بین ۱۰ و ۱۰۰ متری از بالای سطح زمین می‌باشد. همچنین بارش همرفتی نیز از منبع داده‌های اقلیمی ERA5 استخراج شده است. از تقریب نزدیک ترین نقطه شبکه‌ای برای استخراج اطلاعات در مکان هر فرودگاه استفاده شده است.

۲-۳. تعیین آستانه

به منظور تعیین تعداد رخداد شرایط مخاطره آمیز ناشی از توفان تندری و چینش باد ترازپایین، استخراج آستانه به عنوان شاخص برای مخاطره آمیز بودن هر پدیده ضروری است. اغلب برای شناسایی محیط‌های مستعد توفان تندری شاخص CAPE به کار می‌رود (آلن و کارولی، ۲۰۱۴). این

جدول ۱. مقادیر آستانه برای شاخص‌های تعیین کننده مخاطره.

نوع مخاطره	مقادیر آستانه
توفان تندری	انرژی پتانسیل دسترس پذیر همرفتی لایه آمیخته (ML-CAPE) بیش از ۱۵۰ ژول بر کیلوگرم بارش همرفتی بیش از ۰/۲۵ میلی متر بر ساعت
چینش باد ترازپایین	در ارتفاع ۰ تا ۱۰۰ متر بالاتر از سطح زمین، گرادیان چینش قائم باد بیش از ۳ نات به ازای هر ۱۰۰ پا معادل ۰/۰۵۱ متر بر ثانیه به ازای هر متر

۲-۴. روش کار

در این پژوهش، جهت محاسبه شاخص‌های ترمودینامیکی از کتابخانه تخصصی MetPy استفاده شده است. برای محاسبه انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی لایه آمیخته (ML-CAPE)، ابتدا نیم‌رخ‌های فشاری دما و رطوبت از داده‌های ERA5 استخراج شدند. با توجه به این که داده‌های مذکور بر حسب سطوح فشاری هستند، با بهره‌گیری از ارتفاع ژئوپتانسیلی، ضخامت لایه سطحی تا ارتفاع ۵۰۰ متر از سطح زمین (AGL) به بازه فشاری متناظر تبدیل شد. سپس با استفاده از تابع mixed_layer_cape در MetPy، ویژگی‌های ترمودینامیکی بسته هوا در این لایه میانگین‌گیری (Mean Layer) شد. در نهایت، با محاسبه تراز همرفت آزاد (LFC) و تراز تعادل (EL)، انتگرال‌گیری از اختلاف دمای مجازی بسته هوا و محیط در این محدوده انجام و مقدار ML-CAPE استخراج شد.

دلیل استفاده از ML-CAPE در این مطالعه آن است که این شاخص بر اساس میانگین‌گیری ویژگی‌های ترمودینامیکی لایه آمیخته نزدیک سطح زمین محاسبه می‌شود و در مقایسه با سایر انواع CAPE وابستگی کمتری به شرایط لحظه‌ای و نوسانات بسیار موضعی دما و رطوبت سطحی دارد. از این رو، نمایه‌ای پایدارتر و واقع‌بینانه‌تر از پتانسیل همرفتی محیط ارائه می‌کند (کراون و همکاران، ۲۰۰۴). در همین راستا، پگاه‌فر (۱۴۰۳) با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 در محاسبه انواع CAPE نشان دادند که پارامتر ML-CAPE در برآورد ناپایداری جوی عملکرد دقیق‌تری نسبت به سایر انواع CAPE داشته و خطای کمتری تولید می‌کند. همچنین، بسته هوای کاملاً آمیخته نماینده کامل‌تری از جو حاکم بر ایستگاه‌های ایران بوده است. با استفاده از ML-CAPE و همچنین بارش همرفتی استخراج‌شده از داده‌های اقلیمی ERA5 (برای هر ۲۴ ساعت شبانه‌روز) تعداد ساعات دربرگیرنده مخاطره توفان تندی، یعنی ساعاتی که شاخص‌ها از حد آستانه فراتر رفته بودند، برای هر سال و فصل در ۴۵۶۰ نقطه شبکه‌ای و حدود ۳۸۸۰۰ گام زمانی شمارش و جمع‌آوری شدند. میانگین

ساعات همراه با مخاطره توفان در هر فصل در بازه ۴۵ ساله (۱۹۷۹-۲۰۲۳) با تقسیم مجموع ساعات بر تعداد سال‌ها در هر نقطه شبکه‌ای به‌عنوان میانگین فصلی تعداد ساعات همراه با این مخاطره بر سال محاسبه شد.

مخاطره ناشی از چینش باد در لایه پایین جو (LLWS) با استفاده از داده‌های ساعتی مربوط به مؤلفه‌های باد افقی u و v در دو ارتفاع ۱۰ و ۱۰۰ متری محاسبه شد. برای هر گام زمانی و در هر نقطه شبکه‌ای، چینش باد بین این دو تراز با رابطه (۱) به‌صورت زیر تعیین شد (ژائو و همکاران، ۲۰۰۶):

$$LLWS = \frac{1}{\delta z} \sqrt{(u_{100} - u_{10})^2 + (v_{100} - v_{10})^2} \quad (1)$$

که در آن δz اختلاف ارتفاع بین ترازها را نشان می‌دهد. پس از محاسبه LLWS، ساعتی که این شاخص از مقدار آستانه تعیین‌شده فراتر می‌رفت، به‌عنوان ساعات مخاطره به‌ازای تمام نقاط شبکه‌ای و گام‌های زمانی ذکرشده شمارش و جمع‌آوری شدند. سپس برای هر فصل و در طول ۴۵ سال (۱۹۷۹-۲۰۲۳)، میانگین تعداد ساعات همراه با مخاطره چینش باد ترازپایین بر سال، در هر نقطه از شبکه محاسبه شد. ساعات وقوع مخاطره توفان تندی با اعمال شرایط ذکر شده در جدول ۱ برای هر یک از ۴۵۶۰ نقطه شبکه و حدود ۳۸۸۰۰ گام زمانی شناسایی شد. تعداد ساعات مخاطره در هر سال با جمع ساعات برآوردکننده این شرایط محاسبه شدند.

۳. بحث و نتایج

۳-۱. تغییرپذیری مکانی

توزیع مکانی میانگین فصلی تعداد ساعات‌های همراه با مخاطره توفان تندی بر اساس داده‌های ساعتی ERA5 از سال ۱۹۷۹ تا سال ۲۰۲۳ در شکل ۲ نمایش داده شده است. شکل ۲-الف نشان می‌دهد که در فصل بهار، بیشترین فراوانی وقوع مخاطره توفان‌های تندی در نواحی شمال و شمال غرب منطقه ایران مشاهده می‌شود. قسمت‌هایی از نواحی جنوبی استان گلستان در این فصل بیشینه ساعت فعالیت توفان تندی را در حدود ۲۰۰ ساعت در سال تجربه می‌کنند. همچنین، در برخی از نواحی استان مازندران، رشت، اردبیل، تبریز، ارومیه، شمال یاسوج، شمال شرق

