

## Analysis of Weather-Related Aviation Accidents in Iran Using ASN Information and ERA5 Reanalysis Data

Rahnama, M.<sup>1</sup>  | Khansalari, S.<sup>2</sup>  

1. Associate Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

**Corresponding Author E-mail:** [Khansalari@yahoo.com](mailto:Khansalari@yahoo.com)

(Received: 11 Apr 2025, Revised: 13 Jul 2025, Accepted: 19 Jul 2025, Published online: 23 Sep 2025)

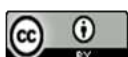
### Abstract

Adverse weather remains one of the most significant contributors to aviation accidents, especially during the critical phases of takeoff, approach, and landing. This study examines the meteorological factors involved in seven aviation events in Iran, including six accidents and one serious incident. Each event was directly associated with atmospheric hazards such as airframe icing, lightning, thunderstorms, low visibility, and crosswind or tailwind conditions. Accident data from the Aviation Safety Network (ASN) were combined with ERA5 reanalysis fields, METAR weather reports, satellite imagery, and lightning detection data to reconstruct the atmospheric environment surrounding each case. The accident attributed to airframe icing occurred under temperatures near 0°C and high ambient humidity. The absence of de-icing procedures prior to departure likely resulted in ice contamination on the wing surfaces, causing aerodynamic degradation and a subsequent loss of control during the takeoff roll. These findings are consistent with international studies demonstrating the elevated risk posed by near-freezing conditions when de-icing operations are not performed. Two events related to lightning—one accident and one serious incident—revealed highly unstable atmospheric conditions. The CAPE×P index indicated markedly elevated values, implying strong convective potential and abundant moisture. These conditions aligned with documented lightning strikes and contributed to failures or temporary disruptions in essential flight systems, including the weather radar, Ground Proximity Warning System (GPWS), and the transponder. The analysis highlights the operational vulnerability of aircraft systems when exposed to intense convective activity. A thunderstorm-related accident involving a Tupolev Tu-154 further demonstrated the hazards of flying through cumulonimbus (CB) clouds and hail. The aircraft encountered severe turbulence, experienced vertical acceleration up to 1.8g, and suffered structural damage that forced an emergency return. Satellite images and instability parameters confirmed the presence of deep, widespread convection during the event. Low visibility played a critical role in two other cases, both occurring during final approach or landing. Visibility below 1000 m, combined with low cloud ceilings and saturated near-surface moisture, significantly impaired pilot situational awareness. ERA5 and METAR data consistently indicated fog, snowfall, or persistent overcast conditions during these incidents. Finally, a crosswind-related accident involved tailwind components exceeding operational limits, as well as pronounced vertical wind shear between 10 and 100 m above ground. These conditions created unstable approach dynamics and contributed to a runway excursion. Overall, the study underscores the strong interaction between meteorological hazards and flight safety in Iran. The findings emphasize the need for enhanced aviation meteorology infrastructure, improved real-time hazard detection, targeted pilot training, and updated operational procedures to mitigate weather-related risks.

**Keywords:** Aviation Accidents in Iran, Icing, Lightning, Thunderstorms, Wind Shear, Visibility-low

**Cite this article:** Rahnama, M. and khansalari, S. (2025). Analysis of Weather-Related Aviation Accidents in Iran Using ASN Information and ERA5 Reanalysis Data. Journal of the Nivar, 49(130-131), 100-121. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.516294.1332>

**E-mail:** (1) [meh.rahnama@gmail.com](mailto:meh.rahnama@gmail.com)



## تحلیل سوانح هوایی مرتبط با پدیده‌های جوی در ایران با استفاده از اطلاعات شبکه ایمنی هوانوردی و داده‌های بازتحلیل ERA5

مهدی رهنما<sup>۱</sup> | سکینه خان سالاری<sup>۲</sup> ✉

۱. دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

۲. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [Khansalari@yahoo.com](mailto:Khansalari@yahoo.com)

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱)

### چکیده

آب و هوای نامساعد همچنان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در سوانح هوانوردی است، به ویژه در مراحل حیاتی برخاستن، فرود نهایی و نشست. این مطالعه عوامل هواشناختی دخیل در هفت رخداد هوانوردی در ایران، شامل شش سانحه و یک حادثه جدی، را بررسی می‌کند. هر رخداد مستقیماً با خطرات جوی مانند یخ‌زدگی بدنه هواپیما، صاعقه، رعد و برق، دید محدود، و شرایط بادهای متقاطع یا موافق (Tailwind) مرتبط بود. داده‌های سوانح از شبکه ایمنی هوانوردی (ASN) با داده‌های بازتحلیل ERA5، گزارش‌های هواشناسی METAR، تصاویر ماهواره‌ای، و داده‌های ردیابی صاعقه ترکیب شدند تا محیط جوی اطراف هر مورد بازسازی شود. سانحه‌ای که به یخ‌زدگی بدنه هواپیما نسبت داده شد، در ماه‌هایی نزدیک به ۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بالای محیط رخ داد. عدم اجرای رویه‌های یخ‌زدایی قبل از پرواز احتمالاً منجر به آلودگی سطوح بال با یخ شده، که موجب تخریب آیرودینامیکی و متعاقباً از دست رفتن کنترل در حین حرکت در باند برای برخاست شد. این یافته‌ها با مطالعات بین‌المللی که خطر بالای شرایط نزدیک به انجماد را در صورت عدم انجام عملیات یخ‌زدایی نشان می‌دهند، همخوانی دارد. دو رخداد مرتبط با صاعقه — یک سانحه و یک حادثه جدی — شرایط جوی بسیار ناپایداری را آشکار ساخت. شاخص  $CAPE \times P$  مقادیر به طور محسوسی بالایی را نشان داد که حاکی از پتانسیل همرفتی قوی و رطوبت فراوان بود. این شرایط با ثبت اصابت صاعقه مطابقت داشت و به خرابی یا اختلال موقت در سیستم‌های حیاتی پرواز، از جمله رادار هواشناسی، سیستم هشدار نزدیکی زمین (GPWS)، و فرستنده پاسخ‌دهنده (Transponder) کمک کرد. این تحلیل، آسیب‌پذیری عملیاتی سیستم‌های هواپیما را در هنگام قرار گرفتن در معرض فعالیت همرفتی شدید برجسته می‌کند. سانحه‌ای مرتبط با رعد و برق که شامل یک هواپیمای توپولف Tu-154 بود، خطرات پرواز در داخل ابرهای کومولونیموس (CB) و تگرگ را بیشتر نشان داد. هواپیما با تلاطم شدید، شتاب عمودی تا  $g1.8$  را تجربه کرد و دچار آسیب ساختاری شد که بازگشت اضطراری را تحمیل نمود. تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای ناپایداری، حضور همرفت عمیق و گسترده را در طول این رخداد تأیید کردند. دید محدود نقش حیاتی در دو مورد دیگر ایفا کرد که هر دو در طول فرود نهایی یا نشست رخ دادند. دید کمتر از ۱۰۰۰ متر، همراه با سقف ابری پایین و رطوبت اشباع شده در نزدیکی سطح، آگاهی خلبان از وضعیت محیط را به طور قابل توجهی مختل کرد. داده‌های ERA5 و METAR به طور مداوم مه، بارش برف، یا شرایط ابری پایدار را در طول این حوادث نشان دادند. در نهایت، سانحه مرتبط با باد متقاطع شامل مؤلفه‌های باد موافق (Tailwind) بود که از محدودیت‌های عملیاتی فراتر می‌رفت، و همچنین برش باد عمودی مشهودی بین ۱۰ تا ۱۰۰ متر بالای زمین وجود داشت. این شرایط، دینامیک ناپایداری در فرود ایجاد کرد و به خروج از باند کمک نمود. به طور کلی، این مطالعه تعامل قوی بین خطرات هواشناسی و ایمنی پرواز در ایران را تأکید می‌کند. یافته‌ها بر نیاز به زیرساخت‌های بهبود یافته هواشناسی هوانوردی، تشخیص بهتر خطرات در لحظه، آموزش هدفمند خلبانان، و به‌روزرسانی رویه‌های عملیاتی برای کاهش ریسک‌های مرتبط با آب و هوا دلالت دارند.

**کلیدواژه‌ها:** سوانح هوایی ایران، یخ‌زدگی، چینش قائم باد، آذرخش، توفان تندری، محدودیت دید

**استناد:** رهنما، مهدی و خان سالاری، سکینه. (۱۴۰۴). تحلیل سوانح هوایی مرتبط با پدیده‌های جوی در ایران با استفاده از اطلاعات ایمنی پرواز و داده‌های بازتحلیل ERA5

مجله نیوار، ۴۹ (۱۳۱-۱۳۰)، ۱۰۰-۱۲۱. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.516294.1332>

رایانامه: (۱) [meh.rahnama@gmail.com](mailto:meh.rahnama@gmail.com)





## ۱. مقدمه

در صنعت هوانوردی، مخاطرات جوی همواره به عنوان یکی از عوامل چالش برانگیز و تأثیرگذار بر ایمنی پرواز مطرح بوده است. با وجود پیشرفت‌های چشم‌گیر در فناوری‌های ناوبری و سامانه‌های ایمنی، همچنان پدیده‌های جوی می‌توانند نقشی کلیدی در بروز سوانح ایفا کنند. تحلیل داده‌ها و گزارش‌های رسمی از منابع معتبر، امکان درک بهتر و دقیق‌تری از تأثیر عوامل هواشناسی بر سوانح هوایی را فراهم می‌سازد و می‌تواند به پیشگیری از وقوع آن‌ها و ارتقاء ایمنی پروازها کمک کند (جاروشووا و جانوشکووا، ۲۰۲۳). اگرچه هواپیماها از ایمن‌ترین وسایل حمل‌ونقل به شمار می‌روند و نرخ تلفات آن‌ها نسبت به مسافت پیموده شده بسیار پایین است، اما در دهه گذشته (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴)، بیش از ۵۰ سانحه‌ی هوایی در سطح جهان رخ داده است که هزاران قربانی بر جای گذاشته‌اند. این سوانح، طیف وسیعی از هواپیماهای مسافربری، نظامی و کوچک را شامل می‌شوند و اغلب در مراحل بحرانی پرواز یعنی برخاستن، فرود و یا نزدیک به این دو مرحله رخ داده‌اند. طبق آمار، خطای انسانی عامل بیش از نیمی از این سوانح (۵۳٪) است و پس از آن، نقص فنی (۲۱٪) و شرایط نامساعد جوی (۱۱٪) در رتبه‌های بعدی قرار دارند (Getgoing.com). نمونه‌ای از این سوانح، سانحه‌ی اخیر در ۲۹ دسامبر ۲۰۲۴ است که در آن، هواپیمای بوئینگ ۷۳۷ خطوط هوایی ججو هنگام فرود در فرودگاه موآن کره جنوبی از باند خارج شد و پس از برخورد با دیوار کناری آتش گرفت. این سانحه که با ۱۸۱ سرنشین همراه بود، تنها دو نفر نجات‌یافته داشت. لازم به ذکر است که در حوزه‌ی ایمنی هوانوردی، بر اساس تعریف سازمان بین‌المللی هوانوردی غیرنظامی (ICAO)، سانحه هوایی (Accident) به رویدادی اطلاق می‌شود که منجر به مرگ یا جراحت جدی، آسیب یا نقص ساختاری در هواپیما، یا مفقودی آن گردد. در مقابل، حادثه هوایی (Incident) به رویدادی گفته می‌شود که اگرچه عملکرد ایمن پرواز را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما منجر به خسارات جدی یا تلفات نمی‌شود. همچنین، حادثه جدی (Serious Incident) به رویدادی

اطلاق می‌شود که گرچه منجر به سانحه نشده، اما شرایط آن به گونه‌ای است که در صورت اندکی تغییر می‌تواند منجر به سانحه گردد. تمایز بین این سه واژه در تحلیل‌های هوانوردی اهمیت زیادی دارد و در این مقاله نیز مورد توجه قرار گرفته است.

