

Research Paper

Received: 23 October 2025

Revised: 24 November 2025

Accepted: 7 December 2025

Online Publication: 22 December 2025

Analysis of Trends in Climate Patterns of Temperature and Precipitation as Potential Factors Affecting Safety on Tehran-Uroumیه Flight Routes

Nafisehsadat Mehdizadeh¹, Reza Borna², Hossein Mohammadi³

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

2. Department of Geography, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran (Corresponding Author)
E-Mail: bornareza@iau.ac.ir

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

In the current century, the aviation industry plays a very important role in relations between different countries. Therefore, studying and identifying the damages caused by climate and weather conditions in the occurrence of air accidents is very important. Therefore, the present study was formed with the aim of investigating the temperature and precipitation trends of Tehran and Uroumیه airports and their role on safety on the Tehran-Uroumیه flight route. In this regard, the minimum temperature, maximum temperature and monthly, seasonal and annual precipitation data of Uroumیه and Tehran stations during the statistical period from 1959 to 2010 were used. The data trend was examined using the Mann-Kendall test. The statistical subsampling model (SDSM) was also used to predict the data under study. The results showed that climate changes in the region are evident; so that the trend of the minimum annual temperature and the summer, autumn and winter seasons in both stations was generally increasing, which indicates nighttime heating and has direct consequences on aviation risks. Fluctuations in the maximum temperatures of the stations also indicate changes in daily heating patterns that affect the thermal stability of the land surface. In contrast, the precipitation trend at the Urmia (summer) and Tehran (winter and summer) stations has been increasing. These results indicate a change in the humidity cycle of the studied stations, which can affect the increase in the probability of atmospheric phenomena related to humidity such as fog and limited visibility. More importantly, the analysis of the frost trend at both stations confirmed the increasing trend of this phenomenon. The evaluation of the SDSM model also confirms its effectiveness in simulating the averages. The practical results of the research emphasize that the significant increase in the frost occurrence trend, despite the overall warming and the increase in seasonal precipitation, requires more attention to the phenomenon of reduced visibility (fog) during landing and takeoff phases in order to ensure the safety of operations on the Tehran-Urmia flight route in the face of a changing climate.

Keywords: Uroumیه, Flight Safety, Precipitation, Tehran, Temperature, Frost.

Citation: Mehdizadeh, N.; Borna, R.; Mohammadi, H. (2025), Analysis of Trends in Climate Patterns of Temperature and Precipitation as Potential Factors Affecting Safety on Tehran-Uroumیه Flight Routes, *Geography and Environmental Studies*, 14 (56), 44-61. Doi: 10.71740/ges.2025.1225107

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



جغرافیا و مطالعات محیطی

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

شاپا الکترونیکی: 2345-5985

Sanad.iau.ir/journal/ges

Doi: 10.71740/ges.2025.1225107



مقاله پژوهشی

تحلیل روند الگوهای اقلیمی دما و بارش به عنوان عوامل بالقوه مؤثر بر ایمنی در مسیرهای پروازی تهران - ارومیه

نقیسه سادات مهدی زاده^۱، رضا برنا^۲، حسین محمدی^۳

۱. گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. گروه جغرافیا، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در قرن حاضر صنعت هوایی نقش بسیار مهمی را در روابط بین کشورهای مختلف ایفا می‌کند. لذا مطالعه و شناسایی آسیب‌های ناشی از اقلیم و شرایط آب و هوایی در بروز حوادث هوایی بسیار بااهمیت می‌باشد. از این رو پژوهش حاضر با هدف بررسی روند دما و بارش فرودگاه‌های تهران و ارومیه و نقش آن‌ها بر ایمنی در مسیر پروازی تهران - ارومیه شکل گرفته است. در این راستا از داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش ماهانه، فصلی و سالانه ایستگاه‌های ارومیه و تهران طی دوره آماری ۱۹۵۹ تا ۲۰۱۰ استفاده شد. روند داده‌ها با استفاده از آزمون من-کندال بررسی شد. از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) نیز برای پیش‌بینی داده‌های مورد مطالعه استفاده شد. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی در منطقه مشهود است؛ به‌طوری که روند دمای حداقل سالانه و فصول تابستان، پاییز، زمستان در هر دو ایستگاه عموماً افزایشی بوده که حاکی از گرمایش شبانه است و پیامدهای مستقیم بر مخاطرات هوانوردی دارد. نوسانات دمای حداکثر ایستگاه‌ها نیز نشان‌دهنده تغییر الگوهای گرمایش روزانه است که بر پایداری حرارتی سطح زمین تأثیر می‌گذارد. در مقابل، روند بارش در ایستگاه ارومیه (تابستان) و تهران (زمستان و تابستان) افزایشی بوده است. این نتایج نشان‌دهنده تغییر در چرخه رطوبت ایستگاه‌های مورد مطالعه است که می‌تواند بر افزایش احتمال وقوع پدیده‌های جوی مرتبط با رطوبت نظیر مه و دید محدود تأثیر بگذارد. مهم‌تر از آن، تحلیل روند یخبندان در هر دو ایستگاه روند افزایشی این پدیده را تأیید کرد. ارزیابی مدل SDSM نیز کارآمدی آن را در شبیه‌سازی میانگین‌ها تأیید می‌کند. نتایج کاربردی پژوهش بر این تأکید دارد که افزایش معنادار روند وقوع یخبندان، با وجود گرمایش کلی و افزایش بارش‌های فصلی نیاز به توجه بیشتر به پدیده کاهش دید (مه) در مراحل نشست و برخاست دارد تا ایمنی عملیات در مسیر پروازی تهران-ارومیه در مواجهه با اقلیم متغیر تضمین شود.

کلمات کلیدی: ارومیه، ایمنی پرواز، بارش، تهران، دما، یخبندان.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۸/۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۶

تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۱۰/۱

نویسنده مسئول: رضا برنا، تهران، دانشگاه علوم و تحقیقات، گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. bornareza@iau.ac.ir

نحوه ارجاع به مقاله:

مهدی‌زاده، نقیسه سادات؛ برنا، رضا؛ محمدی، حسین (۱۴۰۴)، تحلیل روند الگوهای اقلیمی دما و بارش به عنوان عوامل بالقوه مؤثر بر ایمنی در مسیرهای پروازی تهران - ارومیه، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۱۴ (۵۶)، ۶۱-۴۴. Doi: 10.71740/ges.2025.1225107

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granded to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open - access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



مقدمه

حمل و نقل هوایی به عنوان یکی از ایمن ترین و کارآمدترین روش های جابه جایی مسافر و بار در جهان شناخته می شود. با این حال، عملکرد و ایمنی این سیستم به شدت وابسته به شرایط جوی و اقلیمی حاکم بر مسیرهای پروازی است. پرواز موضوع بسیار با اهمیتی در سفرهای هوایی است چرا که بسیار پیش آمده که به دلیل بدی آب و هوا پروازی با تأخیر مواجه شده، کنسل شده و یا حتی حوادث ناگوارتری رخ داده است. رویدادهای آب و هوایی شدید یا غیرمنتظره می توانند منجر به تأخیر، لغو پرواز، یا در موارد بحرانی، حوادث ایمنی شوند. پروازهای بیشماری سالانه به خاطر شرایط بد آب و هوایی در فرودگاه های سراسر دنیا کنسل می شود. کنسل شدن این پرواز علاوه بر اینکه باعث سردرگمی مسافران آن پرواز می شود، خسارت های مالی زیادی را متحمل آژانس هواپیمایی می کند. تأثیر پارامترهای هواشناسی (مانند دید، تلاطم، پوشش ابری، و شرایط یخ زدگی) بر مراحل مختلف پرواز (برخاست، پرواز در ارتفاع کروز، و فرود) امری اثبات شده است. تغییرات بلندمدت اقلیمی، که اغلب به عنوان گرمایش جهانی شناخته می شوند، می توانند فرکانس و شدت این پدیده ها را در مناطق مختلف جغرافیایی تغییر دهند. اطلاع از شرایط آب و هوایی مناسب پرواز ایده ای است که باید به آن پرداخته شود. در واقع، کنسل پروازها به خاطر شرایط بد آب و هوایی کمتر اتفاق می افتد، زیرا این مساله از قبل پیش بینی است و همچنین به نوع امکاناتی که در فرودگاه مبدا و مقصد وجود دارد، بستگی دارد. برای مثال برف سنگین و نبود امکانات اولیه مناسب در فرودگاه مقصد، ممکن است پروازی کنسل شود اما در مبدا هیچ مشکلی وجود نداشته باشد (مهری، ۱۴۰۲). فرانک و همکاران (۲۰۰۱) اثر چینش قائم باد روی توسعه چرخندهای حاره ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که چرخندهای حاره ای در اثر چینش ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه به ترتیب در مدت ۳۶ و ۲۴ ساعت پس از شروع شبیه سازی تضعیف می شوند. کاربوسرو و همکاران (۲۰۰۲) چینش قائم باد را بر روی توسعه و شکل گیری چرخندهای حاره ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که عامل شکل گیری و توسعه این سامانه ها بیشتر در اثر چینش قائم باد در ترازهای پایین می باشد. بین و همکاران (۲۰۰۵) اثر چینش قائم باد بر روی توسعه چرخندهای حاره ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که چینش قائم باد بین دو تراز ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال نسبت به چینش قائم باد در ترازهای ۲۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال برای توسعه چرخندهای حاره ای از اهمیت بیشتری برخوردار می باشد. ژانگ و گو (۲۰۱۱) تغییرات زمانی ارتفاع یخ زنی را بررسی کردند. نتایج نشان داد همبستگی معناداری بین ارتفاع تراز یخ زنی و پوشش برف و یخچال های طبیعی وجود دارد. راپین و همکاران (۲۰۱۲) اثر چینش قائم باد را در ۳۴۹ مورد چرخند زائی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در بیشتر موارد این کمیت نقش عمده ای بر عهده دارد. کائو و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی یخ زدگی هواپیما را به عنوان تهدیدی مداوم برای ایمنی هوانوردی بررسی کردند. آنها مروری جامع بر تحقیقات گذشته در مورد یخ زدگی هواپیما انجام دادند. علل، انواع، شدت و پارامترهای طبیعی یخ زدگی هواپیما معرفی کردند. سپس، اثرات مختلف تجمع یخ بر عملکرد آیرودینامیکی، پایداری، کنترل پذیری هواپیما و همچنین روش های تخمین موجود تجزیه و تحلیل کردند و مجموعه ای از حوادث پرواز هواپیما ناشی از یخ زدگی در سال های اخیر بررسی کردند. بولگیانی و همکاران (۲۰۱۸) حادثه یخ زدگی هواپیما در نزدیکی فرودگاه بین المللی آدولفو سوارز مادرید-باراخاس را بررسی کردند. در ارتفاع یخ زدگی هواپیما، آب مایع فوق سرد مرتبط با ابرهای اوروگرافی و امواج کوه شبیه سازی کردند. نتایج، استفاده از مدل های میان مقیاس و اطلاعات پیش بینی جریان MSG را برای به حداقل رساندن خطرات هوانوردی مرتبط با چنین پدیده های هواشناسی تشویق می کند. کائو و همکاران (۲۰۲۰) اثرات یخ زدگی بر مشخصات آیرودینامیکی طولی هواپیما را بررسی کردند. برای مطالعه اثرات تجمع یخ بر ویژگی های آیرودینامیکی طولی یک هواپیما، یک روش دو بخشی برای پیش بینی مشتقات آیرودینامیکی طولی هواپیمای یخ زده پیشنهاد دادند. علاوه بر این، مشتقات آیرودینامیکی طولی هواپیمای یخ زده محاسبه شده است. مقایسه این نتایج نشان می دهد که روش پیش بینی صحیح و دقیق است و می توان از آن برای محاسبه اثرات یخ زدگی بر