خوزستان و جنوب لرستان رخداد توفان تندرگی با فراوانی بین ۹۰ تا ۱۳۰ ساعت در سال مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۲-الف، سایر نواحی تحت پوشش این پدیده، سالانه بین ۱۵ تا ۷۵ ساعت مخاطره ناشی از توفان تندرگی را تجربه می‌کنند. شایان ذکر است که فصل بهار، بیشترین گستره مکانی وقوع توفان تندرگی را به خود اختصاص می‌دهد و در مقایسه با سایر فصول، از وسعت تأثیرگذاری بیشتری برخوردار است. فراوانی این رخدادها از ماه مارس تا مه در این مناطق افزایش می‌یابد و در ماه‌های بعد به تدریج کاهش می‌یابد. وجود بادهای غربی، رطوبت منتقل شده از دریای مدیترانه و خزر و ساختار توپوگرافی کوهستانی موجب تشدید فرایندهای همرفتی و در نتیجه افزایش احتمال وقوع توفان‌های تندرگی در شمال غرب و غرب منطقه ایران می‌شود. در مقابل، کاهش وقوع این پدیده‌ها در مناطق ساحلی جنوبی از جمله بندرعباس، تا حدی به این دلیل است که محور اصلی بادهای غربی و ناوهای همراه آن عمدتاً در عرض‌های بالاتر فعال‌اند؛ بنابراین، واگرایی ترازهای فوقانی و صعود دینامیکی بیشتر در نیمه شمالی کشور متمرکز می‌شود و در سواحل جنوبی شرایط لازم برای تقویت همرفت کمتر فراهم می‌شود (قویدل و همکاران، ۲۰۱۷).

توزیع رخداد توفان‌های تندرگی در فصل تابستان با سایر فصول تفاوت دارد (شکل ۲-ب). در این فصل، توزیع مکانی تحت تأثیر این پدیده به‌طور چشمگیری نسبت به فصل بهار و دیگر فصول کاهش می‌یابد. با این حال، هسته بیشینه فعالیت این پدیده در تابستان قوی‌تر از سایر فصول است؛ به گونه‌ای که در استان مازندران، حدود ۳۰۰ ساعت رخداد توفان تندرگی مخاطره‌آمیز در سال مشاهده می‌شود. این تعداد ساعت رخداد این پدیده در سال در هیچ‌یک از فصول دیگر، حتی بهار نیز مشاهده نمی‌شود. این الگو با نتایج مطالعات لی و همکاران (۲۰۲۲) در شرق آسیا و تاشارک و همکاران (۲۰۲۰) در اروپا همخوانی دارد؛ به گونه‌ای که در هر دو مطالعه، فصل تابستان به‌عنوان دوره اوج وقوع توفان تندرگی معرفی شده است. علت هم‌زمانی اوج در تابستان این است که مناطق مورد بررسی در آن

پژوهش‌ها نیز مشابه ایران، علاوه بر گرمایش شدید روزانه و افزایش تبخیر و تعرق، ریزش هوای سرد در ترازهای میانی جو است که با ایجاد ناپایداری شدید در یک محیط گرم و مرطوب، شرایط را برای صعود عمیق فراهم می‌کند. در ایران، این ناپایداری در سواحل دریای خزر با سازوکار همگرایی نسیم دریا و صعود مکانیکی در دامنه‌های البرز تقویت می‌شود. طبق مطالعه قویدل و همکاران (۲۰۱۷)، عبور سامانه‌های غربی از عرض‌های شمالی و جفت شدن رطوبت خزری با ناپایداری‌های دینامیکی، عامل اصلی توفان‌های شمال غرب است. در مقابل، در جنوب شرق کشور، نفوذ جریانات موسمی شبه‌قاره هند (مونسون) همراه با تضعیف و عقب‌نشینی پشته جنب‌حاره‌ای، شرایط را برای شکست وارونگی دمایی و صعود هوای مرطوب فراهم می‌کند.

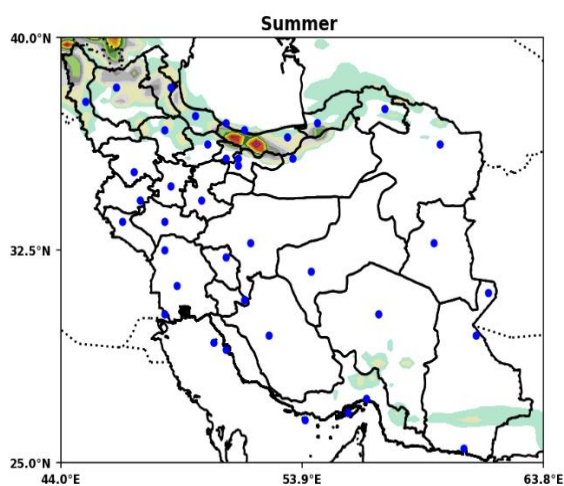
در فصل تابستان، به‌رغم حاکمیت کم‌فشار گرمایی در تراز سطحی فلات ایران، استقرار پشته پرفشار جنب‌حاره‌ای (آزورز) در ترازهای فوقانی با ایجاد فرونشست هوا مانع از صعود گسترده جوی می‌شود. به همین دلیل، پوشش مکانی توفان‌های تندرگی نسبت به بهار محدودتر شده و عمدتاً به عرض‌های جغرافیایی بالاتر و ارتفاعات منتقل می‌شود. در این میان، بخش وسیعی از نواحی مرکزی کشور به دلیل کمبود شدید رطوبت و حاکمیت وارونگی فرونشستی ناشی از پرفشار جنب‌حاره‌ای، فراوانی بسیار ناچیزی از رخداد توفان تندرگی را نشان می‌دهند (قویدل و همکاران، ۲۰۱۷). همان‌طور که شکل ۲-ج نشان می‌دهد، در فصل پاییز، جابه‌جایی هوای مرطوب و سرد از دریای مدیترانه، در مناطق کوهستانی غرب منطقه ایران منجر به رخداد توفان‌های تندرگی می‌شود. البته، به دلیل رطوبت کمتر پاییز نسبت به بهار، شدت وقوع توفان تندرگی در پاییز به مراتب کمتر از بهار است. دلیل احتمالی افزایش توفان‌های تندرگی مخاطره‌آمیز در بوشهر (با بیش از ۳۰ ساعت در سال) کم‌فشار سودانی، گسترش بادهای غربی و توده‌های هوای معتدل و مرطوب دریای مدیترانه و خلیج فارس است (قویدل و همکاران، ۲۰۱۷). دلیل فراوانی توفان تندرگی در شمال کشور در فصل پاییز نیز عبور هوای سرد سیبری از

عامل کاهش فعالیت‌های همرفتی دانست، نه عامل افزایش توفان‌های تندری (قویدل و همکاران، ۲۰۱۷).