مطالعات متعددی به بررسی رابطه‌ی بین پدیده‌های جوی و سوانح هوایی پرداخته‌اند (مازون و همکاران، ۲۰۱۸؛ تاشارک و همکاران، ۲۰۲۰؛ لین و همکاران، ۲۰۲۱؛ شستاکووا، ۲۰۲۱). مطالعات اخیر نشان داده است که شرایط جوی نقش چشمگیری در سوانح هوانوردی ایفا می‌کند، به طوری که عواملی همچون رطوبت نسبی، دما، دید و پوشش ابر می‌تواند بیش از ۶۷٪ از سوانح هوانوردی شدید مرتبط با شرایط جوی را توضیح دهند (نیتا و همکاران، ۲۰۲۴). بر اساس پژوهش مازون و همکاران (۲۰۱۸)، سهم سوانح مرتبط با شرایط جوی از کل سوانح هوایی در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۶۷ تا ۲۰۱۰ از ۴۰٪ به ۵۰٪ افزایش یافته است. این یافته نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های فنی، شرایط جوی همچنان تهدیدی جدی برای ایمنی پرواز محسوب می‌شود. مازون و همکاران در تحلیل خود، از پایگاه داده‌ی موسوم به AWAD استفاده کرده‌اند که اطلاعات سوانح مرتبط با وضعیت‌های جوی را در چهار منطقه اقلیمی اصلی (استوایی، جنب‌گرمسیری، میانی و قطبی) بر پایه مدل سه سلولی جو (هادلی، فرل و قطبی) طبقه‌بندی می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که هر منطقه ویژگی‌های خاصی دارد که نوع و شدت سوانح در آن متفاوت است. برای مثال، در منطقه استوایی، بارش شدید، دید کم، توفان و تلاطم از عوامل اصلی سوانح هستند، در حالی که در عرض‌های میانی، فعالیت سامانه‌های کم‌فشار و بارش‌های شدید نقش عمده‌ای دارند. در مناطق قطبی نیز یخ‌زدگی و دید کم بیشترین سهم را در بروز سوانح ایفا می‌کنند. یکی از نکات کلیدی در این مطالعه، بررسی اثر هر پدیده‌ی جوی در مراحل مختلف پرواز است که این مراحل در شکل ۱ نشان داده شده است. برای مثال، تلاطم هوای

در ایران نیز مطالعاتی مانند اسدی و همکاران (۱۴۰۲)، که به بررسی سانحه‌ی پرواز تهران-یاسوج در بهمن ۱۳۹۶ با استفاده از مدل عددی WRF پرداختند، نشان داد که عوامل جوی همچون زاویه‌ی حمله، ضریب بار، یخ‌زدگی و کاهش سرعت و اماندگی نقش مؤثری در سقوط هواپیما داشته‌اند. همچنین مطالعه رنجبر سعادت‌آبادی و همکاران (۱۳۹۹)، با بررسی گزارش‌های خلبانان و تحلیل داده‌های همدیدی، نشان داد که بیشترین موارد یخ‌زدگی شدید در ماه‌های بهار و در شرایط وجود ابرهای CB و سامانه‌های کم‌فشار دینامیکی اتفاق افتاده‌اند. این مطالعات داخلی تأکید می‌کنند که بررسی دقیق شرایط جوی خاص هر منطقه، به‌ویژه در پروازهای عبوری از مناطق کوهستانی و پرخطر، نقشی کلیدی در ایمنی هوانوردی دارد.

صاف<sup>۱</sup> بیشترین سهم را در مراحل میانی و بالایی پرواز (صعود، کروز و نزول: مراحل ۴ و ۵ و ۶) دارد، در حالی که در مراحل پایین‌تری همچون برخاستن و فرود (مراحل ۳ و ۸)، کاهش دید و بارش سهم بیشتری دارند. آمار نشان می‌دهد که تلاطم عامل ۶۶٪ از سوانح در مرحله‌ی کروز و ۵۶٪ در نزول است، اما در مراحل برخاستن و فرود، سهم آن به کمتر از ۱۰٪ می‌رسد (مازون و همکاران، ۲۰۱۸). در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن‌اند که برنامه‌ریزی و طراحی اقدامات ایمنی باید بر اساس شرایط جوی ویژه‌ی هر منطقه و مرحله‌ی پرواز صورت گیرد. درک دقیق‌تر از پراکنش زمانی و مکانی پدیده‌های جوی و تأثیر آن‌ها بر مراحل مختلف پرواز، می‌تواند به کاهش ریسک سوانح و حوادث و افزایش ایمنی در صنعت هوانوردی کمک کند.



شکل ۱. مراحل مختلف پرواز (<https://jeremijr.blogspot.com/2019/01/fase-dasar-penerbangan-pesawat-terbang.html>)

مطالعه حاضر بر سوانح هوانوردی رخ داده در قلمرو هوایی جمهوری اسلامی ایران تمرکز دارد. ایران با مساحتی حدود ۱.۶۵ میلیون کیلومتر مربع و موقعیت جغرافیایی خاص بین عرض‌های ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی (شکل ۲)، دارای شرایط متنوع و پیچیده جوی است. تنوع اقلیمی ایران از مناطق خشک مرکزی تا سواحل مرطوب شمالی و جنوبی، از جمله عواملی است که می‌تواند بر ایمنی پرواز تأثیرگذار باشد. یکی از ویژگی‌های برجسته ایران، وجود رشته کوه‌های گسترده مانند زاگرس در غرب و البرز در شمال کشور است. این کوهستان‌ها علاوه بر ایجاد آشفته‌گی‌های محلی در الگوهای باد و تلاطم، می‌توانند

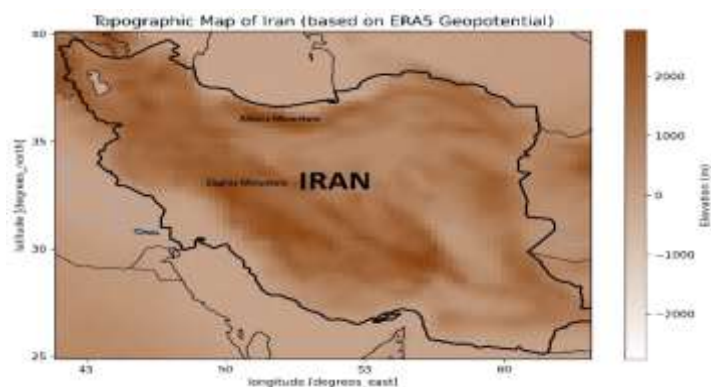
هدف این مقاله، تحلیل سوانح هوایی ایران با استفاده از اطلاعات موجود در پایگاه داده شبکه ایمنی هوانوردی ASN<sup>۲</sup> است تا نقش شرایط جوی در بروز این سوانح در منطقه جغرافیایی ایران بررسی شود. نتایج این تحلیل می‌تواند به درک بهتر از الگوهای سوانح هوایی مرتبط با شرایط جوی کمک کرده و راهکارهایی برای کاهش خطرات جوی در این منطقه ارائه دهد.

## ۲. داده‌ها و روش کار منطقه مورد مطالعه

<sup>21</sup> Aviation Safety Network

مهرآباد، مشهد، شیراز، کرمانشاه و ارومیه در نزدیکی کوهسارها یا درون دشتهای محصور در ارتفاعات قرار دارند؛ از این رو بررسی دقیق علت سوانح در افزایش ایمنی پروازها بسیار ضروری است.

موجب شکل‌گیری ابرهای همرفتی، مه کوهستانی، و افزایش احتمال مواجه شدن با توفان‌های محلی یا یخ‌زدگی در ارتفاعات شوند. چنین ویژگی‌هایی شرایط پرواز را به‌ویژه در مسیرهای عبوری از این مناطق کوهستانی با چالش‌هایی همراه می‌سازد. بسیاری از فرودگاه‌های مهم کشور مانند فرودگاه



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه (کشور ایران)

برف<sup>۵</sup>، توفان تندری<sup>۶</sup>، تلاطم<sup>۷</sup>، دید کم<sup>۸</sup>، باد عرضی و باد جستی<sup>۹</sup>، چینش باد و فروهنج<sup>۱۰</sup> تمرکز دارد. این عوامل اهمیت تحلیل شرایط جوی در ایمنی هوانوردی را نشان می‌دهند. در مطالعه حاضر، از اطلاعات مرتبط با این عوامل به منظور بررسی ارتباط آن‌ها با سوانح هوایی استفاده شده است. اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش شامل تاریخ و مکان وقوع سانحه، نوع هواپیما و مشخصات فنی آن، تعداد سرنشینان، کشته‌شدگان و مجروحان، شرایط جوی در زمان وقوع سانحه، مرحله پرواز (برخاستن، صعود، کروز، نزول، تقرب و فرود) و علت اصلی سانحه بر اساس گزارش‌های رسمی است.

#### ۲-۲-۲. داده‌های بازتحلیل ERA5

برای تحلیل شرایط جوی مرتبط با سانحه مورد بررسی علاوه بر گزارش متار در منطقه سانحه، از داده‌های بازتحلیل ERA5<sup>۱۱</sup> استفاده شده است. این داده‌ها جدیدترین نسل

#### ۲-۲-۲. داده‌ها

##### ۲-۲-۲-۱. پایگاه داده سوانح هوایی (ASN)

برای تحلیل سوانح هوایی و بررسی تأثیر عوامل هواشناسی، از اطلاعات شبکه ایمنی هوانوردی (ASN) استفاده شده است. این پایگاه جامع و معتبر، اطلاعات بیش از ۲۳۰۰۰ سانحه هواپیماهای مسافربری، نظامی و جت‌های شرکتی را از سال ۱۹۱۹ تاکنون ارائه می‌دهد و روزانه به‌روزرسانی می‌شود. اطلاعات ASN عمدتاً از منابع رسمی مانند هیئت‌های تحقیق سانحه هوایی و مقامات هوانوردی کشورها جمع‌آوری شده‌اند. همچنین پایگاه داده گسترده‌ای به نام Wikibase وجود دارد که شامل بیش از ۲۵۸۰۰۰ سانحه از انواع مختلف هواپیماها و پهپادها است. این اطلاعات در وبسایت رسمی Aviation-safety.net در دسترس است. در بخش عوامل هواشناسی، ASN به‌طور خاص بر تأثیر ابر آتشفشانی<sup>۱</sup>، بارش سنگین<sup>۲</sup>، یخ‌زدگی<sup>۳</sup>، برخورد آذرخش<sup>۴</sup>،

<sup>7</sup> Turbulence

<sup>8</sup> Low Visibility

<sup>9</sup> Crosswind & Gusting Wind

<sup>10</sup> Windshear & Downdraft

<sup>11</sup> ECMWF Reanalysis v5

<sup>1</sup> Ash Cloud

<sup>2</sup> Heavy Rainfall

<sup>3</sup> Icing

<sup>4</sup> Lightning Strike

<sup>5</sup> Snow

<sup>6</sup> Thunderstorm

زمان وقوع سوانح است. استفاده از این داده‌ها به تحلیل دقیق‌تر و تعمیم‌پذیرتر شرایط جوی منتهی به سوانح کمک می‌کند.

### ۳-۲-۲. داده‌های آذرخش

در این مطالعه، داده‌های مربوط به رخداد‌های آذرخش از وبگاه Blitzortung.org دریافت شده است. این وبگاه یک شبکه جهانی و غیرتجاری از آشکارسازهای آذرخش است که با مشارکت داوطلبان در نقاط مختلف جهان راه‌اندازی شده و به‌صورت آنی، موقعیت و زمان دقیق تخلیه‌های الکتریکی جوی را ثبت می‌کند. این سامانه از فناوری (TOA<sup>4</sup>) برای تعیین موقعیت آذرخش استفاده می‌کند. در این روش، چندین گیرنده امواج الکترومغناطیسی حاصل از تخلیه الکتریکی آذرخش را ثبت کرده و با محاسبه اختلاف زمان رسیدن امواج به گیرنده‌های مختلف، موقعیت دقیق آذرخش را برآورد می‌کند.

### ۲-۲-۴. تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مادیس

#### ماهواره ترا

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل کیفی شرایط جوی در زمان وقوع توفان تندر، از تصاویر رنگ حقیقی به‌دست‌آمده از سنجنده نصب‌شده بر روی ماهواره ترا استفاده شده است. این تصاویر با ترکیب باندهای مرئی شماره ۱ (قرمز، ۶۷۰-۶۲۰ نانومتر)، ۴ (سبز، ۵۶۵-۵۴۵ نانومتر)، و ۳ (آبی، ۴۷۹-۴۵۹ نانومتر) تولید می‌شوند و نمایی نزدیک به آنچه چشم انسان از سطح زمین و جو مشاهده می‌کند، ارائه می‌دهند و برای تشخیص پدیده‌های جوی مانند توسعه ابرهای کومه‌ای باران (CB)، مناطق متراکم رطوبتی، و وجود گردوغبار یا دود بسیار کاربردی هستند. ماهواره ترا یکی از ماهواره‌های مدار قطبی سازمان فضایی ناسا است که از سال ۱۹۹۹ در حال فعالیت بوده و روزانه دو بار از روی هر نقطه از کره زمین عبور می‌کند. سنجنده مادیس با تفکیک مکانی متوسط (۲۵۰ متر تا ۱ کیلومتر بسته به کانال مورد استفاده) و پوشش طیفی گسترده، امکان رصد دقیق و گسترده پدیده‌های جوی و سطحی را فراهم می‌سازد. تحلیل این تصاویر نقش مکملی در

داده‌های بازتحلیل هستند که توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی (ECMWF<sup>1</sup>) تولید و از طریق سرویس تغییر اقلیم کوپرنیکس<sup>2</sup> منتشر می‌شود (هرباش و همکاران، ۲۰۲۰). این مجموعه داده، بازسازی پیوسته‌ای از وضعیت جو زمین را با بهره‌گیری از مدل‌های عددی پیشرفته و مشاهدات جهانی فراهم می‌کند و با بازه زمانی یک‌ساعته و تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه (تقریباً ۳۱ کیلومتر) در دسترس است. این داده‌ها شامل متغیرهای جوی مختلفی نظیر دمای هوا، میدان باد و رطوبت نسبی در سطوح مختلف، فشار تراز دریا، بارش، انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE<sup>3</sup>) و بسیاری متغیرهای دیگر است که برای تحلیل‌های اقلیمی، هواشناسی کاربردی و ایمنی هوانوردی بسیار مفید هستند. یکی از ویژگی‌های برجسته داده‌های ERA5، همگن بودن آنها در بازه‌های زمانی طولانی و فراهم کردن اطلاعات قابل اعتماد حتی در مناطقی با پوشش مشاهده‌ای ضعیف است. این داده‌ها برای دوره بلندمدت از سال ۱۹۴۰ تاکنون در دسترس هستند و به‌طور گسترده در پژوهش‌های هواشناسی، اقلیم‌شناسی و مطالعات ایمنی پرواز به کار می‌روند. در این مطالعه، از داده‌های ERA5 برای بررسی متغیرهایی نظیر سرعت و جهت باد در ارتفاعات پایین، تندبادهای لحظه‌ای، دما و دمای نقطه شبنم در ارتفاع دو متر از سطح زمین، CAPE، مقدار بارش تجمعی ساعتی باران و برف استفاده شده است. داده‌های بازتحلیل ERA5، با فراهم آوردن مجموعه‌ای پیوسته، گسترده و چندترازی از متغیرهای جوی، نقش مکمل داده‌های ایستگاهی نظیر متار را در این مطالعه ایفا می‌کنند. اگرچه برخی متغیرهای سطحی مانند دما، رطوبت نسبی و باد در هر دو منبع موجود است، اما ERA5 با پوشش مکانی پیوسته، امکان دسترسی به متغیرهایی فراتر از ظرفیت مشاهدات ایستگاهی را فراهم می‌سازد. این قابلیت‌ها شامل بررسی ساختار قائم باد، محاسبه شاخص‌های ناپایداری همرفتی و تحلیل شرایط جوی در لایه‌های مختلف جو در