پارامترهای آیرودینامیکی طولی هواپیما استفاده کرد. گه و همکاران (۲۰۲۲) اندازه‌گیری یخ‌زدگی جوی و تشخیص آنالین نوع یخ برای هواپیما با استفاده از حسگر فیبر نوری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین را بررسی کردند. نتایج تحلیل المان محدود، ویژگی‌های پاسخ حسگر برای انواع مختلف یخ و پتانسیل تشخیص نوع یخ در زمان واقعی با استفاده از حسگر فیبر نوری را نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به دقت تشخیص نوع یخ ۹۲.۸٪ و RMSE 0.27 میلی‌متر برای اندازه‌گیری ضخامت یخ دست می‌یابد. بروثرون و همکاران (۲۰۲۵) اثر آیرودینامیکی اشکال یخ مصنوعی را بررسی کردند. سناریوهای یخ‌زدگی واقع‌گرایانه برای تعریف پیکربندی شکل یخ برای آزمایش آیرودینامیکی تجزیه و تحلیل شدند. داده‌های جمع‌آوری شده برای مدل یخ‌زده نشان‌دهنده اولین مستندات عمومی از اثرات عملکرد هواپیمای یخ‌زده در عدد رینولدز پرواز است. طبق نتایج بدست آمده کمپین‌های آزمایشی آینده باید پیکربندی‌های یخ مصنوعی بیشتری را در نظر بگیرند تا حساسیت به موقعیت مکانی در جهت دهانه و تغییرات در عدد ماخ را که نشان‌دهنده سرعت‌های تقرب و فرود واقع‌بینانه هستند، بهتر درک کنند. جهانبخش (۱۳۸۱) تاثیر دما و یخبندان ایستگاه میانه را در ارتباط با اقلیم فرودگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد منطقه دارای تابستان‌های گرم و زمستان‌های خیلی سرد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد تاریخ شروع یخبندان در میانه از ماه اکتبر بوده و در ماه ژانویه به حداکثر خود می‌رسد. با استفاده از دماهای میانگین متوسط روزانه و میانگین حداکثر روزانه، درجه حرارت مرجع فرودگاه تعیین گردیده و تصحیحات مربوط به طول پایه باند پرواز برای هر رده فرودگاه انجام شده است. صلاحی و محمدی (۱۳۹۰) تأثیر عناصر اقلیمی دما، نقطه شبنم، رطوبت نسبی، سرعت باد و ابرناکی را بر پرواز هواپیماها بررسی کردند و مناسب‌ترین ساعات پرواز را ارائه دادند. تاج‌بخش و همکاران (۱۳۹۱) شرایط یخ‌زدگی هواپیما در فرودگاه مهرآباد تهران را بررسی کردند. نتایج نشان داد دما، رطوبت و سرعت قائم در پیش‌بینی یخ‌زدگی بسیار موثر می‌باشند. مقادیر عددی به‌دست‌آمده در این بررسی نشان داد تفاضل نقطه شبنم کمتر از 3°C ، دمای بین 10°C - تا صفر، سرعت قائم صعودی با بزرگی 0.2 ، رطوبت نسبی بیش از ۷۰٪ در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، براساس خروجی‌های مدل منطقه‌ای MM5، با مقادیر آستانه‌ای تحقیقات دیگر، می‌توانند درحکم شاخص‌های عددی مناسبی در حدس‌های اولیه برای یخ‌زدگی هواپیما در ایستگاه مهرآباد تهران مورد استفاده قرار گیرند. مرادی و همکاران (۱۳۹۱) چینش سطوح قائم باد سطوح پایین فرودگاه مهرآباد را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در ماه ژانویه چینش قائم باد سطوح پایین غیر همرفتی در اثر عبور جبهه‌های جوی و وارونگی دما ایجاد شده است. چینش قائم باد سطوح پایین در این ماه در ایستگاه مهرآباد، در لایه‌های مختلفی رخ داده است و فراوانی چینش قائم باد ضعیف در این ماه بیشتر می‌باشد. دبیری (۱۳۹۱) رابطه بین جو ایمنی سازمانی و ایمنی هوانوردی در فرودگاه مهرآباد تهران را بررسی نمود. نتایج تحلیل نشان‌دهنده آن هستند که رابطه بین ۴ بعد جو ایمنی سازمانی (حمایت مدیریت ارشد، وجود سیستم‌های گزارش‌دهی، تعهد سازمانی کارکنان و سیستم مسئولیت و اختیار) مثبت و معنی‌دار می‌باشد. همچنین نتایج آزمون t گروه‌های مستقل نشان داد که بین زنان و مردان تفاوت معنی داری در رعایت استانداردهای ایمنی (ایمنی هوانوردی) وجود ندارد. هاروطونیان (۱۳۹۲) رابطه بین نم نسبی و کمبود اشباع در هوای مرطوب در سطح زمین در دوره پنج ساله (۱۳۸۲-۱۳۸۶) در ایستگاه‌های مهرآباد و شمال تهران را بررسی کردند. نتایج نشان داد به ازای هر ۵/۱۸ درصد کاهش نم نسبی، یک درجه سانتی گراد کاهش در دمای نقطه شبنم و نیز یک درجه سانتی گراد افزایش کمبود اشباع رخ می‌دهد. خلیل نژاد و همکاران (۱۳۹۹) اثرات تغییر اقلیم بر ضریب استفاده از باند فرودگاه زاهدان را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰، ضریب استفاده از باند فعلی این فرودگاه در دو سناریوی RCp 2.6 و RCp 4.5 به ترتیب با ۲/۹۹٪ و ۳/۰۱٪ افزایش مواجه شده و به بیش از ۹۸/۰۱٪ می‌رسد. در حالی که ضریب مزبور در RCp 8.5 با ۱/۸٪ کاهش مواجه شده و برابر با ۹۳/۲۲٪ می‌شود که از حداقل ضریب استفاده از باند (۹۵٪)، کمتر است. بنابراین بر اساس سناریو RCp 8.5 در فرودگاه زاهدان جهت تامین حداقل ضریب استفاده از باند، نیاز به احداث باند دیگری منطبق با جهت باد نائب