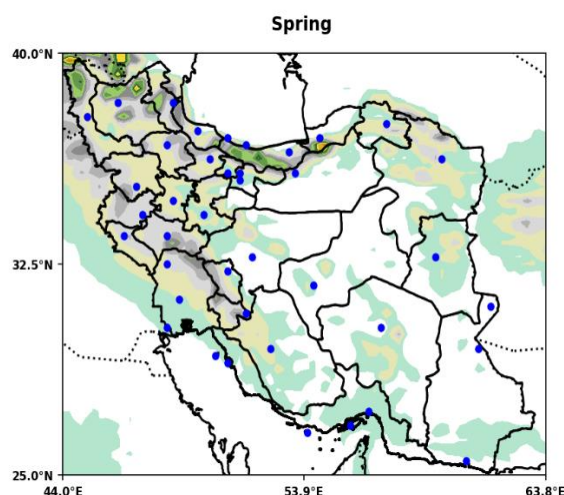
توزیع مکانی تعداد ساعت‌های همراه با مخاطره ناشی از توفان تندری در فصل زمستان در شکل ۲-د نشان داده شده است. در این فصل، حاکم بودن سامانه پرفشار سبیری در شمال و شمال شرق کشور به همراه هوای سرد و خشک، وقوع توفان تندری را کاهش داده است. فراوانی بالای توفان در نیمه غربی کشور به دلیل شرایط کوهساری و اقلیم کوهستانی منطقه و وجود رطوبت و عوامل منجر به صعود هوا در این فصل است. به طور کلی، در این فصل، در نیمه غربی کشور، سامانه‌های غربی با رطوبت بالا موجب ناپایداری و افزایش توفان‌های تندری می‌شوند. افزایش توفان‌های تندری در نواحی جنوبی ایران عمدتاً به فعالیت کم فشار سودانی و تقویت آن توسط ناوهای بادهای غربی مربوط است؛ به طوری که فرارفت رطوبت از خلیج فارس (و گاه دریای سرخ) شرایط لازم برای ناپایداری و صعود همرفتی را فراهم می‌کند (مفیدی و زرین، ۱۳۸۴). در فصل زمستان (شکل ۲-د)، بیشتر نواحی تحت تأثیر توفان تندری، حدود ۱۵ تا ۷۰ ساعت در سال توفان تندری را تجربه می‌کنند. بیشترین مقدار مشاهده شده نیز مربوط به شمال شرق استان خوزستان و در حدود ۹۰ ساعت در سال است.

روی دریای خزر گرم است. در مناطق مرکزی و شرقی، فراوانی توفان‌های تندری به دلیل پرفشار سبیری است که با هوای بسیار سرد و خشک و کاهش دما همراه می‌باشد (قویدل و همکاران، ۲۰۱۷). مطابق شکل ۲-ج، بیشترین تعداد ساعات همراه با این پدیده در فصل پاییز در حدود ۱۴۰ ساعت و در قسمت‌هایی از مازندران است.

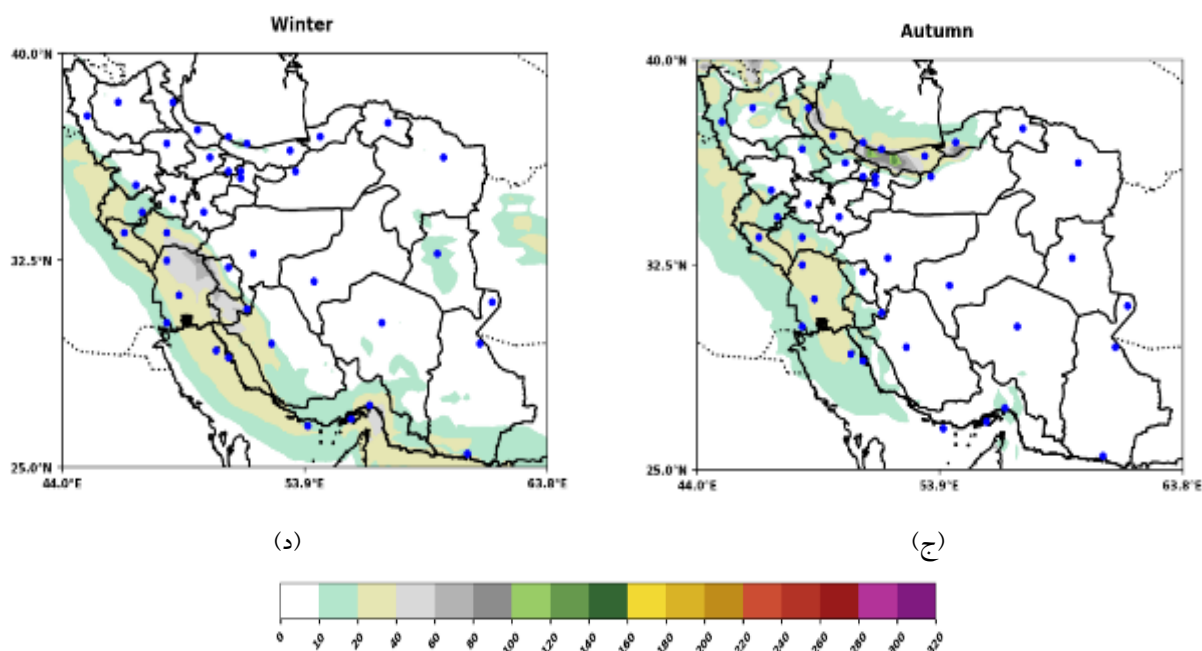
مطابق شکل ۲-ج، بیشترین فراوانی توفان‌های تندری در فصل پاییز در بخش‌هایی از استان مازندران و در حدود ۱۴۰ ساعت مشاهده می‌شود. این افزایش را می‌توان با عبور توده‌های هوای سرد شمالی بر روی سطح نسبتاً گرم دریای خزر و تأمین هم‌زمان رطوبت و ناپایداری توجیه کرد؛ فرایندی که در سواحل جنوبی خزر از مهم‌ترین سازوکارهای شکل‌گیری توفان‌های تندری اثر دریا در فصل سرد به شمار می‌رود (مجرد و همکاران، ۱۳۹۸). در سواحل جنوبی کشور، به ویژه در بوشهر، رخداد بیش از ۳۰ ساعت توفان تندری مخاطره‌آمیز در سال، بیشتر با تقویت کم فشار سودانی، گسترش ناوهای غربی و انتقال رطوبت از خلیج فارس و دریای سرخ ارتباط دارد (مفیدی و زرین، ۱۳۸۴). در مقابل، در نواحی مرکزی و شرقی ایران، استقرار پرفشار سبیری با نفوذ هوای سرد و خشک و تقویت پایداری جو همراه است؛ از این رو این سامانه را باید بیشتر



(ب)



(الف)



شکل ۲. توزیع مکانی میانگین فصلی تعداد ساعت‌های همراه با مخاطره ناشی از توفان‌اندازی بر اساس داده‌های ساعتی ERA5 از ۱۹۷۹-۲۰۲۳. دایره‌های آبی‌رنگ موقعیت فرودگاه‌های منتخب در این مطالعه را نشان می‌دهد.

که در فصل زمستان رایج است، می‌تواند با افزایش تلاطم، شرایط را برای تقویت چینش باد در تراز پایین فراهم کند. نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که چینش باد وسیعی در زمستان رخ داده است که ممکن است با چنین سازوکاری مرتبط باشد. ماهیت گسترده‌ی چینش باد ترازپایین در فصل زمستان مخاطره ثابتی برای فعالیت‌هایی مانند هوانوردی محسوب می‌شود.