<sup>3</sup> Convective Available Potential Energy

<sup>4</sup> Time of Arrival

<sup>1</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

<sup>2</sup> Copernicus Climate Change Service

سال ۱۹۱۹ تاکنون ثبت کرده و به روزرسانی می‌کند. سوانح انتخاب‌شده در این مطالعه در بازه زمانی ۱۹۶۷ تا ۲۰۲۴ قرار گرفته‌اند که در منطقه ایران و با تأثیر مستقیم شرایط جوی رخ داده‌اند. بر این اساس، در منطقه ایران تنها ۷ سانحه یا حادثه جدی هوایی مرتبط با پدیده‌های نامبرده شناسایی شد که در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

### ۲-۳-۲. تحلیل شرایط جوی با استفاده از

#### داده‌های بازتحلیل ERA5

برای بررسی شرایط جوی مرتبط با هر رویداد، از داده‌های بازتحلیل ERA5 استفاده شده است. متغیرهای مورد استفاده بسته به نوع سانحه متفاوت بوده‌اند. برای مثال، در رخدادهایی که مرتبط با پدیده‌هایی مانند دید کم، یخ‌زدگی یا بارش برف بودند، متغیرهایی نظیر دما و رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری از سطح زمین، باد در ارتفاع ده متری از سطح زمین و بارش برف در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه متغیر متغیر رطوبت نسبی مستقیماً در داده‌های ERA5 موجود نبود، محاسبه آن با استفاده از داده‌های دمای هوا و دمای نقطه شبنم انجام شد. برای محاسبه رطوبت نسبی ابتدا داده‌ها از واحد کلوین به درجه سلسیوس تبدیل شدند. سپس طبق رابطه (۱) از رابطه استاندارد بین دمای هوا و دمای نقطه شبنم استفاده شد:

$$RH = \frac{e(T_d)}{e(T)} \times 10 \quad (1)$$

که  $e(T)$  و  $e(T_d)$  به ترتیب فشار بخار اشباع در دمای نقطه شبنم و دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین هستند که مطابق روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند (بولتون، ۱۹۸۰):

$$e(T) = \exp\left(\frac{T \times 17.67}{T + 243.5}\right) \times 6.112 \quad (2)$$

$$e(T_d) = \exp\left(\frac{T_d \times 17.67}{T_d + 243.5}\right) \times 6.112 \quad (3)$$

در نهایت مقدار رطوبت نسبی در بازه ۰ تا ۱۰۰ درصد به دست می‌آید.

کنار داده‌های عددی بازتحلیل و گزارش‌های متار ایفا می‌کند و در تفسیر بهتر شرایط حاکم در زمان وقوع سانحه مؤثر خواهد بود (جاستیس و همکاران، ۲۰۰۲).

### ۲-۲-۵. داده‌های مشاهداتی متار

در این پژوهش، به منظور بررسی شرایط جوی دقیق و مستند در زمان وقوع سانحه، از گزارش‌های مشاهداتی فرودگاهی موسوم به متار استفاده شد. این گزارش‌ها که به صورت نیم‌ساعته یا ساعتی توسط ایستگاه‌های هواشناسی مستقر در فرودگاه‌ها تهیه و منتشر می‌شوند، اطلاعات دقیقی درباره وضعیت جوی منطقه ارائه می‌دهند. گزارش‌های متار شامل متغیرهایی نظیر سمت و سرعت باد، تغییرات ناگهانی در سمت و سرعت باد، دید افقی، پدیده‌های جوی خاص نظیر بارش، مه، تگرگ، آذرخش و طوفان گردوخاک، وضعیت ابرها (ارتفاع پایه، نوع و پوشش)، دما، دمای نقطه شبنم، فشار هوایی باشند (WMO، ۲۰۱۹). در این مطالعه، گزارش‌های متار ایستگاه نزدیک به محل سانحه (فرودگاه مبدأ یا مقصد) در بازه زمانی قبل، حین و پس از وقوع سانحه مورد بررسی قرار گرفت تا مشخص شود چه نوع پدیده‌های جوی در لحظه بحرانی حضور داشته‌اند. این اطلاعات به ویژه برای شناسایی دقیق زمان وقوع توفان تندری، میزان کاهش دید، وجود بارش یا تگرگ و تغییرات ناگهانی باد اهمیت دارد و در کنار سایر داده‌ها نظیر داده‌های بازتحلیل ERA5 و تصاویر ماهواره‌ای تحلیل شد تا تحقیق جامع‌تری از شرایط جوی حاصل شود.

### ۲-۳. روش کار

#### ۲-۳-۱. انتخاب رویدادها

در این مطالعه، به منظور تحلیل نقش شرایط جوی در وقوع سوانح هوایی در ایران، ابتدا سوانحی از پایگاه اطلاعات ایمنی هوانوردی (ASN) استخراج شد که گزارش‌ها و شواهد معتبر، تأثیر مستقیم یکی از پدیده‌های جوی را در بروز آن‌ها تأیید کرده بودند. این پدیده‌ها شامل ابرهای آتشفشانی، بارش شدید، یخ‌زدگی، برخورد آذرخش، برف، توفان تندری، تلاطم، دید محدود، باد عرضی، باد جستی، چینش باد و فروهنج هستند. پایگاه ASN اطلاعات سوانح هوایی را از

به تحلیل دقیق‌تر و تفسیر بهتر پدیده‌های همرفتی و خطرات مرتبط کمک می‌کنند.

### ۳. تحلیل و بررسی نتایج

جدول ۱، شامل تعداد سوانح هوایی و حوادث جدی در ایران بر اساس عوامل جوی است. تحلیل این داده‌ها به ما این امکان را می‌دهد که رابطه بین شرایط جوی و سوانح هوایی و حوادث جدی در ایران را در زمان‌های خاص مورد بررسی قرار دهیم. تنها یک سانحه در تاریخ ۲ ژانویه ۲۰۰۸ به دلیل یخ‌زدگی در مرحله برخاست ثبت شده است. یخ‌زدگی یکی از عوامل مخاطره‌آمیز هواپیمایی، به ویژه در مراحل ابتدایی پرواز مانند برخاست که در آن هواپیما به سرعت از زمین بلند می‌شود و در مراحل نهایی پرواز و فرود، است (مازون و همکاران، ۲۰۱۸). این سانحه نشان‌دهنده اهمیت نظارت و پیش‌بینی دقیق شرایط دمایی در مناطق مبدأ و مقصد پروازی است. یک سانحه و یک حادثه جدی مربوط به برخورد آذرخش در تاریخ‌های ۱۸ آوریل ۱۹۶۷ و ۲۴ مه ۲۰۲۴ گزارش شده است. سانحه در مرحله پرواز و حادثه جدی در مرحله نزول اتفاق افتاده است که در ارتفاعات بالا و میانی از مراحل پرواز قرار دارند. آذرخش یکی از چالش‌های جدی جوی در ایمنی هوانوردی است اما فناوری‌های نوین در طراحی هواپیما، پیش‌بینی‌های هواشناسی دقیق‌تر و اتخاذ دستورالعمل‌های عملیاتی مناسب باعث شده‌اند که مخاطرات ناشی از این پدیده تا حد زیادی کاهش یابد. با این حال، همچنان نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه بهبود سامانه‌های هشداردهنده و روش‌های پیشگیری از تأثیرات مخرب آذرخش در صنعت هوانوردی وجود دارد. یک سانحه در تاریخ ۸ مه ۲۰۰۹ به دلیل توفان تندی در مرحله پرواز به وقوع پیوسته است. توفان‌های تندی می‌توانند تأثیرات شدیدی بر پروازها داشته باشند، به ویژه در مرحله پرواز، که هواپیما ممکن است در معرض تغییرات سریع شرایط جوی مانند آذرخش، بارش شدید و تلاطم قرار گیرد. معمولاً بیشترین سوانح هوانوردی مربوط به محدودیت دید در مراحل مربوط به صعود و فرود اتفاق می‌افتد (مازون و همکاران،

### ۲-۳-۳. پیش‌بینی وقوع آذرخش با استفاده از

#### شاخص $CAPE \times P$

در بررسی حوادث مرتبط با آذرخش و توفان تندی، از شاخص حاصل ضرب انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE) در بارش (P) استفاده شد. آذرخش یکی از پدیده‌های مخاطره‌آمیز جوی است که تأثیرات قابل توجهی بر سامانه‌های طبیعی و انسانی دارد. شاخص‌های مختلفی برای پیش‌بینی آذرخش پیشنهاد شده‌اند، از جمله شاخص پتانسیل آذرخش ( $LPI^1$ )، شاخص تهدید آذرخش ( $LTI^2$ ) و حاصل ضرب مقدار انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی در مقدار بارش ( $CAPE \times P$ ). شاخص  $CAPE \times P$ ، که در مطالعاتی همچون رامپس و همکاران (۲۰۱۸) و صالح و همکاران (۲۰۲۳) معرفی شده است، به عنوان یک تخمین ساده اما مؤثر برای شناسایی احتمال وقوع آذرخش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه، با بهره‌گیری از داده‌های بازتحلیل ERA5، مقدار این شاخص محاسبه شده و توزیع مکانی آن برای تحلیل رخدادهای آذرخش بررسی گردیده است. این شاخص نشان‌دهنده مقدار انرژی در دسترس برای ایجاد جریان‌های صعودی است که می‌تواند به آذرخش منجر شود. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که مقادیر بالای  $CAPE \times P$  با نرخ بالای آذرخش ارتباط دارد (تیبت و همکاران، ۲۰۱۹).

### ۲-۳-۴. بهره‌گیری از داده‌های تکمیلی برای

#### تحلیل دقیق‌تر رویدادها

در ادامه تحلیل با استفاده از داده‌های ERA5، به منظور بررسی دقیق‌تر برخی رخدادهای از منابع داده‌ای مکمل نیز بهره گرفته شد. برای ارزیابی درستی شاخص  $CAPE \times P$  در برآورد وقوع آذرخش، داده‌های زمانی و مکانی آذرخش‌های ثبت‌شده از پایگاه [Blitzortung.org](http://Blitzortung.org) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، به منظور مشاهده وضعیت ابرناکی و بررسی بصری شرایط جوی حاکم در زمان وقوع توفان‌های تندی، از تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس استفاده شد. این منابع

<sup>2</sup> Lightning Threat Index

<sup>1</sup> Lightning Potential Index

که در شرایط دید کم، ارزیابی دقیق و استفاده از تجهیزات ناوبری می‌تواند از وقوع چنین سوانحی جلوگیری کند. با توجه به جدول ۱ در تاریخ ۱۹ ژوئن ۲۰۱۶ یک سانحه هوانوردی به دلیل باد عرضی در مرحله فرود رخ داده است. بادهای عرضی می‌توانند در هنگام برخاستن و فرود اختلال ایجاد کرده و منجر به مشکلات جدی برای کنترل هواپیما شوند. به‌ویژه در هنگام فرود، که هواپیما باید با سرعت پایین تری حرکت کند و نیاز به دقت بیشتری در هدایت دارد، باد عرضی می‌تواند چالش برانگیز باشد. این سانحه نشان‌دهنده اهمیت نظارت بر شرایط باد در هنگام فرود و صعود و رعایت دستورالعمل‌های مربوط به سرعت و زاویه فرود و صعود در مواجهه با بادهای عرضی است.