غالب شناسایی شده در این سناریو (۱۳۵ درجه) وجود دارد. خان سالاری (۱۳۹۹) تغییرات اقلیمی ارتفاع تراز یخ زنی و تحلیل همدیدی آن در فرودگاه‌های مهرآباد، مشهد و کرمانشاه را بررسی کرد. نتایج نشان داد تغییرات تراز یخبندان در فرودگاه‌های منتخب کشور، در ماه‌ها، فصل‌ها و سال‌های مختلف با استفاده از آزمون من کندال، روند صعودی و یا نزولی را نشان نمی‌دهد. به عبارت دیگر تغییرات ماهانه و فصلی ارتفاع این تراز در ایستگاه‌های بررسی شده در سال‌های مختلف وابسته به تغییرات اقلیم نمی‌باشد. بررسی‌های همدیدی، بیان گر این مطلب است که تغییرات ارتفاع این تراز در سال‌های مختلف وابسته به سامانه‌های جوی عبوری و شرایط همدیدی ماه یا فصل مربوطه است. سقایی (۱۴۰۰) مشکلات حاکم بر صنعت حمل و نقل هوایی ایران (مطالعه موردی فرودگاه مهرآباد) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مهمترین مشکلات فرودگاه بین المللی مهرآباد، نزدیکی به مناطق مسکونی، ایجاد آلودگی صوتی برای ساکنان همجوار فرودگاه، همجواری با فرودگاه نظامی، نداشتن فاصله مناسب با سایر فرودگاه‌ها و مبدا قرار گرفتن فرودگاه مهرآباد در پروازهای داخلی در شبکه پروازی کشور، که در مجموع ۷۹/۸۳ درصد از واریانس مشترک را توجیه می‌کند و سایر متغیرها نتوانسته‌اند واریانس قابل توجهی را توجیه نمایند. شمس (۱۴۰۱) کاهش تاثیر اغتشاشات جوی بر ناوبری هواپیماهای غیرنظامی توسط اینترنت اشیا را بررسی کرد. وی تکنیک‌هایی را برای شناسایی و اجتناب از اغتشاشات اتمسفری ناشی از هوای پاک، که نوع خاصی از تلاطم و توربولانس است را، بر اساس چارچوب اینترنت اشیا هواپیما بررسی شد. تست‌های شتاب و ژيروسکوپ بر روی پرواز از فرودگاه مهرآباد تهران به فرودگاه بندرعباس با دو نوع هواپیمای متفاوت انجام شد و داده‌های جمع‌آوری شده از سنسورها منتشر شده و پیغام هشدار به منظور جلوگیری از ورود بیش از یک پرواز به منطقه‌ی متلاطم ارسال شده است. مهری (۱۴۰۱) اثر سوانح طبیعی بر صنعت هوانوردی (مطالعه موردی فرودگاه امام) را بررسی کرد. وی پدیده‌های هواشناسی که سبب کاهش دید می‌شوند را بررسی و سپس آستانه مخاطره بودن این پدیده‌ها را با استفاده از داده‌های ایستگاه فرودگاهی در بازه زمانی سالیانه، ماهیانه، فصلی و ساعتی مشخص کرد. در نهایت زمان‌های مخاطره آمیز برای حمل و نقل هوایی فرودگاه از لحاظ کاهش دید تشریح کرد. مظفری پور (۱۴۰۱) تاثیر تغییرات آب و هوا بر عملیات فرودگاهی را بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش پیش‌بینی شده در حداکثر دمای روزانه از ۴ درجه سانتیگراد تا ۱۰ درجه سانتیگراد، روزهای محدودیت وزن را برای برخی از فرودگاه‌های مورد مطالعه افزایش می‌دهد. خدام و نوری (۱۴۰۳) فرودگاه‌های پرخطر ایران از نظر قرارگیری در معرض رخدادهای گردو خاک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در فصل بهار، فرودگاه‌های زابل، قشم، زاهدان، شیراز، یزد، در فصل تابستان فرودگاه‌های زابل، بجنورد، زاهدان، بیرجند، پیام، قشم، در پاییز فرودگاه‌های زابل، اردبیل، بندرعباس و در زمستان فرودگاه‌های زابل، زاهدان و بیرجند تحت تأثیر رخدادهای نسبتاً شدید گردو خاک قرار دارند. این رخدادهای علاوه بر احتمال اختلال در پرواز، موجب آسیب به بدنه و موتور هواپیماها نیز می‌شوند. بررسی جهت باد غالب در ایستگاه‌های همدیدی نشان می‌دهد که بادهای شمالی و شمال غربی در زابل و زاهدان و بادهای جنوب غربی در قشم و بادهای شمالی غربی در بجنورد گردو خاک را از چشمه‌های فعال گردو خاک مجاور به این مناطق منتقل می‌کنند.

جایگاه و نقش هواشناسی و تأثیر آن بر شرایط پروازی در ابعاد مختلف سیاسی، اقتصادی و اجتماعی جوامع امروزی بر کسی پوشیده نیست. آب و هوا تأثیر کاملی بر کارایی عملیات و امنیت حمل و نقل هوایی در خلال پرواز دارد. این موضوع به پیش‌بینی صحیح و برنامه ریزی درست پروازها بستگی دارد. مسیر هوایی تهران - ارومیه یکی از مسیرهای حیاتی در شبکه حمل و نقل هوایی کشور است که منطقه مرکزی ایران را به قطب شمال غرب متصل می‌سازد. این مسیر از مناطق کوهستانی البرز و زاگرس عبور می‌کند و تحت تأثیر سامانه‌های جوی متنوعی قرار دارد. تغییرات اقلیمی در منطقه غرب کشور، به ویژه در ناحیه فرودگاهی ارومیه، می‌تواند به طور مستقیم بر عملیات فرود و برخاست تأثیر بگذارد. اغلب تحقیقات هوانوردی بر پیش‌بینی کوتاه مدت آب و هوا یا تأثیر رویدادهای شدید متمرکز هستند. با این حال، در مورد تأثیر روندهای اقلیمی بلندمدت بر زیرساخت‌ها و برنامه‌ریزی‌های

عملیاتی در مسیرهای خاص، مانند تهران - ارومیه، نیاز به تحلیل‌های دقیق و مستند مبتنی بر داده‌های سری زمانی تاریخی احساس می‌شود. این پژوهش با تمرکز بر تحلیل کمی روند تغییرات دما و بارش در ارومیه، به دنبال پر کردن این شکاف است.

مبانی نظری

ایمنی در حمل و نقل پرواز:

ایمنی در حمل و نقل هوایی بین‌المللی، یکی از حیاتی‌ترین و پرتحرک‌ترین حوزه‌های صنعت جهان است که نقل و انتقال افراد و محمولات به سراسر جهان را فراهم می‌کند. این حوزه با گسترده شدن تجارت جهانی و افزایش نیاز به اتصالات بین‌المللی، نقش بسزایی در تسهیل ارتباطات و تبادلات اقتصادی ایفا می‌کند. با این حال، در کنار این پویایی و رشد، ایمنی در حمل و نقل هوایی بین‌المللی به عنوان یک ابعاد بحرانی و حیاتی این صنعت، به ویژه توجه ویژه‌ای به خود جلب کرده است. ایمنی در حمل و نقل هوایی نه تنها به حفظ سلامت و ایمنی مسافران و کارکنان این حوزه اختصاص دارد، بلکه در تأمین حفاظت از دارایی‌ها و تسهیل تجارت بین‌المللی نیز نقش کلانی دارد. این اهمیت بر اساس استانداردهای بین‌المللی و نظام‌های پیشرفته فنی و فرآیندی برای پیشگیری از حوادث و حفظ اعتماد عمومی به صورت مداوم تقویت می‌شود. در این راستا، مفهوم ایمنی در حمل و نقل هوایی بین‌المللی یک چالش فراتر از مرزها و یک نیاز در راستای پیشرفت پایدار این صنعت به‌شمار می‌آید (آرمن، ۱۳۹۱).

اثر شرایط آب و هوایی بر ایمنی پروازها

رکن اساسی حمل و نقل در تمامی اشکال و مدل‌های آن ایمنی و بی‌خطری است، چرا که بدون آن هرگونه تلاش و اقدامی با شکست رو به رو شده و نیل به ارائه خدمات حمل و نقل محقق نخواهند شد. امروزه هواپیما نقش بسیار عمده‌ای در صنعت حمل و نقل ایفا می‌کند. پیشرفت روزافزون این صنعت در جهان موجب شده است تا هواپیماهای نسل جدید با ارائه خدمات مناسب‌تر، آسایش، ایمنی و کارآمدی بیشتر، مورد توجه قرار گیرند. اولین نیاز مبرم در صنعت هوانوردی، کیفیت امنیت آن می‌باشد. اطلاعات دقیق هواشناسی در تضمین این امنیت نقش اساسی ایفا می‌کند. داده‌های دقیق و منظم سامانه‌های هواشناسی فرودگاهی با به حداقل رساندن اثرات نامطلوب شرایط بد آب و هوایی که گاه باعث اختلال در صنعت هوانوردی و به تبع آن زبان‌های مالی و گاهی جانی می‌شود، نقش مهمی در عملیات هوانوردی به ویژه هنگام نشست و برخاست هواپیماها ایفا می‌کند (براتی و منتظرالظهور، ۱۳۹۲). صعود و فرود هواپیماها در پایانه‌ها و نیز حرکت هرگونه هواپیمایی در آسمان بدون در دست بودن اطلاعات جوی اعم از اطلاعات به موقع و نیز پیش‌بینی هوایی مسیر پرواز فرودگاه‌ها عملاً غیرممکن بوده و در دسترس نبودن این اطلاعات می‌تواند به سوانح هوایی منجر شود. برخی از مهمترین پدیده‌های جوی که می‌توانند شرایط سلامت پرواز را به خطر بیندازند مواردی مانند یخ‌زدگی هواپیما، تلاطم، مه، گردوغبار، توفان‌های شن و ماسه، توفان‌های تندری و تگرگ می‌باشند، که این پدیده‌های جوی باعث کاهش دید می‌شوند که یکی از اصلی‌ترین علل لغو یا تأخیر پروازها می‌باشد (حسینی و عطایی، ۱۳۹۵).

یخ زدگی

یخ زدگی از جمله پدیده‌های جوی مخاطره آمیز و تاثیرگذار بر هواپیما است و می‌تواند ایمنی و کارایی پرواز را به شدت به خطر اندازد. این پدیده به ویژه برای وسایل پرنده‌ای که به ابزارهای ضد یخ و یخ زدا مجهز نیستند از مهمترین مخاطرات است (تاج بخش و همکاران، ۱۳۹۱). یخ در اثر انجماد قطره‌های کوچک آب سرد روی هواپیما تشکیل شده و همچنین در فرآیند رسوب‌گذاری که طی آن بخار آب به کریستال‌های یخی تبدیل می‌شود نیز ایجاد می‌گردد. یخ زدگی هنگام پرواز در ابر و یا در

تحلیل روند الگوهای اقلیمی دما و بارش به عنوان عوامل بالقوه مؤثر بر ایمنی در مسیرهای پروازی تهران - ارومیه / نفیسه سادات مهدی زاده و دیگران
 هوای صاف می تواند رخ دهد. این عمل تحت شرایط خاص در فضای باز بر روی هواپیمای پارک شده روی زمین نیز اتفاق می افتد. خطرات ناشی از تشکیل یخ روی بدنه هواپیما از افزایش وزن و از تغییر خواص آئرو دینامیکی هواپیما در پرواز سرچشمه می گیرد (سمندر، ۱۳۹۶).