انتقال از فصل زمستان به تابستان می‌تواند منجر به ایجاد شرایط جوی‌ای شود که چینش باد را به میزان قابل توجهی افزایش دهد، اما ممکن است به اندازه سامانه‌های زمستانی منطقه وسیعی را پوشش ندهد. تحلیل ساعت‌های همراه با چینش باد ترازپایین در فصل تابستان افزایش قابل توجهی در مقادیر چینش باد ترازپایین در حدود ۱۰۰۰ ساعت در سال به‌ویژه در محدوده‌ای از شرق ایران را نشان می‌دهد (شکل ۳-ب). افزایش ساعات همراه با چینش باد در حوضه سیستم را می‌توان تحت تأثیر بادهای موسمی صد و بیست روزه دانست؛ بادهایی که نقش کلیدی در شکل‌گیری توفان‌های خاک در این منطقه ایفا می‌کنند. این بادهای نیمه ماه تا نیمه ماه سپتامبر به اوج شدت خود می‌رسند، زمانی که یک سامانه پرفشار پایدار بر فراز کوه‌های هندوکش در

شکل ۳ توزیع مکانی میانگین فصلی تعداد ساعت‌های همراه با مخاطره چینش باد ترازپایین در طی سال‌های ۱۹۷۹-۲۰۲۳ را نشان می‌دهد. تحلیل این توزیع در فصل زمستان نشان‌دهنده پوشش وسیعی از مناطقی است که چینش باد ترازپایین را تجربه می‌کنند (شکل ۳-د). مناطق در معرض این مخاطره طی این فصل، سالانه حدود ۱۰ تا ۸۰ ساعت را تجربه می‌کنند ولی قسمت‌هایی از سیستان و بلوچستان، کرمان و شمال شرق اهواز مقادیر مخاطره ناشی از چینش باد بین ۸۰ تا ۱۶۰ ساعت در سال را تجربه می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۳-د مشاهده می‌شود، رشته کوه‌های البرز و زاگرس احتمالاً به مقادیر بالاتر چینش باد کمک می‌کنند. در فصل زمستان، پرفشار سیبری با نفوذ از سمت شمال و شمال شرق ایران موجب شکل‌گیری الگوهای جوی پایدار می‌شود (علیجانی و کاویانی، ۱۳۹۵). اگرچه علیجانی به‌طور مستقیم به نقش این پایداری‌ها در شکل‌گیری چینش باد اشاره نکرده است، اما با توجه به نتایج این پژوهش که چینش باد گسترده‌ای را در زمستان نشان می‌دهد، می‌توان احتمال داد که این شرایط پایدار جوی زمینه‌ساز وقوع چینش گسترده‌تر در این فصل باشند. مرادی و همکاران (۱۳۹۳) اشاره کرده‌اند که وارونگی دما

شمال افغانستان به همراه یک کم فشار گرمایی تابستانی بر روی اراضی بیابانی شرق ایران و غرب افغانستان، یک گرادیان فشار قوی ایجاد می کند (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴). این بادها از برهم کنش محیط اطراف با کوه های پلنگان در غرب و کوه های هندوکش و بابایی در شمال شرق منطقه شتاب می گیرند (وینتی، ۲۰۰۶). جت ترازپایین در امتداد مرز ایران و افغانستان در ماه ژوئیه در قوی ترین حالت خود با سرعت باد میانگین ماهانه ۲۰ متر بر ثانیه در شب هنگام در ارتفاع ۳۰۰-۵۰۰ متری قرار دارد (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴).

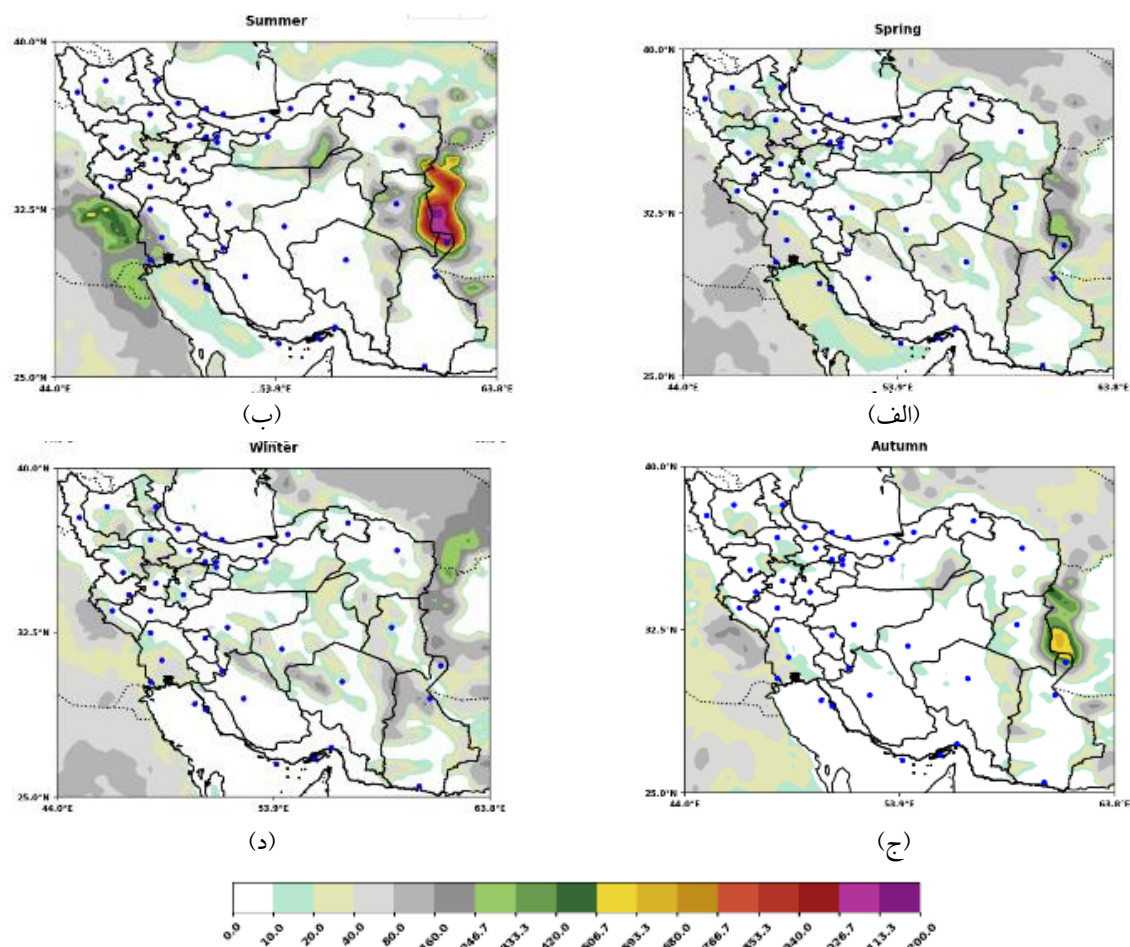
فصول بهار و پاییز دوره های انتقالی محسوب می شوند. ناحیه بسیار محدودی از جنوب شرق بیرجند و زابل در فصل پاییز به سبب بادهای ۱۲۰ روزه ساعات قابل توجهی (حدود ۴۰۰ ساعت در سال) از چیش باد ترازپایین را تجربه می کنند (شکل ۳-ج). در فصل بهار هم مشابه فصل پاییز، شرق ایران همچنان چیش باد ترازپایین قابل توجهی را دارد ولی فراوانی تعداد ساعات آن کاهش می یابد (شکل ۳-الف). آشکار است که در فصل پاییز، گستره مکانی تحت تأثیر چیش باد ترازپایین نسبت به فصل بهار کاهش یافته است (مقایسه شکل های ۳-الف و ۳-ج).