جدول ۱. تعداد سوانح و حوادث جدی هوایی در ایران بر اثر عامل جوی و تاریخ وقوع آنها (مرجع: پایگاه ASN)

مرحله پرواز طبق شکل ۱	تاریخ	تعداد	عامل جوی
-	-	۰	ابر آتشفشانی، بارش شدید، برف، تلاطم، باد جستی، چینش باد و فروهنج
برخاست	۲ ژانویه ۲۰۰۸	۱ سانحه	یخ‌زدگی
پرواز، نزول	۱۸ آوریل ۱۹۶۷، ۲۴ مه ۲۰۲۴	۱ سانحه، ۱ حادثه جدی	برخورد آذرخش
پرواز	۸ مه ۲۰۰۹	۱ سانحه	توفان تندی
تقرب، فرود	۹ ژانویه ۲۰۱۱، ۱۹ ژانویه ۲۰۲۲	۲ سانحه	دید کم
فرود	۱۹ ژوئن ۲۰۱۶	۱ سانحه	باد عرضی

مسافران به شدت مجروح شدند. پرواز شماره IR235 ایران‌ایر یک پرواز برنامه‌ریزی شده از تهران به مقصد شیراز بود. کمک‌خلبان که در این پرواز خلبان کنترل‌کننده بود، پیش از پرواز دور بدنه هواپیما را بررسی کرد. از آنجایی که هوا برقی بود و دما در محدوده‌ی یخ‌زدگی قرار داشت، او درخواست یخ‌زدایی<sup>۱</sup> کرد. با توجه به اینکه هواپیماهای زیادی منتظر ضدیخ‌پاشی بودند، فرمانده پرواز تصمیم گرفت عملیات ضدیخ‌پاشی انجام نشود. موتورها روشن شدند و هواپیما در ساعت ۰۷:۰۹ به سمت محلی به سمت باند حرکت کرد. در ساعت ۰۷:۳۱ مجوز برخاست صادر شد. کمی پس از جدا شدن از زمین، هواپیما به سمت چپ غلتید و نوک بال

### ۳-۱. بررسی موردی تأثیر عامل یخ‌زدگی بر

#### سوانح هوانوردی در ایران

#### الف: تحلیل مورد ۲ ژانویه ۲۰۰۸ بر اساس اطلاعات

#### ایمینی پرواز (ASN)

در تاریخ ۲ ژانویه ۲۰۰۸، یک فروند هواپیمای فوکر ۱۰۰ متعلق به شرکت ایران‌ایر با شماره ثبت EP-IDB، هنگام برخاستن (طبق جدول ۱ مرحله ۳) از فرودگاه مهرآباد تهران به مقصد شیراز دچار سانحه شد. هواپیما با وجود ۱۱۳ سرنشین تلفات جانی نداشت اما به‌طور کامل نابود شد. سانحه در مرحله‌ی برخاستن رخ داد و گزارش نهایی بررسی آن تکمیل شده است. در این سانحه، چهار نفر از خدمه و هفت نفر از

<sup>۱</sup> De-icing

آغاز شد. تمام خدمه و مسافران از طریق دو خروجی اضطراری بال سمت راست تخلیه شدند. تصاویری از بدنه هواپیما در روز سانحه در شکل ۳ نشان داده شده است. احتمالاً علت اصلی سانحه تصمیم اشتباه خدمه در انجام ندادن عملیات ضدیخ‌پاشی بوده که منجر به آلودگی بال‌ها و در نهایت ورود هواپیما به حالت واماندگی (stall) در هنگام برخاستن شده است. علل موثر ثانویه، ضعف در مدیریت منابع کابین خلبان و ضعف در مدیریت عملیات پروازی در شرایط هوای سرد توسط شرکت ایران ایر می‌تواند باشد.



شکل ۳. تصویر هواپیمای سانحه هوانوردی با عامل هواشناسی یخ‌زدگی در روز ۲ ژانویه ۲۰۰۸ (Aviation-safety.net)

چپ با زمین تماس پیدا کرد. پس از آن هواپیما برای لحظه‌ای به وضعیت نسبتاً پایدار برگشت اما چند ثانیه بعد، در حالی که در حال از دست دادن ارتفاع بود دوباره به سمت چپ غلتید. این بار بال چپ کاملاً با زمین تماس پیدا کرد و هنگام بازگشت به وضعیت نسبتاً مستقیم، هر دو چرخ اصلی با زمین برخورد کردند. تمام اراکه‌های فرود شکستند و هواپیما روی سطح کنار باند سر خورد. گزارش شده که در هنگام برخورد یا بلافاصله پس از آن، تمام برق هواپیما قطع شده بود. پس از توقف هواپیما، آتش‌سوزی از ریشه بال چپ به سمت بدنه



دید افقی کمک کرده است. در زمان وقوع سانحه طبق داده‌های بازتحلیل ERA5 دما و رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری از سطح زمین در ایستگاه فرودگاه مهرآباد به ترتیب در حدود ۱/۹ درجه سلسیوس و ۸۳ درصد بوده است و باد ملایمی در حدود ۱/۷ متربر ثانیه رخ داده است.

با توجه به شرایط جوی فوق، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب دمای پایین، رطوبت بالا، مه، پوشش ابری متراکم و بارش برف سبک همگی عواملی بوده‌اند که می‌توانستند در ایجاد مخاطره در پرواز نقش داشته باشند. وجود مه و کاهش دید، به‌همراه یخ‌زدگی روی بدنه و بال‌های هواپیما و سطح باند، می‌توانسته چالش‌های جدی برای خلبان و عملکرد هواپیما ایجاد کند. با توجه به اینکه این سانحه در فاصله بسیار کوتاهی پس از برخاستن از روی باند رخ داده و هواپیما هنوز به ارتفاع بالاتر از لایه‌های سطحی وارد نشده بود، شرایطی نظیر دمای نزدیک به نقطه انجماد، رطوبت نسبی بالا و بارش برف سبک

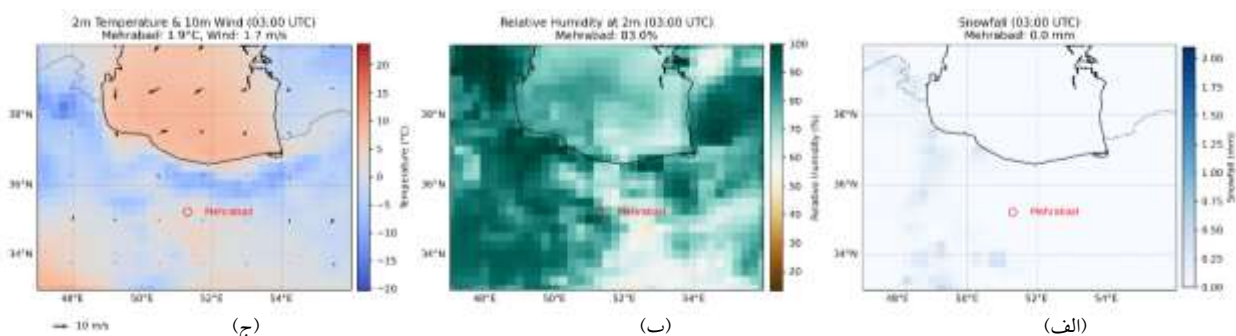
## ب: بررسی متغیرهای جوی مؤثر بر رخداد سانحه در روز سانحه

در تاریخ ۲ ژانویه ۲۰۰۸ بر اساس گزارش‌های متار، مهم‌ترین شرایط جوی در زمان سانحه شامل مه غلیظ (FG)، دید کم (۱۰۰۰ متر)، دمای پایین (صفر درجه سلسیوس)، رطوبت بالا، باد ملایم، آسمان ابری با لایه‌های ابری در ارتفاع‌های مختلف (FEW035CBSCT040 OVC090) و بارش برف سبک می‌باشد.

در روز سانحه، شرایط جوی در فرودگاه مهرآباد به گونه‌ای بود که می‌توانست تأثیر بسزایی بر عملکرد هواپیما داشته باشد. بر اساس داده‌های ERA5 (شکل ۴) دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین در حدود صفر تا ۴ درجه سلسیوس بوده و به نقطه انجماد نزدیک بوده است. چنین شرایطی امکان تشکیل یخ‌زدگی را به‌خصوص روی بدنه هواپیما افزایش می‌دهد. رطوبت نسبی در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین مقدار بالایی داشته است که به تشکیل مه و کاهش

برای تشکیل آب ابرسرد و یخزدگی آن بر روی بدنه و بخصوص بالهای هواپیما بوده‌اند (لستر، ۲۰۰۷).

که در متارهای ایستگاه مهرآباد نیز گزارش شده است، همراه با پتانسیل وقوع سرمایش آترودینامیکی بیانگر شرایط مؤثر



شکل ۴. الف) مقدار بارش برف در یک ساعت گذشته (برحسب میلی متر)، ب) رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری از سطح زمین (برحسب درصد)، ج) دما در ارتفاع دو متری از سطح زمین (برحسب درجه سلسیوس، نواحی سایه خورده رنگی) و بردار باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در ساعت ۳ UTC روز ۲ ژانویه ۲۰۰۸ همراه با سانحه هوانوردی ناشی از یخزدگی

اجتناب شود. همچنین، هواپیماهای مدرن به پوشش‌های ویژه‌ای مجهز هستند که امکان عبور ایمن جریان الکتریکی از بدنه را فراهم می‌کند. تجهیزات حساس ناوبری و مخابراتی نیز با بهره‌گیری از محافظ‌های الکترومغناطیسی در برابر تداخل ناشی از میدان‌های قوی محافظت می‌شوند تا ایمنی پرواز در شرایط نامساعد جوی حفظ شود (فیشر و پلامر، ۱۹۷۷).

### ۳-۲-۱. سانحه روز ۱۸ آوریل ۱۹۶۷

#### الف: تحلیل سانحه براساس اطلاعات ایمنی پرواز (ASN)

هواپیمای لاکهید C-130E هرکولس با شماره ثبت ۱۰۷-۵ و شماره سریال سازنده ۴۱۱۸، متعلق به نیروی هوایی شاهنشاهی ایران (IIAF)، در تاریخ سه‌شنبه ۱۸ آوریل ۱۹۶۷ ساعت ۱۳:۲۵ UTC در حال پرواز داخلی از فرودگاه ساوه (OIIV) به فرودگاه مهرآباد تهران (OIII) بود که در مسیر خود در منطقه زرنديه سقوط کرد. این سانحه در مرحله پرواز (مرحله ۵ جدول ۱) و به دلیل برخورد صاعقه با هواپیما رخ داد. هواپیما به‌طور کامل نابود شد و ۲۳ سرنشین آن جان خود را از دست دادند. این سانحه به‌عنوان یک سانحه نظامی دسته‌بندی شده و هواپیما از رده خارج شد.

#### ب: بررسی متغیرهای جوی مؤثر در روز و منطقه سانحه

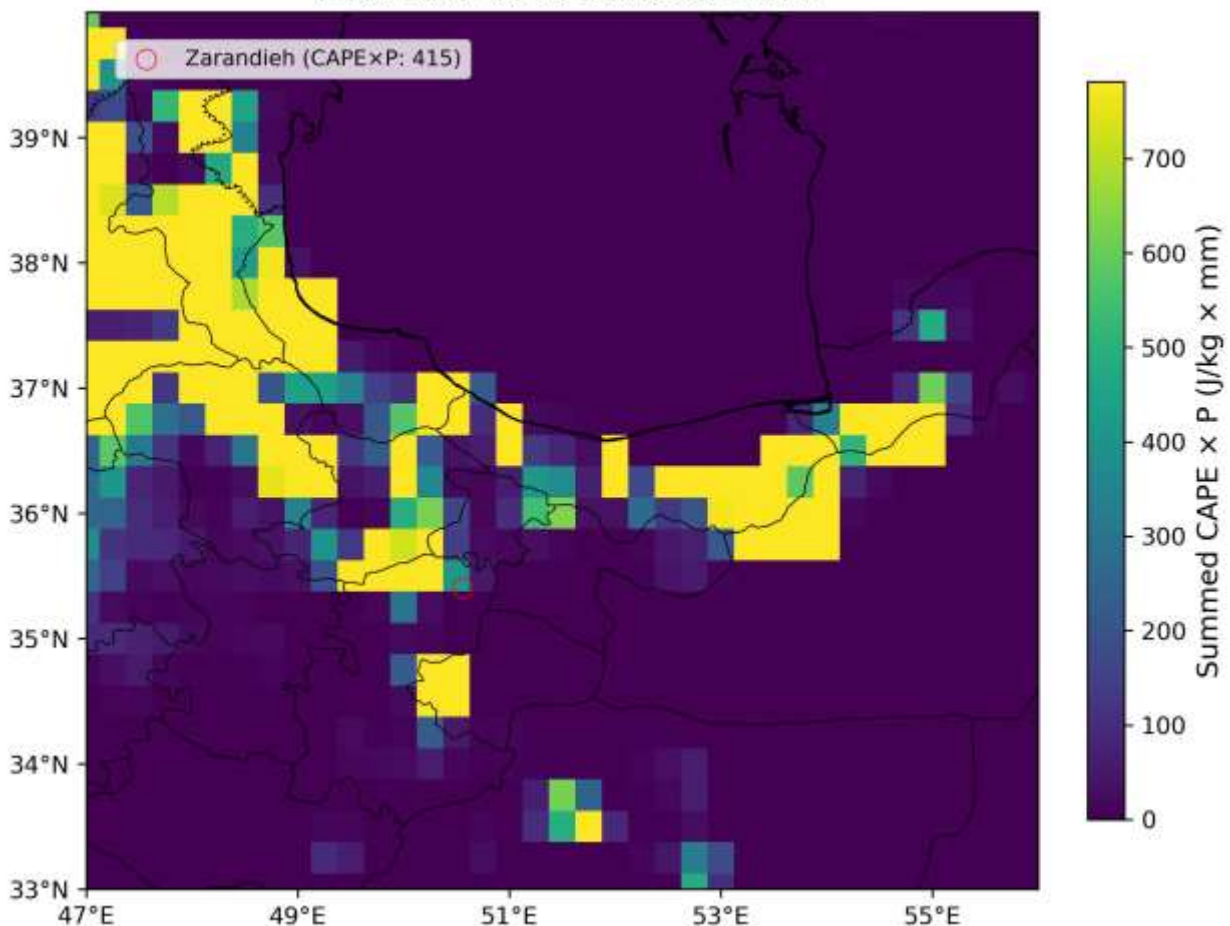
### ۳-۲. بررسی تأثیر عامل برخورد آذرخش بر سوانح و حوادث جدی هوانوردی در ایران