داده ها و روش ها

فرودگاه بین المللی مهرآباد، یکی از بزرگ ترین فرودگاه های ایران است که در سال ۱۳۱۷ در غرب شهر تهران ساخته شد. فرودگاه بین المللی امام خمینی واقع در شهرستان ری در جنوب استان تهران (۲۵ کیلومتری شهر تهران)، در مسیر آزادراه تهران-قم و در یک محدوده ۱۴ هزار هکتاری قرار دارد. فرودگاه همدان در شمال غرب ایران و در شمال شهر ارومیه است که در فاصله پانزده کیلومتری مرکز این شهر قرار دارد. این فرودگاه در زمینی به مساحت ۳۴۳ هکتار ساخته شده و ارتفاعش از سطح دریا ۱۳۲۴ متر است. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی فرودگاه تهران، ارومیه و مسیر هوایی آن نشان داده شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی فرودگاه های تهران و ارومیه

این پژوهش با هدف شناسایی و ارزیابی الگوهای اقلیمی غالب بر مسیر پروازی تهران - ارومیه، بر مبنای تحلیل داده های تاریخی و پیش بینی های آتی استوار است. رویکرد پژوهش، ترکیبی از تحلیل های سری زمانی و آزمون های ناپارامتریک است تا اثر بالقوه متغیرهای دما و بارش بر ریسک های عملیاتی پرواز مشخص شود. داده های مورد استفاده شامل متغیرهای دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش در قالب داده های ماهانه و فصلی برای دو ایستگاه کلیدی تهران و ارومیه بوده است. دوره آماری اصلی این تحلیل ها بازه ۱۹۵۹ تا ۲۰۰۶ میلادی را پوشش می دهد. علاوه بر این، برای ارزیابی روندهای آتی، از داده های سناریویی پیش بینی شده برای دوره ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ استفاده شد تا امکان پیش بینی ریسک هایی نظیر طوفان های یخبندان در دهه های آینده ارزیابی گردد. گام نخست در تحلیل داده ها، بررسی وجود و معناداری روندها در سری های زمانی دما و بارش بود که این امر با به کارگیری آزمون آماری من-کندال انجام پذیرفت. برای سری هایی که وجود روند معنادار در آنها تأیید شد، میزان تغییرات و جهش های ناگهانی با

استفاده از روش رگرسیون خطی محاسبه شد. مقدار تغییرات از طریق محاسبه تفاوت بین مقدار پیش‌بینی شده در اولین و آخرین نقطه روی خط رگرسیون تعیین گردید. همبستگی زمانی بین متغیرهای وابسته و متغیر مستقل با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد. برای کشف و تأیید معناداری نقاط تغییر ناگهانی در سری‌های داده، مجموعه‌ای از چهار آزمون در محیط نرم‌افزار SPSS مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، فرض اساسی نرمالیت توزیع داده‌ها بررسی شد. در صورت برقراری فرض نرمالیت، از آزمون T-استیودنت برای سری‌هایی که به دو بخش مستقل تقسیم می‌شدند و از تحلیل واریانس (آزمون F) برای سری‌هایی با چند جهش قابل تفکیک استفاده شد. در صورت عدم برقراری فرض نرمالیت، از آزمون‌های ناپارامتریک متناظر، شامل آزمون من-ویننی برای یک جهش و آزمون کروسکال-والیس برای چندین جهش، بهره گرفته شد. در نهایت، به منظور شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی در مقیاس ریز و انجام پیش‌بینی‌های بلندمدت مربوط به پدیده‌های یخبندان، از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری نمایی (SDSM) استفاده به عمل آمد.

آزمون من - کندال

این آزمون ابتدا توسط من (۱۹۴۵) ارایه و سپس توسط کندال (۱۹۷۵) بسط و توسعه یافت (سرانو^۱، ۱۹۹۹). آزمون من کندال جزء متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ناپارامتریک تحلیل روند سری‌های زمانی به شمار می‌رود و با استفاده از روش من - کندال تغییرات روند داده‌ها شناسایی می‌شود. این روش به گونه گسترده و متداولی در تحلیل روند سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی بکار می‌رود (پاسکینی^۲ و همکاران، ۲۰۰۶).

مدل ریزمقیاس گردانی SDSM

مدل SDSM یک مدل رگرسیونی چندمتغیره برای تولید داده‌های آب و هوایی به وسیله تکنیک‌های ریزمقیاس سازی آماری است (ویلک و همکاران، ۱۹۹۲) که در سال ۲۰۰۲ در انگلستان تهیه شده است. اساس آن استفاده از ترکیبی از روش‌های رگرسیونی و تولید داده‌های آب و هوایی مصنوعی برای کوچک مقیاس سازی می‌باشد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۴). یکی از ابزارهای ریزمقیاس نمایی آماری SDSM است که برای ارزیابی اثرات محلی تغییر اقلیم توسعه داده شد (حمیدیان پور و همکاران، ۱۴۰۰). این مدل که هسته اصلی آن تلفیقی از روش‌های تصادفی و همبستگی می‌باشد با هدف تبیین حداکثری تغییرپذیری اقلیم محلی یک ایستگاه از تأثیرگذارترین متغیرهای بزرگ مقیاس طراحی شده است. ورودی این مدل داده‌های دیده بانی روزانه ایستگاه، متغیرهای بزرگ مقیاس NCEP در دوره مشابه دیده‌بانی و برون‌داد متغیرهای بزرگ مقیاس مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای انتشار گوناگون برای دوره مطالعاتی آینده می‌باشد (عساکره و شادمان، ۱۳۹۷).

یافته‌های تحقیق

بر اساس نتایج آزمون من-کندال اعمال شده بر سری‌های زمانی دمای حداقل ایستگاه‌های تهران و ارومیه (جدول ۱)، شواهد مستدلی از افزایش دمای حداقل در دوره مورد بررسی به دست آمد. در مقیاس سالیانه، هر دو ایستگاه تهران و ارومیه روند افزایشی معناداری را در پارامتر دمای حداقل نشان دادند. این افزایش نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در فراوانی و شدت شب‌های یخبندان و سرد در طول سالیان مورد مطالعه در هر دو منطقه است. تحلیل تفکیک‌شده بر اساس فصول، الگوی قاطع و همسویی را در هر دو ایستگاه آشکار ساخت. نتایج نشان داد که روند افزایشی در دمای حداقل در تمامی فصول (زمستان، بهار، تابستان و پاییز) برای هر دو ایستگاه تهران و ارومیه مشاهده شده است. مشاهده روند افزایشی در دمای حداقل در فصل زمستان (سردترین فصل سال) از

¹ Serrano

² Pasquini

اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این امر نشان می‌دهد گرمایش جهانی بر حداقل دما در شرایطی که انتظار سردترین شرایط محیطی می‌رود، غلبه کرده است. این همسویی در روند افزایشی در تمام فصول، حاکی از یک تغییر اقلیمی قوی و پایدار در پارامتر دمای حداقل در هر دو ایستگاه مورد مطالعه است. همانطور که در تحلیل‌های اولیه ذکر شد، اگرچه سری‌های فصلی تصویر کلی و قوی‌ای ارائه می‌دهند، بررسی جزئیات سری‌های ماهیانه، اهمیت روش شناختی بالایی دارد. در مواردی مشاهده شد که یک ماه خاص با افزایش شدید دمای حداقل، تأثیر شگرفی بر معنادار شدن نتیجه کلی فصل داشته است، در حالی که سایر ماه‌های همان فصل ممکن است روند افزایشی ضعیف‌تری داشته باشند. لذا، اکتفا صرف به نتایج فصلی و سالانه، می‌تواند از عمق کاربردی نتایج بکاهد و توصیه‌های مدیریتی دقیق را با چالش مواجه سازد.

جدول (۱): نتایج آزمون من - کندال دمای حداقل سالانه و فصلی ایستگاه‌های مورد مطالعه

مقادیر بحرانی	سالانه	پائیز	تابستان	بهار	زمستان	ایستگاه
۰/۱۹۷	۰/۳۷۶*	۰/۴۰۶*	۰/۴۲۴*	۰/۰۲۴	۰/۰۶۳*	تهران
۰/۳۰۸	۰/۶۵۷*	۰/۵۷۱*	۰/۳۱۴*	۰/۲۷۶	۰/۵۴۲*	ارومیه

تحلیل روند دمای حداقل ایستگاه‌های تهران و ارومیه در سه سطح زمانی (سالانه، فصلی و ماهانه) انجام و نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. همانطور که در بخش مرور کلی گزارش شد، نتایج آزمون من - کندال در مقیاس سالانه و فصلی برای هر دو ایستگاه، روند افزایشی مشخص و معناداری را در تمام فصول سال تأیید نمود که نشان‌دهنده گرمایش فراگیر شب‌ها در طول سال است. بررسی سری‌های زمانی ماهانه، دقت تحلیل را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد و نقاط کانونی تغییرات را مشخص می‌سازد. سری‌های میانگین حداقل دما در ایستگاه ارومیه در تمامی ماه‌های سال شکل غالب افزایشی را نشان می‌دهند. این امر بیانگر آن است که در این منطقه، افزایش دمای شبانه یک پدیده فراگیر در طول دوره مورد مطالعه بوده است. قوی‌ترین و محتمل‌ترین معنادارترین تغییرات افزایشی در میانگین حداقل دما، در ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست (تابستان)، سپتامبر، اکتبر و نوامبر (پاییز) مشاهده شده است. افزایش شدید در این ماه‌ها، به ویژه در ارومیه، بیانگر افزایش محسوس در دمای شب‌های گرم تابستان و به ویژه پاییز است. این امر می‌تواند به طور مستقیم بر اکوسیستم محلی، کشاورزی و سلامت عمومی (افزایش شب‌های گرم) تأثیر بگذارد. داده‌ها به وضوح نشان می‌دهند که دمای حداقل در هر دو ایستگاه، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته است. این گرمایش شبانه، یک الگوی قوی و همه‌جانبه است که هم در مقیاس سالانه و فصلی (در هر چهار فصل) و هم با شدت بیشتری در ماه‌های گرم و پاییزی در سطح ماهانه، در ایستگاه ارومیه به وضوح قابل مشاهده می‌باشد.