به طور کلی می توان چنین برداشت کرد که فصول زمستان و بهار بیشترین گستره مکانی وقوع مخاطره ناشی از چیش باد ترازپایین را به خود اختصاص داده اند. در مقابل، در فصول تابستان و پاییز، از وسعت مناطق تحت تأثیر این مخاطره کاسته می شود. در فصل تابستان، تنها تعداد محدودی از مناطق شرقی ایران هستند که ساعات بیشتری از این پدیده را تجربه می کنند. در این میان، پاییز فصلی است که کمترین گستره مکانی را برای وقوع چیش نشان می دهد؛ البته با یک استثنا و آن هم مربوط به مناطقی در شرق ایران است که در همین فصل، تعداد ساعات وقوع این پدیده را بیش از بهار و زمستان تجربه می کنند.

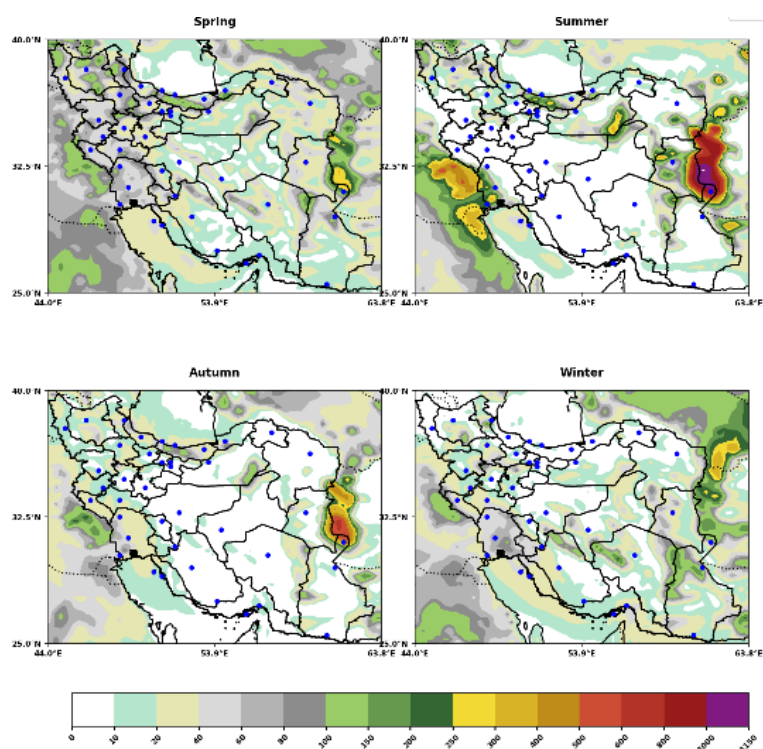
همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می شود، بخش های عمده ای از خلیج فارس و شرق خوزستان در فصول تابستان و بهار، ساعات قابل توجهی از مخاطره ناشی از چیش باد را تجربه می کنند. در همین راستا، یو و همکاران (۲۰۱۶) در

مطالعه ای درباره اقلیم باد شمال تابستانی در خاورمیانه تأکید کردند که نواحی حوزه دجله و فرات، کویت و خلیج فارس و شرق شبه جزایر عربی تحت تأثیر جریان های باد شمال با ویژگی های خاص تابستانه قرار دارند. از آنجا که آنها این مناطق را به عنوان نواحی تحت تأثیر فعالیت دینامیکی باد شمال معرفی کرده اند، می توان نتایج پژوهش حاضر را با در تطابق با یافته های آنان دانست. به عبارتی، این نواحی به دلیل قرار گرفتن در مسیر فعالیت دینامیکی باد شمال، ظرفیت ایجاد شرایط چیش باد را دارا هست. شایان ذکر است که این پدیده در پهنه های آبی کشور ما تقریباً مشاهده نمی شود؛ به جز خلیج فارس که پیش تر علت وقوع آن را به فعالیت دینامیکی باد شمال نسبت دادیم. به طور کلی، پهنه های آبی کشور به خودی خود تحت تأثیر مخاطره ناشی از چیش باد نیستند. مطابق با مطالعه تاشراک و همکاران (۲۰۱۸)، این پدیده در اروپا نیز کمتر روی پهنه های آبی مشاهده شده و بیشتر روی خشکی رخ می دهد. آنها علت این موضوع را وجود اصطکاک در مناطق خشکی عنوان کرده اند؛ زیرا اصطکاک باعث کاهش سرعت باد در لایه سطحی و در نتیجه افزایش بزرگی چیش می شود.

شکل ۴ توزیع مکانی میانگین فصلی ساعت هایی را نشان می دهد که در آنها دست کم یکی از پدیده های مخاطره آمیز توفان تندری (TSTM) یا چیش باد ترازپایین (LLWS) به صورت جداگانه یا هم زمان به وقوع پیوسته اند. ساعاتی که حداقل یکی از این دو مخاطره برقرار باشد، به عنوان تعداد ساعت مخاطره آمیز محاسبه می شود. همچنین ساعتی که در آن هر دو مخاطره وجود داشته باشد یک بار محاسبه می شود. نتایج نشان می دهند که از دیدگاه دو پدیده مورد مطالعه، فصل بهار بیش از سایر فصول، تحت تأثیر مخاطرات جوی است. فصل های تابستان و پاییز از نظر پوشش مکانی انواع مخاطرات جوی، کمترین گستره را به خود اختصاص داده اند. در مورد فصل زمستان، می توان گفت که از نظر گستره مکانی مخاطرات جوی، در جایگاهی میانه قرار دارد. به عبارتی، پوشش مخاطرات در این فصل نه به گستردگی بهار و نه به محدودیت تابستان و پاییز است.



شکل ۳. مانند شکل ۲ ولی برای چیش باد تراز پایین.



شکل ۴. توزیع مکانی میانگین تعداد فصلی ساعت‌های مخاطره‌آمیز با هر دو نوع شرایط جوی خطرناک شامل توفان تندری و چیش باد تراز پایین بر اساس داده‌های ساعتی ERA5 از ۱۹۷۹-۲۰۲۳. دایره‌های آبی رنگ موقعیت فرودگاه‌های منتخب در این مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۳. تغییرات زمانی مخاطرات در فرودگاه‌های منتخب