آذرخش می‌تواند تأثیرات متعددی بر هواپیمای در حال پرواز داشته باشد که این تأثیرات در سه بُعد اصلی قابل بررسی‌اند. از نظر الکترونیکی و مخابراتی، عبور جریان الکتریکی ناشی از آذرخش ممکن است باعث ایجاد اختلال در عملکرد سیستم‌های حساس هواپیما شود و تداخل‌هایی در ارتباطات رادیویی و تجهیزات ناوبری به وجود آورد (فیشر و پلامر، ۱۹۷۷). از منظر فیزیکی و مکانیکی، برخورد آذرخش می‌تواند منجر به آسیب‌های سطحی مانند سوختگی در نقاط برخورد و خروج آن بر بدنه هواپیما شود که نیازمند بررسی و تعمیرات پس از فرود خواهد بود. همچنین، این پدیده ممکن است بر عملکرد و ایمنی پرواز اثر بگذارد، از جمله ایجاد ناپایداری در عملکرد موتور بر اثر شوک وارد شده به توربین‌ها و همچنین افزایش خطرات ناشی از شرایط جوی ناپایدار مانند تلاطم شدید، بادهای ناگهانی شدید و بارش‌های سنگین که در توفان‌های تندی همراه آذرخش رایج هستند (راکوف و یومن، ۲۰۰۳). برای مواجهه با این مخاطرات، مجموعه‌ای از اقدامات پیشگیرانه به کار گرفته می‌شود. از جمله خلبانان با بهره‌گیری از سامانه‌های راداری پیشرفته و داده‌های دیدبانی و پیش‌بینی هواشناسی، مسیر پروازی را به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌کنند که از مناطق مستعد توفان

چنین شرایطی با وقوع آذرخش منجر به سقوط هواپیمای C-130E در زرنديه انطباق داشته و نشان می‌دهد که رخداد پدیده‌های همرفتی شدید به ویژه برخورد آذرخش به عنوان علت اصلی سانحه، از منظر هواشناسی کاملاً توجیه پذیر بوده است. شایان ذکر است که به دلیل قدیمی بودن زمان رخداد، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های ثبت شده آذرخش و همچنین گزارش‌های همزمان متار برای این تاریخ در دسترس نبوده‌اند؛ از این رو، تحلیل این سانحه صرفاً بر پایه شاخص  $CAPE \times P$  بوده است که در پژوهش‌های نوین به عنوان یکی از معیارهای معتبر برای پیش‌بینی احتمال وقوع آذرخش شناخته می‌شود.

در روز سه‌شنبه ۱۸ آوریل ۱۹۶۷، نقشه ترکیبی از شاخص ناپایداری  $CAPE$  ضرب در بارش تجمعی (P) در بازه زمانی ۱۳ تا ۱۴ به وقت جهانی (UTC)، ناپایداری قابل توجهی را در ناحیه شمال غرب کشور، رشته کوه البرز و همچنین حوالی زرنديه در شمال استان مرکزی نشان می‌دهد (شکل ۵). بر اساس این نقشه، مقدار  $CAPE \times P$  در منطقه زرنديه به عدد  $415 \text{ J/kg} \times \text{mm}$  رسیده که در محدوده مستعد رخداد آذرخش قرار دارد. توزیع گسترده نواحی با مقادیر بالای این شاخص در شمال غرب کشور و بخش‌هایی از البرز مرکزی گویای وجود شرایط هم‌زمان برای همرفت شدید و رطوبت کافی در این بازه زمانی است که بستر مناسبی را برای تشکیل ابرهای کومه‌ای بار (CB) و وقوع آذرخش نشان می‌دهد.

Lightning Prediction using  $CAPE \times P$   
Time: 1967-04-18 13UTC to 14UTC



شکل ۵. نقشه توزیع شاخص ترکیبی ناپایداری همرفتی  $CAPE \times P$  در بازه زمانی ۱۳ تا ۱۴ به وقت جهانی (UTC) در ۱۸ آوریل ۱۹۶۷ بر حسب  $\text{J/kg} \times \text{mm}$

الف: تحلیل حادثه جدی براساس اطلاعات ایمنی پرواز (ASN)

۳-۲-۲. حادثه جدی روز ۲۴ مه ۲۰۲۴

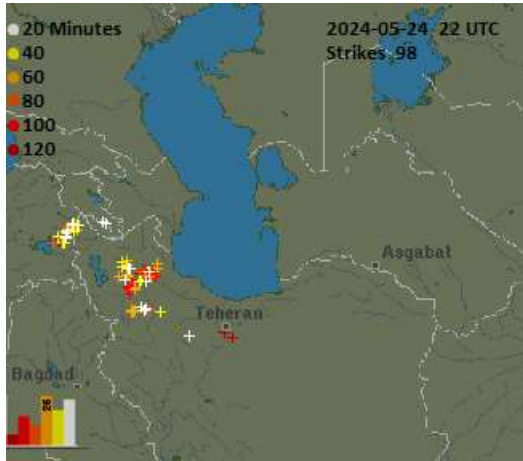
براساس مستندات سامانه اطلاعات ایمنی پرواز، یک فروند هواپیمای فوکر ۱۰۰ متعلق به شرکت ایران ایر در تاریخ جمعه ۲۴ مه ۲۰۲۴ ساعت ۲۱:۴۰ UTC در حال نزول (مرحله ۶ جدول ۱) به سمت فرودگاه بین‌المللی تبریز (OITT) بود که در ارتفاع ۲۴۰۰۰ پایی از سطح دریا (۷۳۰۰ متر) در مسیر خود به تبریز، به دلیل برخورد با آذرخش با مشکلاتی روبه‌رو شد. این حادثه جدی منجر به از کار افتادن چندین سامانه از جمله رادار هواشناسی، سامانه هشدار نزدیکی زمین (GPWS<sup>1</sup>) و دستگاه ارسال سیگنال شناسایی شد و مشکلاتی نیز در فشار کابین ایجاد گردید. با توجه به وضعیت پیش‌آمده، خلبانان تصمیم به تغییر مسیر گرفته و هواپیما را به سمت فرودگاه اردبیل (OITL)، نزدیک‌ترین فرودگاه نسبت به محل حادثه، هدایت کردند. خوشبختانه هواپیما با ۱۱۰ سرنشین بدون هیچ‌گونه تلفات به‌طور ایمن در فرودگاه اردبیل به زمین نشست. این حادثه که اطلاعات و مستندات آن توسط گروه تحقیق ذی‌صلاح بررسی و نهایی شده است، به عنوان یک حادثه جدی طبقه‌بندی شد.

### ب: بررسی متغیرهای جوی مؤثر در روز و منطقه حادثه جدی

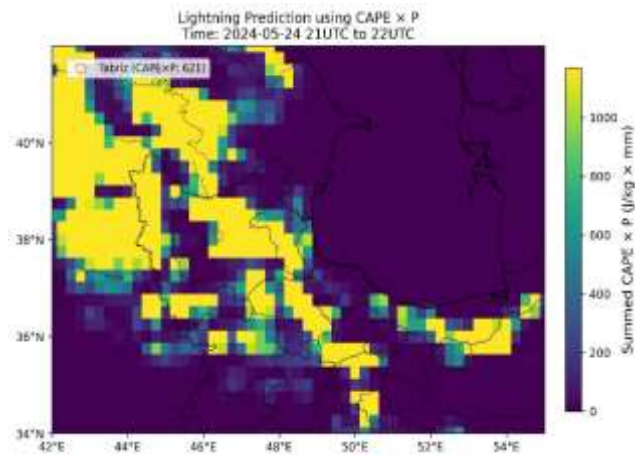
در ساعت ۲۲ UTC روز ۲۴ مه ۲۰۲۴، شاخص ترکیبی محاسبه شده  $CAPE \times P$  بیشترین مقادیر خود را در نواحی شمال‌غربی ایران نشان می‌دهد که بیان‌گر وجود هم‌زمان مقادیر بالای انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی و رطوبت نسبی در منطقه است (شکل ۶-الف). مقدار شاخص  $CAPE \times P$  در ایستگاه فرودگاه تبریز برابر  $621 J/kg \times mm$  است که در بازه مستعد رخداد آذرخش است. این شرایط زمینه‌ساز وقوع توفان‌های تندری بوده و با داده‌های رعدوبرق شبکه Blitzortung انطباق دارد، به گونه‌ای که عمده فعالیت‌های

آذرخش در بازه زمانی دو ساعت منتهی به ساعت ۲۲ UTC در شمال‌غرب کشور متمرکز شده‌اند (شکل ۶-ب). نقاط رنگی بیان‌گر مکان و زمان وقوع آذرخش‌ها هستند؛ به‌طوری‌که رنگ‌های سفید و زرد نشان‌دهنده آذرخش‌های اخیر و رنگ‌های قرمز و نارنجی مربوط به رخدادهای گذشته‌تر هستند. بیشترین تمرکز فعالیت در شمال‌غرب ایران مشاهده می‌شود که مؤید فعالیت ناپایداری‌های همرفتی در این منطقه است. در مجموع، ۹۸ مورد آذرخش ثبت شده که ۲۶ مورد آن در یک ساعت گذشته رخ داده است. حضور رنگ‌های زرد و سفید در این نقشه‌ها نیز مؤید وقوع اخیر این آذرخش‌هاست. همچنین براساس گزارش‌های متار فرودگاه تبریز، در همین ساعت وجود ابرهای کومه‌ای بار (CB) نمایان‌گر حضور سامانه‌های همرفتی فعال در منطقه است. همچنین در روز ۲۴ مه ۲۰۲۴، فرودگاه تبریز شاهد شرایط جوی ناپایدار با فعالیت‌های رگبار شدید باران همراه با آذرخش بود. از ساعت ۱۵:۰۰ UTC، ابرهای کومه‌ای بار در ارتفاعات مختلف تشکیل شدند که منجر به آذرخش و باران‌های پراکنده به ویژه در ساعات بعدازظهر تا اواخر شب گردید. دید افقی در برخی ساعات به ۴۰۰ متر کاهش یافت و سرعت باد تا حدود ۱۰ متر بر ثانیه با جهت‌های متغیر گزارش شد. دما بین ۱۳ تا ۲۵ درجه سلسیوس بوده و رطوبت نسبی بالای محیط، شرایط لازم را برای تشکیل این پدیده‌ها فراهم کرد. در مجموع، انطباق میان شاخص دینامیکی  $(CAPE \times P)$ ، داده‌های مشاهده‌ای آذرخش (Blitzortung) و گزارش‌های متار بر فعال بودن یک سامانه‌ی همرفتی قوی در شمال‌غرب کشور و تأثیر مستقیم آن بر شرایط جوی فرودگاه تبریز دلالت دارد.

<sup>1</sup> Ground Proximity Warning System



(ب)



(الف)

شکل ۶. نقشه توزیع شاخص ترکیبی ناپایداری همرفتی  $CAPE \times P$  در بازه زمانی ۲۱ تا ۲۲ به وقت جهانی (UTC) در تاریخ ۲۴ مه ۲۰۲۴ بر حسب  $J/kg \times mm$  (ب) شکل ۶. نقشه توزیع شاخص ترکیبی ناپایداری همرفتی  $CAPE \times P$  در بازه زمانی ۲۱ تا ۲۲ به وقت جهانی (UTC) در تاریخ ۲۴ مه ۲۰۲۴ بر حسب  $J/kg \times mm$  (ب) نقشه ثبت فعالیت‌های آذرخش در بازه‌ی زمانی دو ساعت منتهی به ساعت ۲۲ UTC از داده‌های شبکه Blitzortung.org

ایران، به‌ویژه در اطراف مشهد، رخ داده است. تصویر رنگ حقیقی سنجنده MODIS بر روی ماهواره‌ی آکوا، ثبت شده در حدود ساعت ۱۳ UTC، اگرچه اندکی پس از زمان وقوع سانحه است، اما نشان‌دهنده‌ی پوشش گسترده و متراکم ابرهای همرفتی در منطقه است که بر وجود شرایط ناپایدار و فعال جوی در زمان سانحه دلالت دارد (شکل ۷-الف). این تصویر در کنار شاخص ترکیبی  $CAPE \times P$  (شکل ۷-ب) که در بازه‌ی زمانی ۱۰ UTC تا ۱۱ UTC مقدار  $J/kg \times mm$  ۴۵۷ را در محل فرودگاه مشهد نشان داده است، بیانگر پتانسیل بالا برای وقوع همرفت قوی و فعالیت آذرخشی در منطقه است. گرچه این شاخص به‌تنهایی برای پیش‌بینی مستقیم پدیده‌هایی مانند تگرگ کفایت نمی‌کند، اما در ترکیب با سایر شواهد از جمله شتاب پایین سوی ثبت شده  $g$  ۱/۸، برخورد تگرگ با بدنه هواپیما، و حضور ابرهای CB می‌توان نتیجه گرفت که هواپیما با بخش فعال سیستم همرفتی برخورد کرده است. این مجموعه شواهد وقوع پرواز در شرایط جوی بحرانی را تأیید می‌کند و تصمیم به بازگشت به فرودگاه مشهد را به‌عنوان اقدامی صحیح و ضروری برای حفظ ایمنی پرواز نشان می‌دهد.