جدول (۲): نتایج آزمون من - کندال دمای حداقل ماهانه ایستگاه‌های مورد مطالعه

دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اگوست	ژولای	ژوئن	مه	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	ایستگاه
۰/۱۶	۰/۲۵*	۰/۲*	۰/۳۶*	۰/۳۴*	۰/۲۸*	۰/۳۱*	۰/۰۶	۰/۰۹	-۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱۵	تهران
۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۳۹*	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۴۳*	ارومیه

* روند معنادار در سطح ۹۵ درصد

نتایج آزمون من - کندال برای پارامتر دمای حداکثر در ایستگاه‌های تهران و ارومیه، الگوهای متفاوتی را در مقایسه با دمای حداقل نشان می‌دهد. در ایستگاه ارومیه در مقیاس سالانه، روند افزایشی در متوسط دمای حداکثر طی دوره مطالعه مشاهده گردید (جدول ۳). این یافته بیانگر گرم‌تر شدن روزها در ارومیه در طول سال است. در ایستگاه تهران نیز روند کاهشی سالانه رخ داده است.

بررسی فصلی تفاوت‌های اقلیمی بین دو ایستگاه را برجسته می‌سازد. در ایستگاه تهران روند دمای حداکثر در تمامی فصول (زمستان، بهار، تابستان و پاییز) روند کاهشی معناداری را نشان می‌دهد. در ایستگاه ارومیه روند سالیانه افزایشی بود. یکی از مهم‌ترین یافته‌ها در ایستگاه تهران، شواهدی از کوچک شدن دامنه دمای شبانه‌روزی است. این پدیده از ترکیب دو روند متضاد افزایش دمای حداقل و کاهش دمای حداکثر به دست می‌آید. این اثر در فصول تابستان و پاییز در تهران به شکل آشکارتر مشاهده شده است. کوچک شدن DTR معمولاً با افزایش پوشش ابری، رطوبت بیشتر یا تغییر در پارامترهای جوی مرتبط است که مانع از گرم شدن بیش از حد روزها و سرد شدن بیش از حد شب‌ها می‌شود.

جدول (۳): نتایج آزمون من - کندال دمای حداکثر سالانه و فصلی ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	سالانه	مقادیر بحرانی
تهران	-۰/۱۰۰	-۰/۲۰۴*	-۰/۳۱۷	-۰/۳۰۲*	-۰/۳۶۳*	۰/۱۹۷
ارومیه	۰/۱۸۰	۰/۲۱۹	۰/۰۵۷	-۰/۱۶۱	۰/۳۵۲*	۰/۳۰۸

بررسی سری‌های زمانی ماهانه دمای حداکثر، تفاوت‌های ظریفی را نسبت به تحلیل‌های فصلی آشکار می‌سازد. برخلاف روند کاهشی فصلی که در تهران مشاهده شد، در تحلیل ماهانه برای هر دو ایستگاه تهران و ارومیه، شکل غالب تغییرات در متوسط دمای حداکثر به صورت روند افزایشی ظاهر می‌شود. این تأکید بر گرمایش روزانه در سطح ماهانه است. در برخی ماه‌های خاص، تغییرات کاهشی مشاهده گردید که مقادیر آن‌ها به شدت به آستانه‌های بحرانی نزدیک بودند. این امر قویاً نشان می‌دهد که اگرچه روند کلی افزایشی است، اما پایداری آماری بلندمدت این روند در حال حاضر تصادفی تلقی می‌شود.

جدول (۴): نتایج آزمون من - کندال دمای حداکثر ماهانه ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
تهران	۰/۰۱۷	-۰/۰۷	-۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۲۲*	-۰/۲۸*	۰/۲۳*	-۰/۲۱*	-۰/۲۲*	-۰/۲۱*	-۰/۱۱	-۰/۱۴
ارومیه	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۴*	۰/۰۴	-۰/۱۵	-۰/۰۳	-۰/۰۶	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۲۶	-۰/۰۹	۰/۰۰۹

تحلیل روند بارش با استفاده از آزمون من-کندال (جدول ۵) نشان‌دهنده ثبات نسبی در میزان کلی بارش در طول دوره مطالعه است، در حالی که تغییرات در مقیاس‌های کوچک‌تر رخ داده است. بررسی سری‌های سالیانه بارش در هر دو ایستگاه مورد مطالعه نشان می‌دهد که روند معناداری (صعودی یا نزولی) در میانگین کلی بارش طی دوره مطالعه مشاهده نشده است. این امر نشان‌دهنده پایداری نسبی در حجم کلی بارش سالانه است. علیرغم پایداری سالیانه، تحلیل فصلی تغییرات را آشکار می‌سازد. شکل غالب سری‌های فصلی نشان می‌دهد که فصل تابستان در ایستگاه‌های مورد مطالعه بیشترین تغییرات محسوس را در بارش تجربه کرده است. این می‌تواند نشان‌دهنده افزایش یا کاهش شدیدتر نوسانات تابستانی باشد (مثلاً شدت بیشتر بارش‌های رگباری تابستانی یا خشکسالی‌های شدیدتر).

جدول (۵): نتایج آزمون من - کندال بارش سالانه و فصلی ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	سالانه	مقادیر بحرانی
ارومیه	۰/۰۵۶	-۰/۰۱۲	۰/۳۰۴*	۰/۱۴۱	۰/۰۴۳	۰/۱۹۷
تهران	۰/۲۰۹*	۰/۰۳۹	۰/۱۹۸*	۰/۰۵۸	۰/۱۱۷	۰/۱۹۷

* روند معنادار در سطح ۹۵ درصد

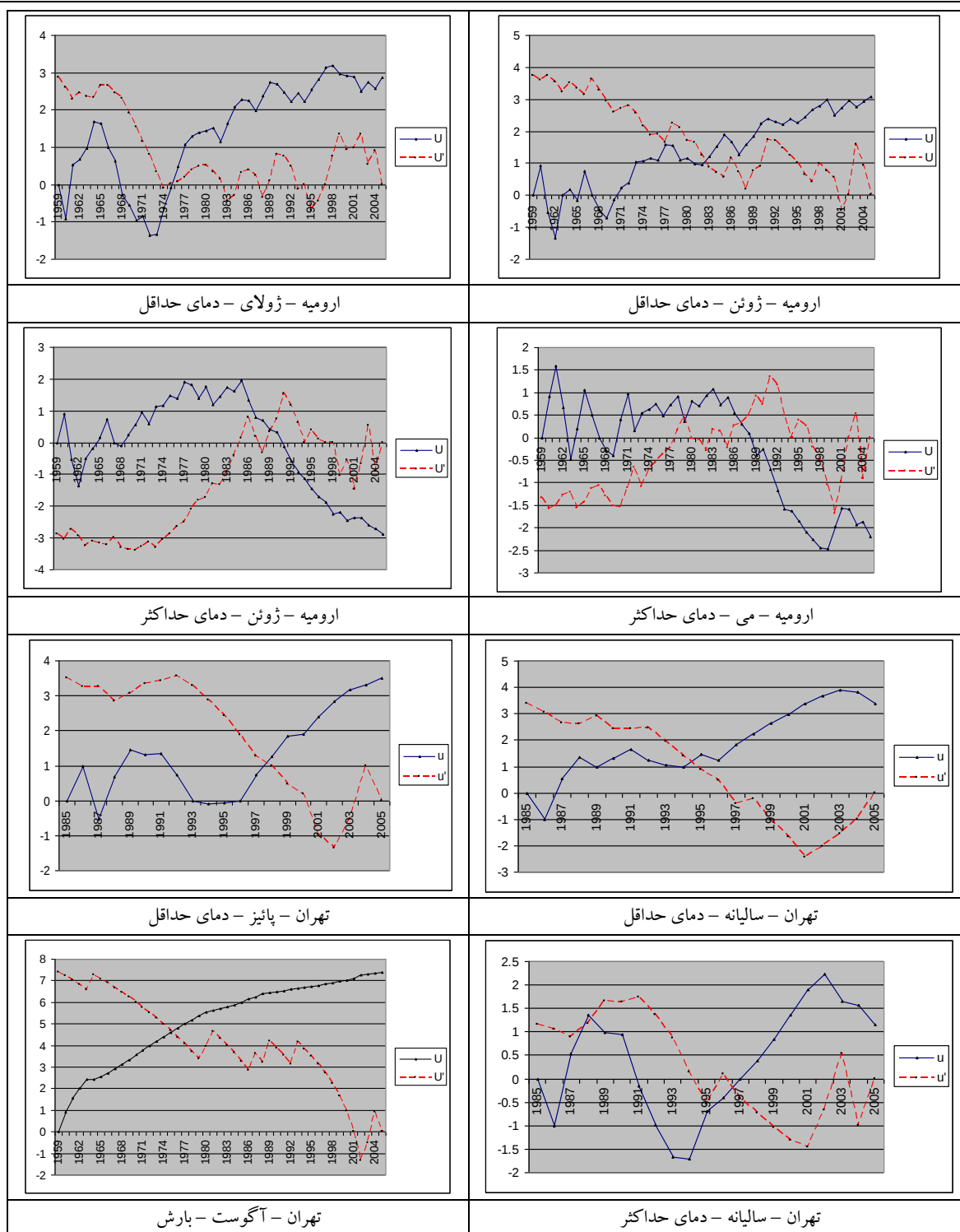
تحلیل روند بارش با استفاده از آزمون من-کندال (جدول ۵ و ۶) نشان دهنده پایداری کلی در حجم بارش سالانه است، اما تغییرات مهمی در توزیع فصلی و ماهانه رخ داده است. بررسی سری های سالیانه بارش در هر دو ایستگاه مورد مطالعه نشان می دهد که روند معناداری (صعودی یا نزولی) در میانگین کلی بارش طی دوره آماری مشاهده نشده است، که حاکی از ثبات حجم کلی بارش است. با وجود پایداری سالیانه، تحلیل فصلی نشان می دهد که فصل تابستان در ایستگاه های مورد مطالعه بیشترین تغییرات محسوس را تجربه کرده است. تحلیل جزئیات ماهانه، تغییر الگوی بارش در سال های اخیر را تأیید می کند. افزایش های ناچیز اما مشخص در بارش های ماهانه ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر مشاهده شد. این افزایش عمدتاً مربوط به دهه های اخیر است، به طوری که سهم این ماه ها در دهه های اولیه آماری صفر بوده است. در مقابل، کاهش های ناچیزی در بارش ماه های دسامبر و ژانویه دیده می شود که نشان دهنده کاهش سهم بارش های زمستانه و تغییر الگو به سمت تمرکز بیشتر بارش در نیمه گرم سال است.