به‌منظور بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های چرخه سالانه کمیت‌های مورد مطالعه، توزیع زمانی داده‌ها در فرودگاه‌های منتخب ایران در شکل ۵ مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه برخی نتایج این بخش، نتایج بخش قبلی را تأیید می‌کنند، این رویکرد به درک عمیق‌تری از چگونگی تغییر مخاطرات در طول سال‌ها و شناسایی مخاطره غالب در هر مکان و زمان خاص کمک می‌کند. محاسبه میانگین ۳۰ روزه، الگوهای بسیار متنوع حتی در مناطقی که در نزدیکی یکدیگر قرار دارند، را آشکار می‌سازد. اگرچه تحلیل‌ها برای تمامی ۴۰ فرودگاه معرفی‌شده در شکل ۱ انجام گرفته است، جهت رعایت اختصار و افزایش وضوح، تنها مقایسه میانگین ساعات سالانه رویدادهای TSTM و LLWS در ایستگاه‌های نماینده (جدول ۲) با الگوهای متمایز در شکل ۵ ارائه شده است. این تحلیل الگوهای فصلی، مدت زمان میانگین و تغییرات در مکان‌های مختلف را برجسته می‌کند. رویدادهای TSTM معمولاً میانگین ساعات سالانه بیشتری نسبت به LLWS در اکثر فرودگاه‌ها دارند اما در برخی دیگر برعکس است. به‌عنوان نمونه، خارک میانگین ۶۵ ساعت TSTM در مقابل ۸۷ ساعت برای LLWS را نشان می‌دهد، در حالی که آبادان میانگین ۴۲ ساعت TSTM در برابر ۲۹۳ ساعت برای LLWS دارد که نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه و متنوع در الگوها است. در اهواز، میانگین ۷۷ ساعت TSTM در مقابل ۱۳۰ ساعت برای LLWS است، که نشان‌دهنده غالب بودن LLWS است. بیرجند با میانگین ۳۰ ساعت TSTM در برابر ۶۴ ساعت LLWS، الگوی مشابهی را نشان می‌دهد. زاهدان با میانگین ۱۲ ساعت TSTM در مقابل ۱۹۰ ساعت LLWS، یک برتری چشمگیر LLWS را تجربه می‌کند. زابل با میانگین استثنایی ۱۵۶۶ ساعت LLWS در مقایسه با میانگین ۴ ساعت TSTM، یک ویژگی هواشناختی منحصربه‌فرد را نشان

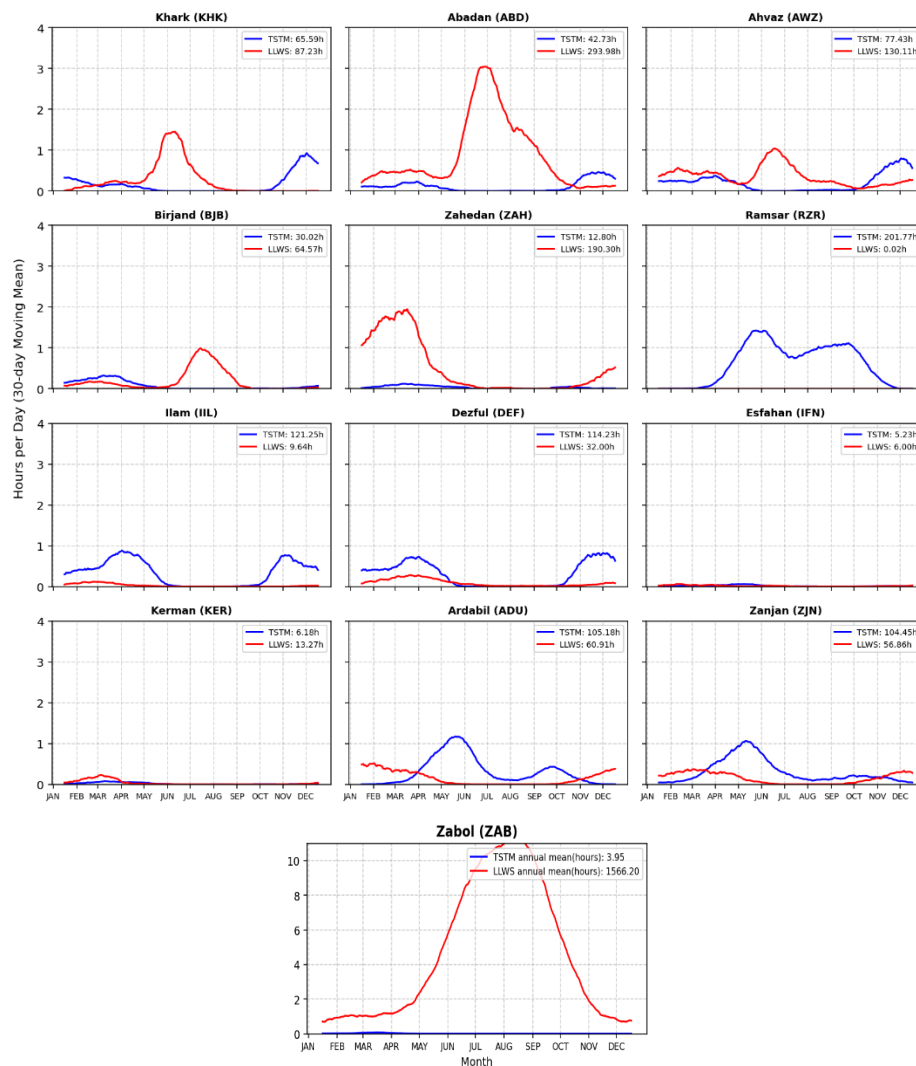
می‌دهد. LLWS از مقدار ناچیز (برای نمونه، رامسر با صفر ساعت) تا قابل توجه (برای نمونه، زابل با ۱۵۶۶ ساعت) متغیر است که نشان‌دهنده روندهای وابسته به مکان است. فرودگاه‌هایی مانند ایلام و دزفول به‌ترتیب با ۱۲۲ و ۱۱۴ ساعت فعالیت TSTM دارای بیشترین مقادیر مشاهده شده در میان فرودگاه‌های مورد بررسی هستند. فعالیت TSTM در این فرودگاه‌ها عمدتاً در سه فصل پاییز، بهار و زمستان مشاهده می‌شود. فرودگاه‌های اصفهان، زابل، کرمان و زاهدان به‌ترتیب با میانگین سالانه ۰، ۳، ۶ و ۱۲ ساعت، کمترین میزان فعالیت TSTM را در میان فرودگاه‌های کشور دارا هستند و از این لحاظ در پایین‌ترین سطح مخاطره قرار می‌گیرند.

فرودگاه اردبیل از ماه اکتبر تا ماه مه با مخاطره LLWS مواجه است که میانگین سالانه آن حدود ۶۰ ساعت برآورد می‌شود. همچنین از ماه مارس تا ماه نوامبر مخاطره TSTM با میانگین سالانه ۱۰۵ ساعت در این فرودگاه غالب است. می‌توان این‌گونه تبیین کرد که این فرودگاه در کل دوره سال تحت تأثیر هر دو مخاطره می‌باشد. ماه‌های ژوئیه، اوت و سپتامبر دوره‌ای هستند که هر دو نوع مخاطره در کمترین مقدار خود قرار دارند. فرودگاه زنجان نیز روندی مشابه اردبیل دارد به‌طوری‌که توزیع زمانی مخاطره‌ها تقریباً مشابه است. میانگین سالانه TSTM در زنجان ۱۰۴ ساعت و برای مخاطره LLWS، ۵۶ ساعت برآورد می‌شود. بیرجند فرودگاهی است که در آن مخاطره LLWS از اواسط ژوئن تا سپتامبر به اوج فعالیت خود با مقدار ۶۴ ساعت در سال می‌رسد. با وجود نزدیکی مکانی فرودگاه‌های زابل و زاهدان، الگوی زمانی مخاطره ناشی از LLWS در این دو فرودگاه تفاوت‌های چشمگیری دارد. در فرودگاه زاهدان، این مخاطره عمدتاً از اواسط ژوئن تا اواسط ماه مه فعالیت با میانگین سالانه ۱۹۰ ساعت بر سال غالب است. در مقابل در فرودگاه زابل این مخاطره از ماه مه تا دسامبر با روندی شدید و استثنایی افزایش یافته و به میانگین سالانه قابل توجه ۱۵۶۶ ساعت می‌رسد.