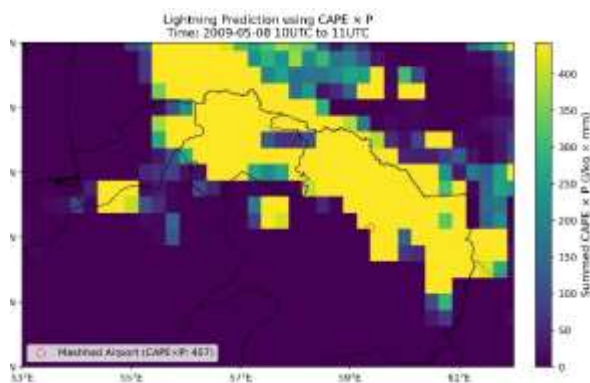
### ۳-۳. بررسی تأثیر عامل توفان تندری بر سوانح هوانوردی در ایران

#### الف: تحلیل سانحه براساس اطلاعات ایمنی پرواز (ASN)

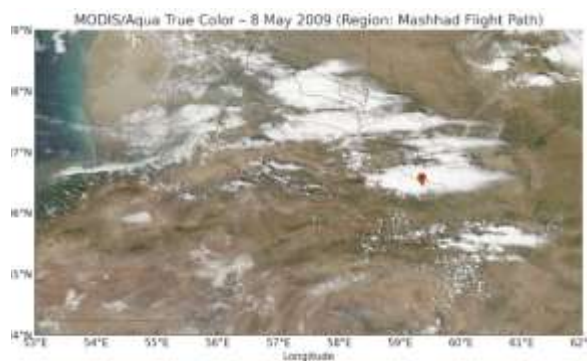
در تاریخ ۸ مه ۲۰۰۹، یک فروند هواپیمای توپولف-Tu-154M متعلق به شرکت ایران ایرتور با شماره ثبت-EP-MCR در مسیر مشهد به تهران در پرواز بود. هواپیما در حین پرواز (مرحله ۵ جدول ۱) در ساعت ۱۱ UTC با شرایط نامساعد جوی حاصل از ابرهای کومه‌ای باران مواجه شد. بدنه هواپیما شتاب پایین سوی  $1/8g$  را تحمل کرد و توسط تگرگ آسیب دید. وقتی گفته می‌شود  $1/8g$ ، یعنی هواپیما شتابی برابر با  $17/66 m/s^2$  را تجربه کرده است. خلبان تصمیم گرفت به فرودگاه مشهد بازگردد. فرود به‌طور عادی انجام شد، اما هواپیما آسیب شدیدی دید و از رده خارج شد. خوشبختانه در این سانحه نیز هیچ‌کدام از ۱۶۹ سرنشین آسیب ندیدند.

#### ب: بررسی متغیرهای جوی مؤثر در روز سانحه

بررسی ترمودینامیکی شرایط جوی سانحه پروازی ۸ مه ۲۰۰۹ نشان می‌دهد که این سانحه در نتیجه‌ی مواجهه‌ی هواپیمای توپولف Tu-154M با ناپایداری شدید جوی در شمال شرق



(ب)



(الف)

شکل ۷. الف) تصویر رنگ واقعی پوشش ابر در ایران (باند‌های مرئی شماره ۱ (قرمز، ۶۲۰-۶۷۰ نانومتر)، ۴ (سبز، ۵۴۵-۵۶۵ نانومتر)، و ۳ (آبی، ۴۵۹-۴۷۹ نانومتر))، ثبت شده توسط سنجنده مادیس ماهواره تراد ۸ مه ۲۰۰۹ در این تصویر محل فرودگاه مشهد مشخص شده است. (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>)، ب) نقشه توزیع شاخص ترکیبی ناپایداری همرفتی  $CAPE \times P$  در بازه ساعت ۱۰ UTC تا ۱۱ UTC در ۸ مه ۲۰۰۹ بر حسب  $J/kg \times mm$

خلبان تصمیم گرفت عملیات فرود را لغو کرده و دوباره برای فرود آماده شود. پس از لغو فرود اولیه، هواپیما در ارتفاع بالا دچار مشکل شد و دوباره هشدار کاهش سرعت فعال گردید. این وضعیت احتمالاً به دلیل تشکیل یخ در بخش‌هایی از هواپیما رخ داد که باعث اختلال در عملکرد آن شد. به دنبال این وضعیت، دو موتور هواپیما از کار افتادند و هواپیما شروع به کاهش ارتفاع کرد. خلبان تلاش کرد قدرت موتور را افزایش دهد اما تنها یک موتور پاسخ داد. در نهایت، در حالی که خلبان اعلام کرد قصد بازگشت به تهران را دارد، هواپیما در ساعت ۱۹:۳۱ به وقت محلی (۱۶:۰۱ UTC) در نزدیکی روستاهای مشک آباد علیا و حسنلو سقوط کرد و متلاشی شد (شکل ۸). علت اصلی سانحه، شرایط نامساعد پروازی و واکنش نادرست خدمه به وضعیت پیش آمده اعلام شد. از عوامل مؤثر دیگر می‌توان به قدیمی بودن سیستم‌های هواپیما، نبود آموزش کافی و مناسب برای شرایط بد جوی و ضعف در هماهنگی بین خدمه اشاره کرد. در زمان سانحه، گزارش‌های متار هواشناسی نشان می‌داد که دید افقی تنها ۸۰۰ متر، دما صفر درجه و آسمان ابری همراه با بارش برف شدید بوده است.

### ۴-۳. بررسی تأثیر عامل کاهش دید بر سانحه هوانوردی در ایران

#### ۳-۴-۱. سانحه روز ۹ ژانویه ۲۰۱۱

#### الف: تحلیل سانحه براساس اطلاعات ایمنی پرواز (ASN)

در تاریخ یکشنبه ۹ ژانویه ۲۰۱۱ در ساعت ۱۴:۰۱ UTC، هواپیمای بوئینگ ۷۲۷-۲۸۶ با پرواز شماره ۲۷۷ شرکت ایران ایر و شماره ثبت EP-IRP از فرودگاه مهرآباد تهران به مقصد ارومیه پرواز کرد. این هواپیما که در سال ۱۹۷۴ ساخته شده بود، ۱۰۵ سرنشین داشت که متأسفانه در جریان سانحه ۷۸ نفر جان باختند و ۲۷ نفر نجات یافتند. این سانحه در مرحله‌ی تقرب (مرحله ۷ جدول ۱) و در فاصله‌ی ۱۵ کیلومتری جنوب شرقی فرودگاه ارومیه رخ داد و منجر به نابودی کامل هواپیما شد. هواپیما در ساعت ۱۸:۳۳ به وقت محلی (۱۵:۰۳ UTC) از تهران پرواز کرد و حدود یک ساعت بعد، در تماس با برج مراقبت فرودگاه ارومیه، اجازه‌ی انجام فرود صادر شد. در آن زمان، شرایط جوی نامناسب و دید بسیار محدود به علت بارش برف سنگین گزارش شده بود. در جریان نزدیک شدن به باند فرودگاه، هشدار کاهش سرعت فعال شد اما خدمه آن را برطرف نکردند. مدتی بعد،



شکل ۸. تصویر هواپیمای سانحه هوانوردی با عامل هواشناسی محدودیت دید در روز ۹ ژانویه ۲۰۱۱ (Aviation-safety.net)

موافق<sup>۱</sup> باشد. رطوبت نسبی در این ساعت در منطقه ارومیه به حدود ۹۵/۶ درصد رسیده که نشان‌دهنده درجه اشباع بالای جو و امکان تشکیل ابرهای انبوه پایین و مه است؛ مسئله‌ای که در گزارش‌های متار نیز با ذکر پوشش‌های ابری در ترازهای مختلف (SCT015، SCT020 و OVC060) و دید افقی بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ متر تأیید شده است. چنین شرایطی می‌تواند دید خلبان را در مرحله نزدیک شدن به باند به شدت محدود کند و تصمیم‌گیری او را با دشواری مواجه سازد. نقشه مربوط به بارش برف نیز وجود بارش برف پیوسته به مقدار ۰/۷ میلی‌متر در یک ساعت گذشته را در محدوده ارومیه نشان می‌دهد که با توجه به دمای نزدیک به صفر، به‌صورت برف سبک اما مداوم ظاهر شده و بر پوشش برفی سطح زمین و کاهش بیشتر دید تأثیر گذاشته است. در کنار این شرایط جوی، گزارش‌های سانحه نشان می‌دهد که هشدار کاهش سرعت در زمان نزدیک شدن به باند فعال شده و با توجه به احتمال تشکیل یخ در بخش‌هایی از هواپیما، عملکرد هواپیما دچار اختلال شده است. از کار افتادن دو موتور و عدم پاسخ‌دهی مناسب یکی از آن‌ها در ارتفاع پایین نیز می‌تواند پیامد مستقیم همین وضعیت باشد. بنابراین هرچند وجود دید کم عامل مستقیم وقوع این سانحه نبوده است اما موجب شد تا هواپیما شرایط مناسب برای نشستن بر روی باند را نداشته باشد و پس از اوج‌گیری برای انجام دوباره عملیات فرود، دچار سانحه شود. در مجموع شرایط جوی این روز مؤید یک محیط بسیار نامساعد پروازی شامل دید بسیار محدود در اثر

### ب: بررسی متغیرهای جوی مؤثر در روز سانحه

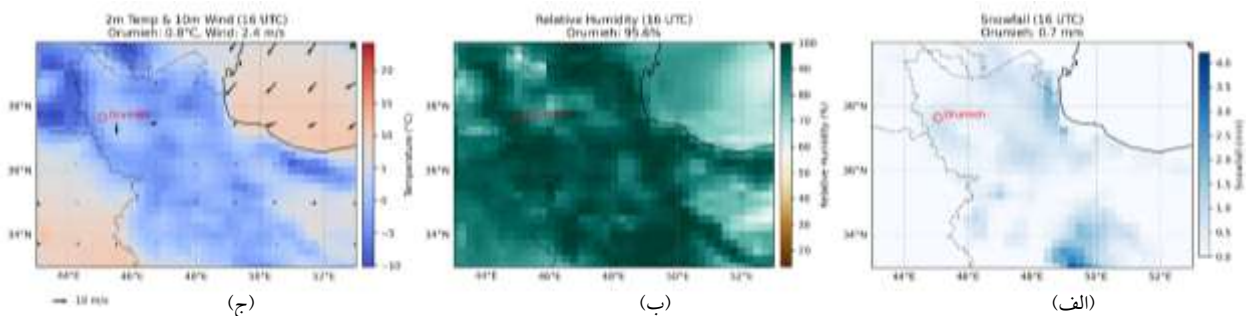
در تاریخ ۹ ژانویه ۲۰۱۱، گزارش‌های متار شرایط جوی بسیار نامساعدی را در فرودگاه ارومیه نشان می‌دهند. بارش برف و برف سنگین در بیشتر ساعات، همراه با تراکم ابرها در سطوح مختلف (SCT015، SCT020 و OVC060) کاهش شدید دید (بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ متر) ایجاد کرده است. بادهای ملایم (۲ تا ۳ متر بر ثانیه) و متغیر، به همراه دمای بین ۱- تا ۱+ درجه سلسیوس، احتمال یخ‌زدگی سطح باند و هواپیما را افزایش داده است. فشار هوانیز در حدود ۱۰۱۶ تا ۱۰۱۹ هکتوپاسکال متغیر بوده است. این شرایط خطرناک می‌تواند تأثیر زیادی بر پروازها و فرودها داشته باشد.

در زمان وقوع سانحه هوایی پرواز شماره ۲۷۷ ایران‌ایر در تاریخ ۹ ژانویه ۲۰۱۱، تحلیل شرایط جوی مجاورت سطح زمین مبتنی بر داده‌های ERA5 در ساعت ۱۶UTC (مطابق با زمان تقریبی سانحه) نشان‌دهنده شرایط جوی بسیار نامساعد در منطقه ارومیه است (شکل ۹). نقشه دما در ارتفاع ۲ متر و باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد که دما در محدوده فرودگاه ارومیه حدود ۰/۸ درجه سلسیوس و در آستانه انجماد قرار داشته است؛ وضعیتی که احتمال یخ‌زدگی سطح باند و همچنین تشکیل یخ روی سطوح هواپیما را افزایش می‌دهد. سرعت باد در حدود ۲/۴ متر بر ثانیه و با الگوی به نسبت متغیر بوده که اگرچه از نظر عددی ملایم است، اما در شرایط دید محدود و در مرحله حساس فرود می‌تواند خطرناک باشد، به‌ویژه اگر به‌صورت باد عرضی یا

<sup>۱</sup> Tailwind

در بروز این سانحه مرگبار موثر بوده است.