جدول (۶): نتایج آزمون من - کندال بارش ماهانه ایستگاه های مورد مطالعه

ایستگاه	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	ژوئای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه
ارومیه	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۳۲*	۰/۶۸*	۰/۱	۰/۶۲*	۰/۳۳*	۰/۰۳	-۰/۱۹	۰/۰۷	۰/۰۳	-۰/۰۰۹
تهران	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۵۳*	۰/۷۴*	۰/۴۷*	۰/۳۲*	-۰/۰۴	-۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۸	-۰/۰۰۹

* روند معنادار در سطح ۹۵ درصد

پس از تعیین و تشخیص سری های دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش ماهانه، فصلی و سالانه، به منظور تعیین چگونگی و مقدار تغییرات یا روندهای موجود نمودارهای من کندال ترسیم و در شکل (۲) نشان داده شده است. در این اشکال، چگونگی و محل برخورد U ، U' برای تعیین میزان زمان تغییرات حائز اهمیت است. یعنی محل برخورد دو منحنی زمان تغییرات را نشان می دهد. در صورتی که محل برخورد در محدوده بین $\pm 1/96$ قرار داشته باشد، تغییرات از نوع ناگهانی ولی اگر دو منحنی خارج از محدوده ذکر شده با یکدیگر برخورد و تلاقی نمایند، وجود یک نوع روند را به نمایش خواهند گذاشت. در حالت اخیر اگر تلاقی خارج از محدوده $1/96+$ اتفاق بیافتد روند افزایشی و اگر پایین تر از محدود $1/96-$ دو منحنی برخورد نمایند روند از نوع کاهشی خواهد بود. با توجه به اینکه حجم محاسبات بالا بود تنها به ارایه تعدادی از نمودارها به عنوان نمونه اکتفا شد. در سری های سالانه و فصلی حداکثر درجه حرارت در ایستگاه های ارومیه و تهران دارای تغییر می باشد. ضمن تأیید مطلب فوق، این تغییرات در ایستگاه های ارومیه و تهران از نوع ناگهانی و افزایشی بوده است. نتایج حاصله از سری های فصلی حداقل درجه حرارت نشان می دهد که در چهار فصل سری های دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش دارای تغییرات ناگهانی و افزایشی است. در تهران تغییر افزایشی در فصل تابستان در سال ۱۹۹۸ مشاهده شده و در ارومیه در فصول تابستان و پاییز به ترتیب در سالهای ۱۹۸۲ و ۱۹۸۵ از تغییرات افزایشی برخوردار بوده است. با دقت در سری های حداکثر و حداقل درجه حرارت مشاهده می شود که سری های فصلی حداقل درجه حرارت نسبت به سری های فصلی حداکثر درجه حرارت از شدت افزایشی بیشتری برخوردار است. به طوری که حتی در فصل زمستان در دو ایستگاه مشهد و ارومیه روندهای افزایشی مشاهده شده است. در سری های سالانه و فصلی بارش در تهران ۱۹۹۰ تغییرات افزایشی دیده می شود که البته این تغییرات چندان محسوس نبوده و اندک تغییرات افزایشی در فصول ذکر شده مربوط به سالهای اخیر نسبت به سالهای شروع سری زمانی بارش می باشد.



شکل (۲): نمونه ای از نمودارهای من - کندال دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه

تحلیل کمی روندهای دمایی سالانه و فصلی ایستگاه ارومیه از طریق رگرسیون خطی، شدت تغییرات را به روشنی مشخص ساخت. در سطح سالانه، پارامتر دمای حداقل قوی‌ترین روند را نشان می‌دهد؛ دامنه تغییرات در ارومیه از ۰/۹۲ تا ۳/۶ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و خط روند مثبت با ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۳ نشان‌دهنده شدت این گرمایش شبانه است. در مقابل، تغییرات سالانه دمای حداکثر ملایم‌تر بوده و دامنه آن حدود ۱ درجه سانتی‌گراد برآورد شد، که این امر تأیید می‌کند شدت گرمایش در دماهای حداقل (شبانه) به مراتب بیشتر از دماهای حداکثر (روزانه) است. در سطح فصلی، دمای حداقل همچنان بیشترین پویایی را دارد؛ دامنه تغییرات در این پارامتر در تمام فصول (به ویژه زمستان با تغییراتی بین ۱/۸ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد) نسبت به دمای حداکثر

بیشتر است. نکته قابل توجه در دمای حداکثر فصلی، مشاهده روند کاهشی در فصول بهار، تابستان و پاییز در ارومیه است. از نظر معناداری آماری، نتایج حاکی از آن است که روندهای افزایشی دما (به استثناء فصل پاییز در تهران) در اکثر فصول و ایستگاه‌ها با سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار تشخیص داده شده‌اند، که اعتبار یافته‌های رگرسیون را افزایش می‌دهد. در بخش بارش فصلی، روند افزایشی تنها در تابستان ارومیه مشاهده شد، اما شیب خط روند و ضریب همبستگی برای بارش در اکثر موارد ضعیف بوده و معناداری آماری نیز (به جز زمستان تهران) برای روندهای افزایشی تأیید نشده است.

جدول (۷): معادلات رگرسیون خطی تغییرات دمای حداقل، حداکثر و بارش سری‌های سالیانه و فصلی

متغیر	سالانه	پاییز	تابستان	بهار	زمستان	ایستگاه
حداکثر	$x + ۱۰۳/۷۷$ $t = -۰/۰۴$ $R = -۰/۴۸$ $\Delta t = -۱/۸$	$x + ۱۰۴/۴۴$ $t = -۰/۰۴$ $R = -۰/۴۳$ $\Delta t = -۱/۸$	$x + ۱۲۳/۴$ $t = -۰/۰۴$ $R = -۰/۴$ $\Delta t = -۱/۸$	$x + ۹۵/۳۷$ $t = -۰/۰۳$ $R = -۰/۰۲$ $\Delta t = -۱/۳$		ارومیه
حداقل	$x - ۳۲/۲۵$ $t = ۰/۰۲$ $R = ۰/۳۸$ $\Delta t = ۰/۹۲$	$x - ۷۲/۲۷$ $t = ۰/۰۳$ $R = ۰/۵۵$ $\Delta t = ۱/۳$	$x - ۴۹/۷۳$ $t = ۰/۰۳$ $R = ۰/۵۷$ $\Delta t = ۱/۳$			
بارش			$x - ۱۳۵/۶$ $p = ۰/۰۶$ $R = ۰/۲۷$ $\Delta p = ۲/۷$			
حداکثر	$x - ۷۹/۱۵$ $t = ۰/۰۴$ $R = ۰/۴۱$ $\Delta t = ۰/۸$					تهران
حداقل	$x - ۱۳۹/۵$ $t = ۰/۰۷$ $R = ۰/۴۲$ $\Delta t = ۱/۴$	$x - ۱۶۲/۸$ $t = ۰/۰۸$ $R = ۰/۶۹$ $\Delta t = ۰/۸$	$x - ۷۴/۰۹$ $t = ۰/۰۴$ $R = ۰/۴۵$ $\Delta t = ۰/۸$		$x - ۴/۱۱$ $t = ۰/۱۰$ $R = ۰/۶$ $\Delta t = ۲$	
بارش	$x - ۹۰۶/۲$ $p = ۴/۶۹$ $R = ۰/۴۲$ $\Delta p = ۰/۴۹$					

پیش بینی یخبندان بر ایمنی هوانوردی

بر اساس نتایج به دست آمده از جدول (۸)، روند مثبت در وقوع یخبندان در سال‌های اخیر بیانگر افزایش فراوانی یا شدت این پدیده در منطقه مورد مطالعه است. این افزایش به طور مستقیم با تغییرات اقلیمی پارامترهای دما و بارش مرتبط است. کاهش دماهای حداقل در برخی دوره‌های فصلی، به ویژه در شرایطی که همراه با بارش‌های زمستانه یا بارش‌های مختلط (باران و برف) رخ می‌دهد، زمینه را برای تشکیل یخبندان و یخزدگی سطوح فراهم می‌کند. از سوی دیگر، افزایش نوسانات دمایی میان روز و شب که در

نتیجه گرمایش کلی اقلیم و بی ثباتی جوی ایجاد شده، سبب افزایش احتمال شکل گیری یخبندانهای ناگهانی پس از بارش می شود. بنابراین هم زمانی بارش و افت دما نقش تعیین کننده ای در تشدید این مخاطره دارد. با توجه به این روابط، می توان نتیجه گرفت که افزایش روند یخبندان، یکی از پیامدهای مستقیم تغییرات دما و الگوهای بارشی جدید است که پیامدهای مهمی برای ایمنی هوانوردی دارد. بروز یخزدگی روی سطوح پروازی، لغزندگی باند فرودگاهها، کاهش دید افقی و افزایش ریسک عملکردی موتور هواپیما، از جمله اثرات مستقیم این پدیده هستند. به همین دلیل، استمرار این شرایط می تواند در آینده باعث افزایش مخاطرات پروازی و کاهش سطح ایمنی هوانوردی در مسیرهای هوایی مورد مطالعه شود.