جدول ۲. مشخصات فرودگاه‌های نماینده که میانگین ساعات سالانه رویدادهای TSTM و LLWS آنها در شکل ۵ ارائه شده است.

ردیف	فرودگاه	شهر	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (بر حسب متر)
۱	فرودگاه خارک	خارک	۵۰/۱۹ °E	۲۹/۱۵ °N	۶
۲	فرودگاه بین‌المللی آیت‌الله جمی آبادان	آبادان	۴۸/۱۳ °E	۳۰/۲۲ °N	۳
۳	فرودگاه بین‌المللی شهید قاسم سلیمانی اهواز	اهواز	۴۸/۴۵ °E	۳۱/۲۰ °N	۲۰
۴	فرودگاه بین‌المللی شهید کاوه بیرجند	بیرجند	۵۹/۱۵ °E	۳۲/۵۳ °N	۱۴۹۱
۵	فرودگاه بین‌المللی شهدای زاهدان	زاهدان	۶۰/۵۴ °E	۲۹/۲۸ °N	۱۳۸۰
۶	فرودگاه شهدای رامسر	رامسر	۵۰/۴۰ °E	۳۶/۵۴ °N	-۲۱
۷	فرودگاه بین‌المللی شهدای ایلام	ایلام	۴۶/۲۴ °E	۳۳/۳۵ °N	۱۳۴۴
۸	فرودگاه بین‌المللی دزفول	دزفول	۴۸/۲۳ °E	۳۲/۲۶ °N	۱۴۳
۹	فرودگاه بین‌المللی شهید بهشتی اصفهان	اصفهان	۵۱/۵۱ °E	۳۲/۴۵ °N	۱۵۵۷
۱۰	فرودگاه بین‌المللی آیت‌الله هاشمی رفسنجانی کرمان	کرمان	۵۶/۵۷ °E	۳۰/۱۶ °N	۱۷۵۱
۱۱	فرودگاه بین‌المللی شهدای اردبیل	اردبیل	۴۸/۲۵ °E	۳۸/۱۹ °N	۱۳۱۵
۱۲	فرودگاه بین‌المللی شهدای زنجان	زنجان	۴۸/۲۱ °E	۳۶/۴۶ °N	۱۶۴۰
۱۳	فرودگاه شهدای زابل	زابل	۶۱/۳۲ °E	۳۱/۰۵ °N	۴۸۹

Annual Cycles of TSTM and LLWS (Selected Stations)



شکل ۵. چرخه سالانه ساعات همراه با TSTM (آبی)، LLWS (قرمز) در فرودگاه‌های نماینده ایران که مشخصات آنها در جدول ۲ آورده شده است. توزیع‌ها به صورت میانگین متحرک ۳۰ روزه، بر اساس داده‌های ساعتی ERA5 برای سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳ محاسبه شده‌اند. مجموع سالانه میانگین ساعات رخداد TSTM و LLWS نیز در گوشه سمت راست شکل مشخص است.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه نقش توفان تندری و چینش باد ترازپایین به عنوان دو پدیده مخاطره آمیز در مراحل نشست و برخاست هواپیماها بررسی شده است. برای انجام این بررسی از داده های ساعتی در یک دوره چهل و پنج ساله از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳ ERA5 استفاده شده است. برای محاسبه مؤلفه های مورد استفاده در این مطالعه دما، دمای نقطه شبنم، فشار و مؤلفه های مداری و نصف النهاری بردار باد در نظر گرفته شده است. نگاهی عمیق تر در قالب چرخه سالانه (یا همان تغییرپذیری زمانی) و تغییرپذیری چندساله برای فرودگاه های انتخاب شده در کلیه شهرهای ایران لحاظ شد. مقادیر آستانه تعیین شده، تقریبی از شرایط هواشناختی معین است. علی رغم این که چنین تحلیل هایی مشمول تفسیر احتمالی بوده و ممکن است با عدم قطعیت همراه باشد، این مطالعه دید کلی از این که چه زمانی و در چه مکانی، بیشترین احتمال رخداد مخاطرات مورد بررسی وجود دارد را فراهم می کند. این تحلیل، نتایجی را دربرداشت که مهم ترین آنها به شرح ذیل می باشد:

TSTM در فصل های بهار، تابستان و پاییز، همواره به عنوان یک مخاطره در شمال کشور شناخته می شود؛ در حالی که در فصل زمستان، این مخاطره به سمت مناطق جنوبی کشور منتقل می شود. غرب و جنوب غرب کشور نیز در فصل های زمستان، بهار و پاییز همواره در معرض این پدیده قرار دارند؛ اما در تابستان، فعالیت TSTM عمدتاً به نواحی شمالی کشور محدود می شود؛ پدیده ای که ناشی از برهم کنش گرمایش شدید سطح، ناپایداری ترمودینامیکی و انتقال رطوبت از دریای خزر توسط جریانات خزری و شار رطوبتی دریا است. در این میان، تبخیر و تعرق ناشی از پوشش گیاهی و منابع آبی محلی نیز می تواند در تقویت رطوبت لایه مرزی نقش مکمل داشته باشد. این نتیجه با یافته های قویدل و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد.

LLWS در تابستان، در نواحی محدودی از شرق ایران دارای مقادیر بیشینه ناشی از بادهای ۱۲۰ روزه می باشد. همچنین، غرب استان خوزستان و بخش قابل توجهی از

خلیج فارس نیز در این فصل با بیشینه وقوع این مخاطره از انجایی که تحت تأثیر فعالیت دینامیکی باد شمال تابستانی قرار دارند مواجه هستند. در مقابل، فصل های بهار و زمستان شرایطی نسبتاً مشابه از نظر توزیع مکانی تجربه می کنند. کمترین گستره مکانی این مخاطره در فصول پاییز و تابستان مشاهده شد. مطابق با یافته های تشارک و همکاران (۲۰۱۸)، فراوانی TSTM بر روی پهنه های آبی کمتر از خشکی است؛ با این حال، پهنه های آبی، به ویژه دریای خزر، می توانند با تأمین رطوبت و تقویت شار رطوبتی، شرایط وقوع این پدیده را در مناطق ساحلی و مجاور فراهم کنند. بنابراین، انتظار می رود بیشینه فعالیت TSTM در نواحی خشکی نزدیک به منابع آبی، و نه لزوماً بر روی خود پهنه آبی، مشاهده شود. فرودگاه های اردبیل و زنجان با میانگین سالانه ۶۰ ساعت TSTM و ۱۰۵ ساعت LLWS در کل سال به جز ماه های ژوئیه، اگوست و سپتامبر تحت سلطه هر دو نوع مخاطره قرار می گیرند.