مه و بارش برف، وجود ابرهای پایین، رطوبت اشباع و دمای نزدیک به دمای انجماد است که در کنار عوامل فنی و انسانی



شکل ۹. الف) مقدار بارش برف در یک ساعت گذشته (برحسب میلی متر)، ب) رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری از سطح زمین (برحسب درصد)، ج) دما در ارتفاع دو متری از سطح زمین (برحسب درجه سلسیوس، نواحی سایه خورده رنگی) و بردار باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در ساعت ۱۶ UTC روز ۹ ژانویه ۲۰۱۱ همراه با سانحه هوانوردی ناشی از محدودیت دید

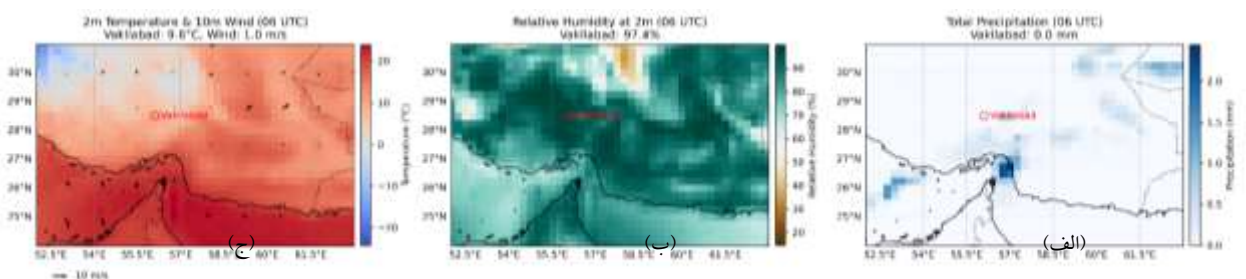
### ب: بررسی متغیرهای جوی مؤثر در روز سانحه

بر اساس بررسی نقشه‌های هواشناسی با استفاده از داده‌های ERA5 (شکل ۱۰)، در ساعت وقوع سانحه ۱۹ ژانویه ۲۰۲۲، وضعیت جوی در منطقه وکیل آباد نشان‌دهنده هوای نسبتاً گرم با دمای ۹/۶ درجه سلسیوس است. سرعت باد در این منطقه ۱ متر بر ثانیه بوده که حاکی از آرام بودن جو و نبود اختلاط قائم قوی است. رطوبت نسبی بسیار بالا (۹۷/۴٪) در این منطقه نشان‌دهنده اشباع بالای جو و احتمال تشکیل مه غلیظ است که می‌تواند موجب کاهش دید افقی شود. همچنین، با توجه به نبود بارندگی (صفر میلی متر)، این شرایط پایدار می‌تواند منجر به کاهش شدید دید و مشکلات در هوانوردی، به ویژه در فرود هواپیماها شود. این وضعیت مشابه شرایط جوی در برخی از سوانح هوایی گذشته است که کاهش دید به دلیل مه غلیظ در وقوع سوانح موثر بوده است.

### ۳-۴-۲. سانحه روز ۱۹ ژانویه ۲۰۲۲

#### الف: تحلیل سانحه براساس اطلاعات ایمنی پرواز (ASN)

در روز چهارشنبه ۱۹ ژانویه ۲۰۲۲، ساعت ۰۹:۰۰ به وقت محلی (۰۵:۳۰ UTC)، یک فروند هواپیمای سسنا B ۲۰۸ گرند کاراوان EX متعلق به شرکت ماهان‌ایر با شماره ثبت YV3033 دچار سانحه شد. در این پرواز ۱۸ نفر حضور داشتند که خوشبختانه هیچ کدام جان خود را از دست ندادند. با این حال، هواپیما دچار آسیب زیاد شد. این سانحه در نزدیکی روستای وکیل آباد، شهرستان ارزوئیه استان کرمان در مرحله فرود (مرحله ۸ جدول ۱) رخ داد. نوع پرواز نیز غیر برنامه‌ای، چارتر یا تاکسی هوایی بوده است. بر اساس گزارش‌ها، هواپیما به دلیل وضعیت نامساعد دید، مجبور به فرود اضطراری در زمین‌های کشاورزی شد.



شکل ۱۰. الف) مقدار بارش کل در یک ساعت گذشته (برحسب میلی متر)، ب) رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری از سطح زمین (برحسب درصد)، ج) دما در ارتفاع دو متری از سطح زمین (برحسب درجه سلسیوس، نواحی سایه خورده رنگی) و بردار باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در ساعت ۰۶ UTC روز ۱۹ ژانویه ۲۰۲۲ همراه با سانحه هوانوردی ناشی از محدودیت دید

### ۳-۵. بررسی تأثیر عامل باد عرضی بر سوانح هوانوردی در ایران

#### الف: تحلیل سانحه براساس اطلاعات ایمنی پرواز (ASN)

در روز یکشنبه ۱۹ ژوئن ۲۰۱۶، ساعت ۱۳:۳۵ به وقت محلی (UTC+۰۹:۰۵)، یک فروند هواپیمای British Aerospace BAe-146-300 متعلق به شرکت ماهان‌ایر با شماره ثبت EP-MOF دچار سانحه شد. این هواپیما در سال ۱۹۸۹ ساخته شده بود و موتور آن Lycoming ALF502R-5 بود. تعداد سرنشینان هواپیما ۸۹ نفر بود که هیچ‌کدام جان خود را از دست ندادند، اما هواپیما دچار آسیب قابل توجهی شد. هواپیما یک پرواز برنامه‌ای از فرودگاه اهواز به مقصد فرودگاه خارک در ایران انجام می‌داد. وضعیت جوی در زمان نزدیک به وقوع سانحه در فرودگاه خارک بدون محدودیت در دید و شرایط جوی گزارش شد و باد با جهت ۳۰۰ درجه و سرعت ۸ متربرثانیه می‌وزید. در فاصله ۱۸/۵ کیلومتر از فرودگاه خارک، خلبان از برج مراقبت درخواست بررسی شرایط باد کرد و باد ۵ متربرثانیه با جهت ۳۰۰ درجه گزارش شد. با توجه به محدودیت باد موافق ۸ متربرثانیه طبق دستورالعمل‌های پروازی، کاپیتان تصمیم گرفت که فرود روی باند ۱۳ امکان‌پذیر است. سپس درخواست فرود دیداری روی این باند داده شد و این درخواست تأیید شد (طبق جدول ۱ مرحله ۸). هواپیما از آستانه باند ۱۳ عبور کرده و چرخ‌های آن در حدود ۶۸۵ متر پس از ابتدای باند با زمین تماس پیدا کرد. طول کل باند فرودگاه خارک ۲۳۳۴ متر است. هواپیما نتوانست به اندازه کافی سرعت خود را کاهش دهد، بخشی از این مشکل به دلیل خرابی سیستم ضد لغزش و لغزش هواپیما روی زمین ناهموار بود. چرخ جلوی هواپیما خراب شد و هواپیما به دلیل ناتوانی در توقف کامل در محدوده باند، از انتهای باند ۱۳ عبور کرد و نهایتاً در فاصله ۵۴ متری خارج از انتهای باند و روی زمین ناهموار متوقف شد. علل اصلی سانحه تصمیم اشتباه خلبان برای فرود روی باند ۱۳ با وجود باد موافق قابل توجه، انجام فرودی ناپایدار که با پروفایل

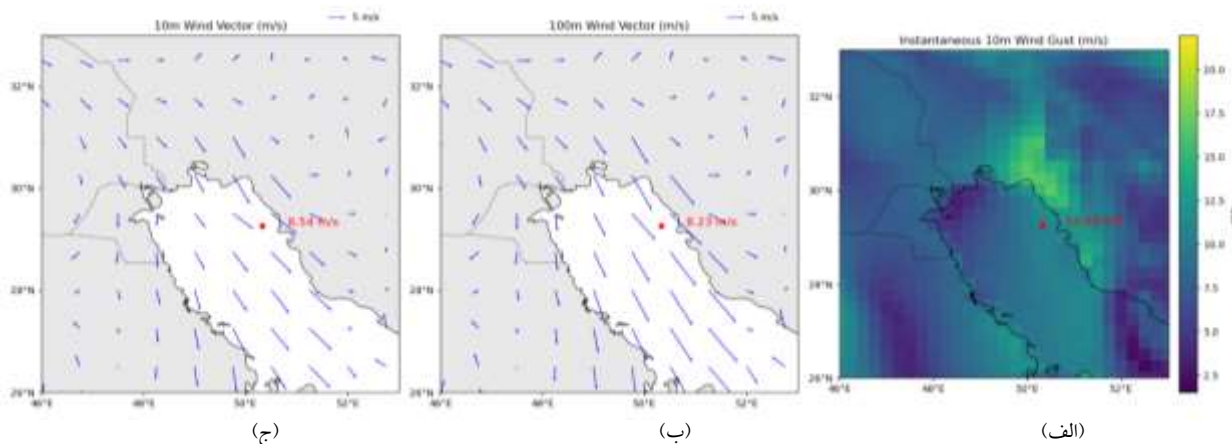
استاندارد پرواز مطابقت نداشت، ضعف در مدیریت کابین خلبان، قضاوت اشتباه و عدم انجام دور شدن در شرایط رویکرد ناپایدار و محاسبه نادرست سرعت فرود بدون توجه به تأثیر باد موافق شناخته شدند. همچنین در این سانحه خرابی سامانه ضد لغزش در چرخ‌های فرود سمت راست که باعث افزایش مسافت فرود شد، تغییرات ناگهانی شرایط باد در الگوی ترافیکی فرودگاه و تأخیر در فعال‌سازی ترمزها و بالابرها (به ویژه ترمزها) که با وجود باد موافق موجب افزایش مسافت فرود شد، جزو عوامل مؤثر بودند.

#### ب: بررسی متغیرهای جوی مؤثر در روز سانحه

در سانحه خروج از باند پرواز ۴۵۲۵ شرکت ماهان‌ایر در تاریخ ۱۹ ژوئن ۲۰۱۶ در فرودگاه خارک، ابتدا داده‌های متار نزدیک‌ترین زمان به سانحه (ساعت UTC+۰۹:۰۰ معادل ۱۳:۳۰ به وقت محلی) مورد بررسی قرار گرفت. در این گزارش، باد با جهت ۳۰۰ درجه و سرعت ۱۶ نات ثبت شده است. با توجه به جهت باند ۱۳ (حدود ۱۳۰ درجه)، محاسبه مؤلفه‌های باد نشان می‌دهد که مؤلفه باد موافق برابر با ۸/۰۸ متر بر ثانیه و مؤلفه عرضی حدود ۱/۴۲ متر بر ثانیه بوده است. این مقدار باد موافق، بالاتر از حد مجاز ۷/۷ متر بر ثانیه تعیین شده طبق مستندات سازنده هواپیما (FCOM) است و می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در افزایش طول باند مورد نیاز برای توقف هواپیما محسوب شود. در مرحله‌ی بعد، داده‌های بازتحلیل ERA5 برای بررسی ساختار قائم باد در زمان وقوع سانحه به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که در زمان نزدیک به فرود، تفاوت معناداری میان سرعت باد در ارتفاعات ۱۰ متر و ۱۰۰ متر وجود داشته است (شکل ۱۱). این اختلاف به معنای وجود چینش قائم باد در منطقه فرود است که می‌تواند باعث ناپایداری ناگهانی در سرعت افقی هواپیما در فاز نهایی تقرب شود. گزارش خلبان نیز افزایش ناگهانی سرعت به ۷۴/۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۹۱ متری را تأیید می‌کند که می‌تواند ناشی از همین چینش باشد. چنین تغییری در شرایط باد، کنترل پرواز و تخمین نقطه تماس با باند را دشوار کرده و منجر به افزایش فاصله مورد نیاز برای توقف

کاهش عملکرد سامانه‌های کاهش سرعت، ناپایداری در اجرای فرود و در نهایت خروج هواپیما از انتهای باند شده است. این رخداد ضرورت بازبینی محدودیت‌های باد موافق در فرودگاه‌هایی با باند کوتاه و ارتقای سامانه‌های هشداردهنده تغییرات باد در مرحله نهایی فرود را یادآور می‌شود.

شده است. همچنین مؤلفه عرضی باد در لحظه فرود (حدود ۱/۴ متر بر ثانیه) اگرچه در محدوده قابل کنترل توسط خلبان بوده، اما در صورت وجود نوسانات ناگهانی در الگوی باد، می‌تواند منجر به انحراف جزئی از محور باند و کاهش دقت در عملیات فرود شود. در مجموع، ترکیب سه عامل شامل باد موافق فراتر از حد مجاز، وجود چینش قائم مؤثر در لایه نزدیک سطح، و مؤلفه عرضی باد به‌طور هم‌زمان باعث



شکل ۱۱. شرایط باد در فرودگاه خارک در روز سانحه (۱۹ ژوئن ۲۰۱۶ ساعت ۹ UTC) برحسب متربرثانیه: الف) باد جستی لحظه‌ای در ارتفاع ۱۰ متری، ب) میدان برداری باد در ارتفاع ۱۰۰ متری، ج) میدان برداری باد در ارتفاع ۱۰ متری

#### ۴. نتیجه‌گیری

بررسی سانحه پرواز IR235 شرکت ایران‌ایر در شرایط هوای سرد نشان داد که عدم انجام عملیات ضدیخ‌پاشی، علیرغم وجود شرایط دمایی و رطوبت مناسب برای رخداد فرایند یخ‌زدگی، منجر به آلودگی و انباشت یخ بر روی سطوح بال و وقوع واماندگی در مرحله‌ی برخاست هواپیما شد. ترکیب عواملی همچون رطوبت بالا و رخداد مه، بارش برف سبک و دمای نزدیک به دمای انجماد شرایطی فراهم کرده بود که با توجه به امکان بروز یخ‌زدگی در اثر سرمایش آئروپوینامیکی بر روی بدنه هواپیما حین پرواز در سطوح پایین، انجام پرواز بدون اقدامات پیشگیرانه، با ریسک بالا همراه باشد. این یافته با نتایج سایر مطالعات از جمله برامفیلد و همکاران (۲۰۲۳) در خصوص کاهش عملکرد دم افقی در اثر یخ‌زدگی سازگار است که در آن مدل‌سازی پروازی نشان داده است کاهش کارایی سطوح کنترلی در اثر یخ‌زدگی می‌تواند به ناپایداری شدید و از دست رفتن کنترل هواپیما منجر شود. این موارد بر اهمیت نقش حیاتی تصمیم‌گیری صحیح عملیاتی در شرایط یخ‌زدگی تأکید دارند.