جدول (۸): پیش بینی یخبندان بر ایمنی هوانوردی

دوره	پایه	۲۰۲۰	۲۰۵۰	۲۱۰۰
ژانویه	۱/۹۳	۱/۸۸	۲/۳۱	۲/۴۸
فوریه	۲/۵۳	۲/۵۸	۲/۸۹	۲/۸۷
مارس	۱/۷۹	۱/۷۲	۱/۹۶	۱/۶۷
آوریل	۱/۶۱	۱/۵۹	۱/۵۵	۱/۱
مه	۶۵	۴۲	۴۱	۱۱
ژوئن	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
ژوئیه	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲
آگوست	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
سپتامبر	۴۱	۴۱	۷۷	۱۹
اکتبر	۴۴	۴۴	۴۴	۳۲
نوامبر	۳/۱۶	۳/۲۵	۳/۹۲	۲/۷۷
دسامبر	۲/۸۴	۳/۲۴	۳/۰۹	۳/۵۱
کل	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۸	۱/۳۱

ارزیابی توانمندی مدل SDSM در شبیه سازی رویدادهای حدی در دوره صحت سنجی

در بخش پیشین مشاهده شد که مقادیر میانگین یخبندان ریزمقیاس شده، همراه با انحراف معیار آن ها، توسط مدل SDSM بر پایه خروجی های NCEP و HadCM3 با دقت قابل قبولی شبیه سازی شده اند. با این حال، رویدادهای حدی به دلیل اثرات بالقوه و گسترده تر خود، نسبت به میانگین پارامترها تأثیر بسیار بیشتری بر مدیریت مخاطرات هوایی دارند. از این رو، ارزیابی توانایی مدل در بازنمایی ویژگی های این رویدادها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این بخش، توانمندی مدل SDSM در ریزمقیاس کردن رویدادهای حدی با استفاده از شاخص های آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، ضریب نش-ساتکلیف، نسبت انحراف معیار نمایه های شبیه سازی شده به داده های مشاهده ای و میانگین ماهانه مقادیر نمایه ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان گونه که در جدول (۹) مشاهده می شود، مقادیر ضریب نش در چهار نمایه مورد بررسی بین ۰/۲۴ تا ۰/۵۷ متغیر است که بیشترین مقدار به نمایه Pxcd در اختصاص دارد. این امر بیانگر عملکرد مناسب تر مدل SDSM در شبیه سازی این نمایه و توان نسبی آن در بازنمایی ویژگی های آماری رویدادهای حدی در دوره صحت سنجی داده ها است. همچنین، مقدار RMSE نرمال شده دارای دامنه ای بین ۰/۱۷ تا ۰/۲۷ گزارش شده است که کمترین مقادیر آن به نمایه های بارش بیشینه و صدک نودم تعلق دارد. این امر بیانگر آن است که مدل در شبیه سازی این دو نمایه نیز عملکرد بهتری نسبت به سایر شاخص ها داشته است. از سوی دیگر،

نسبت انحراف معیار یا RS محاسبه شده نشان می دهد که مقدار این شاخص در نمایه ی بیشینه تعداد روزهای خشک متوالی بهتر از سایر نمایه ها به دست آمده است؛ هر چند در مجموع، میزان تغییرپذیری هر چهار نمایه شبیه سازی شده کمتر از داده های مشاهداتی بوده است. علاوه بر این، بررسی مقدار ضریب همبستگی میان داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده بیانگر آن است که الگوی زمانی نوسانات در نمایه ی تعداد روزهای خشک متوالی نسبت به سایر نمایه ها همبستگی بالاتری دارد و مدل توانسته است ساختار تغییرات زمانی آن را با دقت بیشتری بازتولید کند. در مجموع، نتایج به دست آمده از شاخص های ارزیابی بیانگر آن است که مدل SDSM در شبیه سازی نمایه های حدی، به ویژه در مورد تعداد روزهای خشک متوالی و بارش های بیشینه، عملکرد قابل قبولی داشته است.

جدول (۹): ارزیابی توانمندی مدل در شبیه سازی رویدادهای حدی در دوره صحت سنجی

نمایه	Ens	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده	داده های مشاهده ای	r
۹۰pq	۰/۳۵	۰/۱۷	۰/۵۹	۰/۶۳
Pxcdd	۰/۵۷	۰/۲۱	۰/۹۰	۰/۷۷
۹۰pfl	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۵۸	۰/۵۰
p-max	۰/۴۰	۰/۱۷	۰/۶۲	۰/۶۴

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف تحلیل روندهای اقلیمی دما و بارش در دو ایستگاه کلیدی تهران و ارومیه به منظور ارزیابی تأثیرات بالقوه آن ها بر ایمنی مسیر پروازی تهران-ارومیه انجام پذیرفت. تحلیل های روند در مقیاس های فصلی، سالانه و ماهانه، تغییرات معناداری را در پارامترهای اقلیمی نشان داد که پیامدهای مستقیم بر مخاطرات هوانوردی دارد. در هر دو ایستگاه، گرایش غالب افزایشی در دماهای حداقل، به ویژه در مقیاس های فصلی (به استثنای بهار) و سالانه مشاهده شد. گرمایش شبانه به طور ویژه در ارومیه در ماه های تابستان و پاییز قوی و معنادار بوده است. این افزایش، به طور مستقیم احتمال کاهش وقوع یخبندان در شب های سرد سال را نشان می دهد، که می تواند ایمنی را در فصول سرد بهبود بخشد. در تهران، روندهای کاهشی دمای حداکثر در برخی ماه های تابستانی و پاییزی مشاهده شد، در حالی که ارومیه در مقیاس سالانه روند افزایشی کلی داشت. این نوسانات نشان دهنده تغییر الگوهای گرمایش روزانه است که بر پایداری حرارتی سطح زمین تأثیر می گذارد. افزایش بارش در فصول تابستان (در هر دو ایستگاه) و زمستان (تهران) و همچنین در ماه های تابستانی ارومیه، نشان دهنده تغییر در چرخه ی رطوبت منطقه است که می تواند بر افزایش احتمال وقوع پدیده های جوی مرتبط با رطوبت نظیر مه و دید محدود تأثیر بگذارد. تحلیل مدل SDSM در شبیه سازی میانگین های یخبندان، عملکرد قابل قبولی با انحراف معیارهای پذیرفتنی از خود نشان داد؛ اما همانند سایر شاخص های حدی، باید احتیاط لازم در مورد توانایی مدل در بازنمایی کامل نوسانات شدید یخبندان در نظر گرفته شود. با این حال، پیش بینی روند یخبندان در هر دو ایستگاه حاکی از روند افزایشی این پدیده است که این یافته نیاز به بررسی دقیق تر دارد و می تواند با نتایج گرمایش شبانه در تضاد باشد، مگر اینکه تغییرات الگوی بارش (افزایش رطوبت در زمستان) این اثر را جبران کند. نتایج به دست آمده در این پژوهش دارای کاربردهای حیاتی برای مدیریت ایمنی پرواز در مسیر تهران-ارومیه است. با وجود گرمایش شبانه، افزایش پیش بینی شده در روند وقوع یخبندان (همان طور که در بخش تحلیل روند ذکر شد)، نیاز به به روزرسانی مکرر و دقیق تر هشدارهای یخبندان (به ویژه در ارتفاعات مسیر) را دوچندان می کند. هوانوردان و تیم های عملیاتی باید توجه ویژه ای به پیش بینی های مربوط به دمای حداقل داشته باشند، زیرا افزایش دماهای حداقل در زمستان ممکن است به صورت موضعی، به دلیل نوسانات شدیدتر نسبت به میانگین سالانه، منجر به وقوع یخبندان در ساعات اولیه صبح یا شب گردد. افزایش روندهای بارش در تابستان و پاییز، به ویژه در ارومیه، نشان دهنده