به طور کلی می توان گفت بیشتر فرودگاه های ایران تنها مخاطره ناشی از TSTM را تجربه می کنند. فرودگاه های زابل و زاهدان تنها فرودگاه هایی هستند که در همه فصول سال به ویژه در تابستان تحت تأثیر مخاطره ناشی از LLWS هستند و به ترتیب مقادیر بیشینه ۱۵۶۶ و ۱۹۰ ساعت در سال را تجربه می کنند و این پدیده خطر جدی برای این فرودگاه ها محسوب می شود. در مقابل فرودگاه های بیرجند، دزفول، اهواز، آبادان و خارک و بوشهر هر دو مخاطره را با ساعات زیاد تجربه می کنند. میانگین سالانه LLWS در آبادان به ۲۹۳ ساعت در سال می رسد که اوج ساعات آن از اواسط ماه مه تا اواسط اکتبر تخمین زده می شود. فرودگاه های اصفهان و اراک به دلیل قرارگیری مقادیر TSTM و LLWS پایین تر از آستانه های بحرانی، در زمره ایستگاه های کم مخاطره قرار دارند.

مراجع

پگاهفر، ن. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد داده های ERA5 در برآورد انواع مختلف CAPE و CIN در ایستگاه های جو بالا در ایران. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۱)،

- ۲۴۹-۲۳۱. فیض آبادی، ن. و علی اکبری بیدختی، ع. (۱۳۸۷). بررسی میدانی و همانندسازی فیزیکی چند جریان داون برست (خردانفجار پایین سو) در منطقه تهران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۴(۴)، ۱۳۳-۱۵۴.
- مجرد، ف.؛ معصوم پور، ج.؛ کوشکی، س.؛ و میری، م. (۱۳۹۸). تحلیل زمانی-مکانی توفان های تندری در ایران. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۳۲(۹)، ۲۱۳-۲۳۲. تحقیقات جغرافیایی، ۲۰(۲)، ۱۱۳-۱۳۶.
- مرادی، م.؛ رضازاده، پ. و وظیفه، ا. (۱۳۹۳). بررسی موردی چینش قائم باد سطوح پایین در فرودگاه مهرآباد. *مجله پژوهش های اقلیم شناسی*، ۱۷، ۳۳-۴۶. مفیدی، ع. و زرین، آ. (۱۳۸۴). بررسی سینوپتیکی تاثیر سامانه های کم فشار سودانی در وقوع بارش های سیل زا در ایران. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۶(۱۱)، ۱۴۳-۱۶۸.
- Ahmadloo, M., Gharaylou, M., Farahani, M. M., & Pegahfar, N. (2022). Simulation and analysis of mesoscale convective systems (MCSs) leading to a severe flood over Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 179(4), 1485-1507.
- Ahrens, C. D. (2009). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. Brooks/Cole, Cengage Learning, 599pp.
- Allan, S. S., Beesley, J. A., Evans, J. E., & Gaddy, S. G. (2001). Analysis of delay causality at Newark International Airport. In 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (pp. 1-11).
- Allen, J. T., & Karoly, D. J. (2014). A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979-2011: inter-annual variability and ENSO influence. *International Journal of Climatology*, 34(1), 81-97.
- Allen, J. T., Karoly, D. J., & Mills, G. A. (2011). A severe thunderstorm climatology for Australia and associated thunderstorm environments. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 61(3), 143.
- Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The "wind of 120 days" and dust storm activity over the Sistan Basin. *Atmospheric research*, 143, 328-341.
- Borsky, S., & Unterberger, C. (2019). Bad weather and flight delays: The impact of sudden and slow onset weather events. *Economics of transportation*, 18, 10-26.
- Craven, J. P., Brooks, H. E., & Hart, J. A. (2004). Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Natl. Wea. Dig.*, 28(1), 13-24
- Federal Aviation Administration. (2009). *Pilot's handbook of aeronautical knowledge*. Skyhorse Publishing Inc.
- Ghavidel, Y., Baghbanan, P., & Farajzadeh, M. (2017). The spatial analysis of thunderstorm hazard in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(5), 123.
- Gerz, T., Forster, C., & Tafferner, A. (2012). Mitigating the impact of adverse weather on aviation. In *Atmospheric Physics: Background-Methods-Trends* (pp. 645-659). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P. D., Zhou, B., Ellrod, G., Minnis, P., Trier, S., Griffin, S., Yum, S. S., Gharabaghi, B., & Feltz, W. (2019). A review of high impact weather for aviation meteorology. *Pure and applied geophysics*, 176, 1869-1921.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., & Simmons, A. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 146(730), 1999-2049.
- International Civil Aviation Organization. (2005). *Manual on Low-level Wind Shear*. ICAO.
- Lei, T., Jin, C., & Qi, C. (2022). Spatio-temporal characteristics of hazardous weather affecting Chinese airports based on the ERA5/ERA5-land reanalysis dataset. *Frontiers in Climate*, 4, 835362.
- McCarthy, J., Serafin, R., Wilson, J., Evans, J., Kessinger, C., & Mahoney III, W. P. (2022).

- Addressing the microburst threat to aviation: research-to-operations success story. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(12), E2845-E2861.
- Tafferner, A., Forster, C., Hagen, M., Hauf, T., Lunnon, B., Mirza, A., Gouillou, Y., & Zinner, T. (2010). Improved thunderstorm weather information for pilots through ground and satellite based observing systems. In: 14th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 90th AMS Annual Meeting, Atlanta.
- Taszarek, M., Kendzierski, S., & Pilgaj, N. (2020). Hazardous weather affecting European airports: Climatological estimates of situations with limited visibility, thunderstorm, low-level wind shear and snowfall from ERA5. *Weather and Climate Extremes*, 28, 100243.
- Taszarek, M., Allen, J., Púčik, T., Groenemeijer, P., Czernecki, B., Kolendowicz, L., Lagouvardos, K., Kotroni, V., & Schulz, W. (2019). A climatology of thunderstorms across Europe from a synthesis of multiple data sources. *Journal of Climate*, 32(6), 1813-1837.
- Taszarek, M., Brooks, H. E., Czernecki, B., Szuster, P., & Fortuniak, K. (2018). Climatological aspects of convective parameters over Europe: A comparison of ERA-Interim and sounding data. *Journal of Climate*, 31(11), 4281-4308.
- Taszarek, M., Brooks, H. E., & Czernecki, B. (2017). Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 145(4), 1511-1528.
- Trapp, R. J., Diffenbaugh, N. S., & Gluhovsky, A. (2009). Transient response of severe thunderstorm forcing to elevated greenhouse gas concentrations. *Geophysical Research Letters*, 36(1).
- Whitney, J. W. (2006). Geology, water, and wind in the lower Helmand Basin, southern Afghanistan (No. 2006-5182).
- Young, M. V. (2007). Severe thunderstorms over southern England on 10th May, 2006. *Weather*, 62, 116-120. doi: 10.1002/wea.107.
- Yu, Y., Notaro, M., Kalashnikova, O. V., & Garay, M. J. (2016). Climatology of summer Shamal wind in the Middle East. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(1), 289-305.
- Zhao, B., Duan, Y. H., Yu, H., & Du, B. (2006). A statistical analysis on the effect of vertical wind shear on tropical cyclone development. *Acta Meteorologica Sinica-English Edition*, 20(3), 383.
- Zhou, B. B., Jiang, L., and Du, J. (2016). Aviation Weather and Model-Based Operational Forecasts of Low Visibility and Fog (in Chinese). *Adv. Meteorol. Sci. Technol.* 6, 29-41.