در این مقاله، سوانح و حوادث جدی هوایی و تأثیر عوامل جوی بر روی آنها، با انجام مطالعات موردی بر روی شش سانحه هوایی و یک حادثه جدی هوایی در ایران بر اساس عوامل جوی مختلف مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. این کار با استفاده از اطلاعات موجود در شبکه ایمنی هوانوردی (ASN)، گزارش‌های دیدبانی شده متارهای فرودگاهی و داده‌های شبکه‌ای بازتحلیل ERA5 انجام شده است. موارد مورد مطالعه شامل یخ‌زدگی، برخورد آذرخش، توفان تندری، محدودیت در دید افقی و بادهای عرضی هستند که هرکدام اثرات قابل توجهی بر ایمنی پروازها داشتند. تحلیل این داده‌ها در کنار نتایج حاصل از سایر مطالعات انجام یافته، اهمیت دیدبانی و پیش‌بینی دقیق شرایط جوی و استفاده از فناوری‌های نوین را برای کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده‌های مخاطره‌آمیز نشان می‌دهد.

تحلیل یک سانحه‌ی هوایی و یک حادثه‌ی جدی هوایی در ایران که به‌طور مستقیم تحت تأثیر برخورد آذرخش قرار گرفتند، نقش مهم این پدیده‌ی جوی را در تهدید ایمنی پرواز برجسته می‌سازد. در سانحه‌ی هوایی (پرواز نظامی C-130E در سال ۱۹۶۷)، برخورد آذرخش منجر به سقوط کامل هواپیما و مرگ تمامی سرنشینان آن شد. در حادثه‌ی جدی (پرواز فوکر ۱۰۰ شرکت ایران‌ایر در سال ۲۰۲۴)، اگرچه برخورد آذرخش باعث از کار افتادن چندین سامانه حیاتی هواپیما شد، اما خدمه با عملکرد صحیح توانستند آن را به سلامت در فرودگاه جایگزین به زمین بنشانند. در هر دو مورد شاخص دینامیکی  $CAPE \times P$  به‌عنوان شاخصی معتبر در تشخیص شرایط همرفتی با احتمال وقوع آذرخش، مقادیر بالایی را نشان داد که گزارش‌های متار و داده‌های آذرخش هم‌زمان با آن نیز رخداد ناپایداری‌های همرفتی مؤثر در منطقه را تأیید می‌کند. یافته‌های این پژوهش با نتایج سایر مطالعات (میلووانویچ و همکاران، ۲۰۲۲) هم‌راستا است که در آنها پیامدهای برخورد آذرخش شامل مرگ سرنشینان، آسیب به بدنه و سامانه‌های هواپیما، اختلال در ارتباطات رادیویی و حتی خاموشی موتور ذکر شده است. علاوه بر اینها، آذرخش می‌تواند هنگام سوخت‌گیری هواپیماها نیز منجر به وقوع آتش‌سوزی شود. بنابراین تأکید می‌شود این پدیده که معمولاً با فراوانی بالا رخ می‌دهد، می‌تواند ایمنی پرواز را به‌شدت تهدید کند. بنابراین توجه به پیش‌بینی، پایش و مدیریت مخاطرات ناشی از آذرخش در فرودگاه‌ها و مسیرهای پروازی اهمیت بسیار بالایی دارد. با به‌کارگیری سامانه‌های حفاظتی، ارتقاء آموزش خدمه و ارزیابی دقیق ریسک‌های مرتبط نیز می‌توان آمادگی صنعت هوانوردی را در برابر تخلیه‌های الکتریکی جوی افزایش داد.

در تاریخ ۸ مه ۲۰۰۹، هواپیمای توپولف Tu-154M در مسیر مشهد به تهران با شرایط شدید جوی و ابرهای کومه‌ای باران مواجه شد و پس از تحمل شتاب  $1/8 g$  و آسیب ناشی از تگرگ، به فرودگاه مشهد بازگشت. در این سانحه تصویر ماهواره‌ای ابرناکی و شاخص  $CAPE \times P$  با مقدار بالا در

حوالی مشهد نشان‌دهنده پتانسیل وقوع ناپایداری شدید و توسعه‌ی توفان تندری فعال در منطقه است. همچنین گزارش‌های متار وقوع آذرخش و حضور مداوم ابرهای CB را در ساعات منتهی به سانحه تأیید می‌کنند. مجموعه شواهد مذکور بیان‌گر تأثیر مستقیم پدیده‌های همرفتی شدید بر ایمنی پرواز در فضای هوایی ایران است. مطالعات اقلیمی بر روی اروپا (تاشارک و همکاران، ۲۰۲۰) نشان می‌دهد که توفان‌های تندری در تابستان شایع‌ترین مخاطره جوی هستند و با گرمایش جهانی روندی افزایشی دارند. با توجه به شرایط مشابه و افزایش دما در ایران، می‌توان انتظار داشت که این الگو در کشور ما نیز دیده شود. استفاده از شاخص‌های ناپایداری، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاهی ابزارهای مؤثری برای شناسایی و مدیریت این مخاطرات جوی در عملیات هوانوردی هستند. در این مطالعه همچنین به بررسی دو سانحه هوایی در ایران، پرواز شماره ۲۷۷ هواپیمایی شرکت ایران‌ایر در تاریخ ۹ ژانویه ۲۰۱۱ در فرودگاه ارومیه و پرواز متعلق به شرکت ماهان‌ایر در تاریخ ۱۹ ژانویه ۲۰۲۲ در فرودگاه مشهد پرداخته شده است. در هر دو سانحه، وضعیت جوی با شرایط کاهش دید افقی در اثر مه و ابرهای پایین همراه بوده که منجر به مشکلات جدی در فرود هواپیماها شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که شرایط جوی در هر دو سانحه موجب شده بودند که خلبانان نتوانند به درستی وضعیت باند را تشخیص دهند که در نهایت منجر به بروز سوانح و ایجاد خطرات جدی برای ایمنی این پروازها شد. مقایسه‌ی این نتایج با سایر مطالعات (کواسبیرسکا و همکاران، ۲۰۲۳) که بر تأثیر شرایط دید بر عملیات فرود در فرودگاه‌های مختلف تمرکز دارد، نشان می‌دهد که مشکل کاهش دید و ابرهای پایین نه تنها در ایران بلکه در سطح جهانی برای عملیات پرواز مخاطره‌آمیز است. کواسبیرسکا و همکاران (۲۰۲۳) همچنین به این نکته اشاره دارد که فرودگاه‌هایی با تجهیزات  $ILS^1$  ضعیف‌تر، بیشتر با مشکلات جوی مواجه می‌شوند و در صورت ارتقاء این تجهیزات،

<sup>1</sup> Instrument Landing System

February 8, 2018. *Iranian Geophysics Journal*, 17(4), 117-134.

3. (EN)Bolton, D. (1980). The computation of equivalent potential temperature. *Monthly weather review*, 108(7), 1046-1053.
4. (EN)Bromfield, M. A., Horri, N., Halvorsen, K., & Lande, K. (2023). Loss of control in flight accident case study: Icing-related tailplane stall. *The Aeronautical Journal*, 127(1315), 1554-1573.
5. (EN)Fisher, F. A., & Plumer, J. A. (1977). *Lightning protection of aircraft* (No. NASA-RP-1008). National Aeronautics and Space Administration.
6. (EN)Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 146(730), 1999-2049.
7. (EN)Hon, K. K., & Chan, P. W. (2022). Historical analysis (2001-2019) of low-level wind shear at the Hong Kong International Airport. *Meteorological applications*, 29(2), e2063.
8. (EN)Jarošová, M., & Janošková, A. (2023). Meteorological causes of air accidents. *Transportation research procedia*, 75, 183-188.
9. (EN)Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., ... & Morisette, J. T. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote sensing of Environment*, 83(1-2), 3-15.
10. (EN)Kwasiborska, A., Grabowski, M., Sedláčková, A. N., & Novák, A. (2023). The influence of visibility on the opportunity to perform flight operations with various categories of the instrument landing system. *Sensors*, 23(18), 7953.
11. (EN)Lester, P. F. (2007). *Aviation Weather* (4th ed.). Englewood, CO: Jeppesen Sanderson, Inc.
12. (EN)Lin, C., Zhang, K., Chen, X., Liang, S., Wu, J., & Zhang, W. (2021). Overview of low-level wind shear characteristics over Chinese mainland. *Atmosphere*, 12(5), 628.
13. (EN)Mazon, J., Rojas, J.I., Lozano, M., Pino, D., Prats, X., & Miglietta, M.M. (2018). Influence of meteorological phenomena on worldwide aircraft accidents,

می‌توانند میزان تأخیرها، تغییر مسیرهای ناگهانی به فرودگاه جایگزین و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهند.

تحلیل سانحه پرواز شماره ۴۵۲۵ شرکت ماهان‌ایر در تاریخ ۱۹ ژوئن ۲۰۱۶ در فرودگاه خارک، نشان داد که تصمیم خلبان برای فرود بر روی باند ۱۳ با وجود باد موافق برابر با ۸/۰۸ متر بر ثانیه که فراتر از حد مجاز (۷/۷ متر بر ثانیه) و باد عرضی حدود ۱/۴ متر بر ثانیه یکی از عوامل کلیدی در بروز سانحه بوده است. در کنار این مؤلفه‌ها، وجود چینش باد بین ارتفاعات ۱۰ تا ۱۰۰ متر و افزایش ناگهانی سرعت هواپیما در فاز نهایی فرود، بر ناپایداری پرواز افزوده و سبب ناتوانی در کاهش به‌موقع سرعت، لغزش روی باند و در نهایت خروج از باند شده است. در مقایسه با مطالعه‌ی آماری انجام‌شده (هون و چان، ۲۰۲۲) در فرودگاه بین‌المللی هنگ‌کنگ (HKIA)، که بیش از ۱۰۰۰۰ گزارش خلبان از چینش باد تراز پایین را تحلیل کرده، تأکید شده که بیشترین بروز پدیده برش قائم باد در سرعت‌های بالاتر از ۶ متر بر ثانیه و در جهات خاص باد زمینه‌ای اتفاق می‌افتد. در هر دو مطالعه، نقش کلیدی باد در فاز نهایی پرواز و وابستگی آن به جهت باد زمینه‌ای محل فرودگاه مورد تأیید قرار گرفته است. سانحه فرودگاه خارک به خوبی نشان می‌دهد که حتی در شرایطی که باد عرضی در محدوده کنترل خلبان باشد، نوسانات ناگهانی آن و ترکیب آن با باد موافق و چینش قائم باد می‌تواند ریسک سوانح را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. این موضوع ضرورت تدوین دستورالعمل‌های عملیاتی دقیق‌تر برای مواجهه با شرایط باد در باندهای با طول کوتاه و همچنین تقویت سامانه‌های پایش، پیش‌بینی و هشدار تغییرات باد، به ویژه در لحظه فرود، را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد.

## منابع

1. (FA)Ranjbar Saadat Abadi, A., Amozad Mahdiraji, T., & Pouryani, J. (2020). A case study of aircraft icing on various flight routes in Iran. *Aeronautical Engineering Scientific-Research Journal*, 15(2), 15-24.
2. (FA)Asadi, M., Memarian, M. H., & Moradian, F. (2023). Analysis of aviation factors in the Tehran-Yasuj aircraft crash on

- model. *Earth and Space Science*, 10(9), e2023EA003104.
19. (EN)Shestakova, A. A. (2021). Assessing the risks of vessel icing and aviation hazards during downslope windstorms in the Russian arctic. *Atmosphere*, 12(6), 760. Chicago
- Tippett, M. K., Lepore, C., Koshak, W. J., Chronis, T., & Vant-Hull, B. (2019). Performance of a simple reanalysis proxy for US cloud-to-ground lightning. *International Journal of Climatology*, 39(10), 3932–3946. <https://doi.org/10.1002/joc.6049>
20. (EN)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.
21. (EN)World Meteorological Organization (WMO). (2019). Manual on Codes – International Codes. Volume I.1: Annex II to the WMO Technical Regulations (WMO-No. 306, 2019 ed.). Geneva, Switzerland: WMO. Retrieved from <https://library.wmo.int/idurl/4/35713>
- 1967–2010. *Meteorological applications*, 25(2), pp.236-245.
14. (EN)Milovanović, M., Čokorilo, O., & Čokorilo, S. (2022). Analysis of the impact of lightning strikes on flight safety. *Int. J. Traffic Transp. Eng*, 12, 352-360.
15. (EN)Nita, I. A., Radu, C., Cheval, S., & Birsan, M. V. (2024). Aviation accidents related to atmospheric instability in the United States (2000–2020). *Theoretical and Applied Climatology*, 155(6), 5483-5497.
16. (EN)Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning: physics and effects*. Cambridge university press.
17. (EN)Roms, D. M., Charn, A. B., Holzworth, R. H., Lawrence, W. E., Molinari, J., & Vollaro, D. (2018). CAPE times P explains lightning over land but not the land-ocean contrast. *Geophysical Research Letters*, 45(22), 12623–12630. <https://doi.org/10.1029/2018gl1080267>
18. (EN)Saleh, N., Gharaylou, M., Farahani, M. M., & Alizadeh, O. (2023). Performance of lightning potential index, lightning threat index, and the product of CAPE and precipitation in the WRF