افزایش احتمالی مه و کاهش دید افقی در فرودگاه مقصد است. این امر مستقیماً بر اجرای عملیات فرود و برخاست در شرایط دید پایین تأثیر می‌گذارد و لزوم به‌کارگیری تجهیزات ناوبری دقیق (مانند سامانه‌های ILS در سطح بالاتر) را تقویت می‌کند. تأیید اعتبار مدل SDSM برای میانگین‌ها، ابزاری مفید برای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت در سناریوهای اقلیمی آتی فراهم می‌آورد، اما محققان هوانوردی باید با آگاهی از کم‌تخمین نوسانات شدید توسط این مدل‌ها، در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت مربوط به زیرساخت‌ها، حاشیه امن بیشتری در نظر بگیرند. در نهایت، تغییرات شناسایی شده در روندهای دما و بارش، مستلزم بازنگری دوره‌ای در استانداردهای عملیاتی و نگهداری در فرودگاه‌های مسیر به‌منظور سازگاری با شرایط اقلیمی متغیر، به‌ویژه در حوزه مدیریت خطر یخبندان و شرایط جوی مرتبط با دید است. نتایج این پژوهش همراستا با بخش قابل توجهی از مطالعات اخیر بین‌المللی و داخلی، نقش تغییرات دمای حداقل، بارش و الگوهای رطوبتی را در ارتقای یا تضعیف ایمنی پروازی تأیید می‌کند. مشابه مطالعات جهانی مانند فرانک (۲۰۰۱) و کائو و همکاران (۲۰۱۸)، افزایش رطوبت و تغییرات گرمایش در لایه‌های تحتانی جو می‌تواند احتمال یخ‌زدگی را در ارتفاعات خاص افزایش دهد، هرچند روند کلی گرمایش شبانه ممکن است در سطح زمین از شدت آن بکاهد. در سطح ملی نیز یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعاتی چون تاج‌بخش (۱۳۹۱)، مرادی (۱۳۹۱) و مظفری‌پور (۱۴۰۱) هم‌جهت است که تأکید دارند شرایط اقلیمی ایران در فصول سرد، مستعد مخاطرات دید و یخ‌زدگی است. تمایز این تحقیق در رویکرد بلندمدت و مدل‌محور آن (۱۹۵۹-۲۰۱۰) است که برخلاف مطالعات کوتاه‌مدت گذشته، پیوستگی زمانی تغییرات اقلیمی و پیامدهای مستقیم آن بر مسیر تهران-ارومیه را نشان داده است. به‌طور کلی، ترکیب نتایج این مطالعه با پیشینه‌های یادشده، ضرورت بازنگری در راهبردهای ضد یخ‌زدگی، بهبود سامانه‌های ناوبری در شرایط دید محدود، و استفاده از مدل‌های اقلیمی به‌روز برای پیش‌بینی خطرات پروازی را برجسته می‌کند.

منابع

۱. براتی بنی، علیرضا؛ منتظرالظهور، فردوس (۱۳۹۲). نیازسنجی در زمینه تشخیص نوع سامانه هواشناسی هوانوردی در فرودگاه بین‌المللی شهرکرد. فنی مهندسی. فصلنامه علمی-ترویجی حمل و نقل. ۸ (۲۰)، ۶۵-۵۷.
۲. تاج‌بخش، سحر؛ غفاریان، پروین؛ صحراییان، فاطمه (۱۳۹۱). بررسی شرایط هواشناختی یخ‌زدگی هواپیما در دو بررسی موردی (فرودگاه مهرآباد-تهران). فیزیک زمین و فضا. ۳۸ (۱)، ۲۲۷-۲۰۵.
۳. جهان‌بخش، سعید؛ زاهدی، حمید؛ حسینی، عباس (۱۳۸۴). تجزیه و تحلیل دما و یخبندان در ارتباط با اقلیم فرودگاهی. پژوهش‌های جغرافیایی. ۳۶ (۱)، ۱۵-۱.
۴. حسینی، قاسم؛ عطایی، هوشنگ (۱۳۹۵). تأثیر مخاطرات آب و هوایی در حمل و نقل هوایی. سومین کنفرانس علمی پژوهشی افق‌های نوین در علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی معماری و شهرسازی ایران. تهران. ایران.
۵. خلیل‌نژاد، محمد؛ برنا، رضا؛ فرج‌زاده، منوچهر (۱۳۹۹). مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر ضریب استفاده از باند فرودگاه به روش FAA. مورد مطالعه: فرودگاه زاهدان. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی. ۱ (۱)، ۶۲-۵۵.
۶. خدام، نوشین؛ نوری، فائزه (۱۴۰۳). شناسایی فرودگاه‌های پرخطر ایران از نظر قرارگیری در معرض رخدادهای گرد و خاک. نشریه هواشناسی و علوم جو. ۷ (۱)، ۸۵-۷۵. doi: 10.22034/jmas.2025.502600.1238
۷. خان سالاری، سکینه (۱۳۹۹). بررسی تغییرات اقلیمی ارتفاع تراز یخ‌زنی و تحلیل همدیدی آن در فرودگاه‌های مهرآباد، مشهد و کرمانشاه. نشریه هواشناسی و علوم جو. ۳ (۳)، ۲۲۳-۲۰۱.
۸. دبیری، مهرانوش (۱۳۹۱). رابطه بین جو ایمنی سازمانی و ایمنی هوانوردی در فرودگاه مهرآباد تهران. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه پیام نور استان فارس. دانشکده ادبیات و علوم انسانی. شیراز. ایران.

۹. سمندر، ریحانه (۱۳۹۶). بررسی تاثیر عناصر اقلیمی بر پروازهای فرودگاهی (مطالعه موردی: فرودگاه همدان). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تبریز، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی. تبریز. ایران.
۱۰. سقائی، محسن (۱۴۰۰). بررسی مشکلات حاکم بر صنعت حمل و نقل هوایی ایران (مطالعه موردی فرودگاه مهرآباد). تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۲۱ (۶۰)، ۲۷۹-۲۹۶.
۱۱. شمس، سجاد (۱۴۰۱). کاهش تاثیر اغتشاشات جوی بر ناوبری هواپیماهای غیرنظامی توسط اینترنت اشیا. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی فناوری های نوین، دانشگاه شهید بهشتی. تهران. ایران.
۱۲. گودرزی، مسعود؛ صلاحی، برومند؛ حسینی، سید اسعد (۱۳۹۴). ارزیابی عملکرد مدل های ریزمقیاس گردانی LARS-WG و SDSM در شبیه سازی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۹ (۳۱)، ۱۱-۲۲.
۱۳. مرادی، محمد؛ رضازاده، پرویز؛ وظیفه، احد (۱۳۹۳). بررسی موردی چینش قائم باد سطوح پایین در فرودگاه مهرآباد. پژوهش های اقلیم شناسی. ۱۷، ۳۳-۴۶.
۱۴. مهری، افشین (۱۴۰۱). بررسی اثر سوانح طبیعی بر صنعت هوانوردی (مطالعه موردی فرودگاه امام). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید بهشتی. پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشکده مهندسی عمران. تهران. ایران.
۱۵. مظفری پور، قاسم (۱۴۰۱). تحلیل و بررسی تاثیر تغییرات آب و هوا بر عملیات فرودگاهی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه پیام نور استان یزد. مرکز پیام نور مهریز. مهریز. ایران.
۱۶. هاروونیان، رمون (۱۳۹۱). بررسی رابطه بین نم نسبی و کمبود اشباع در هوای مرطوب در سطح زمین در دوره پنج ساله (۱۳۸۶-۱۳۸۲) در ایستگاه های مهرآباد و شمال تهران. پژوهش های علوم و فنون دریایی. ۳ (۸)، ۸۹-۱۰۵.
17. Asakareh, H. & Shadman, H. (2017). Evaluation of the power of SDSM model in simulating the average temperature of Urmia city. *Journal of Geography and Environmental Planning*. 29 (4).
18. Bin, Z. et al (2005). A statistical analysis on the effect of vertical wind shear on tropical cyclone development. *Acta Meteorologica Sinica*. 20 (3), 383-388.
19. Bolgiani, P. F. G. et al (2018). Analysis and numerical simulation of an aircraft icing episode near Adolfo Suárez Madrid-Barajas International Airport. *Atmospheric Research*. 200, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.001>.
20. Broeren, A. P. et al (2025). Aerodynamic effect of artificial ice shapes on the 5.2% scale semispan high-lift common research model in the NASA national transonic facility. *AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND*. 21-25. <https://doi.org/10.2514/6.2025-3463>
21. Corbosiero, K.L. & Molonari, J. (2002). The effect of vertical wind shear on distribution of convection in tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.* 134, 2111-2123.
22. Cao, Y.; Tan, W. & Wu, Zh. (2018). Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety. *Aerospace Science and Technology*. 75, 353-385, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.12.028>.
23. Cao, Y. et al (2020). The effects of icing on aircraft longitudinal aerodynamic characteristics. *Mathematics*. 8 (7), 1171. <https://doi.org/10.3390/math8071171>
24. Frank, W.M. & Ritchie, E.A. (2001). Effects of vertical wind shear on intensity and structure of numerically simulated Hurricanes. *Mon. Wea. Rev.* 129, 2249-2269
25. Ge, J. et al (2022). Atmospheric icing measurement and online ice type recognition for aircraft utilizing optical fiber sensor and machine learning algorithms. *Measurement*. 205, 112215, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112215>.
26. Hamidianpour, M. et al (2023). Determination of the change point of temperature thresholds of heat and cold waves in Iran during the statistical period of 1966-2018. *Quarterly Journal of Natural Environment Hazards*. 12 (37).
27. Pasquini, A. I. et al (2006). Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Quaternary International*. 158 (1), 127-139.
28. Rappin, E. D. & Nolan, D. S. (2012). The effect of vertical shear orientation on tropical cyclogenesis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 138 (665). DOI: 10.1002/qj.977
29. Schauwecker S. et al (2017). The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier events. *Geophys Res-Atmos*. 122, 5172--5189. doi:10.1002/2016JD025943.
30. Serrano, A.; Mateos, V.L. & Garcia, J.A. (1999). Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *phys. Chem. EARTH (B)*. 24 (12), 8590.

31. Wilks D.S. (1992). Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climate Change*. 22, 67-84.