

# مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر ضریب استفاده از باند فرودگاه بین‌المللی بندرعباس

امیر، نادری<sup>۱</sup>، حسین ملکوتی<sup>۲\*</sup>، اسداله خورانی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
  - ۲- استاد، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
  - ۳- دانشیار، دانشکده اقلیم‌شناسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
- (دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵)

## چکیده

در طراحی باند فرودگاه باید اقلیم‌شناسی باد را در نظر گرفت تا پتانسیل رویداد بادهای جانبی و بادهای موافق که می‌توانند باعث بروز سوانح و تأخیر پرواز هواپیما شوند کاهش یابد. در مقاله حاضر با استفاده از گلبادهای قطبی شانزده جهتی، ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس (باند ۰۳-۲۱) در دو دوره آماری ۱۹۸۲-۲۰۲۱ و ۲۰۲۴-۲۰۵۰ و با در نظر گرفتن بادهای جانبی مجاز (۱۳ نات در ساعت) به روش FAA محاسبه گردید. در این راستا با به‌کارگیری روش SDSM و اطلاعات CanESM2 و بر اساس سه سناریوی RCP4/5، RCP2/6 و RCP8/5، سمت و سرعت وزش باد ایستگاه بندرعباس تا سال ۲۰۵۰ مطالعه شد سپس گلبادهای شانزده جهتی روزانه برای دوره‌های آماری مزبور مطالعه شد. نتایج نشان دادند که ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس در دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱ برابر با ۹۴/۰۴٪ است. همچنین پیش‌بینی‌ها نشان دادند که تا سال ۲۰۵۰، ضریب استفاده از باند فعلی این فرودگاه در سه سناریوی RCP2/6 و RCP4/5 و RCP8/5 به ترتیب با ۲/۴۱٪ و ۱/۸۲٪ و ۱/۹۷٪ افزایش مواجه می‌شود. نتایج نشان دادند که در دوره ۲۰۲۴-۲۰۵۰ نسبت به دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱ بیشینه سرعت باد روزانه در تمامی فصول به‌غیر از فصل تابستان کاهش و میانگین سرعت باد در تمامی فصول کمتر از یک نات کاهش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، گلباد، ضریب استفاده از باند

## Study the Effect of Climate Change on the Utilization Coefficient of the Present Runway of Bandar Abbas international Airport

Amir naderi, Hossein malakooti, Asadollah khorani

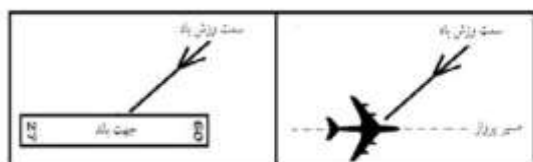
### Abstract

This paper calculates the Utilization Coefficient of the current runway (Runway 03-21) at Bandar Abbas Airport for two statistical periods: 1982-2021 and 2024-2050, using 16-directional polar wind roses and considering the allowable crosswind component (13 knots per hour) according to the FAA method. For this purpose, the wind speed and direction at the Bandar Abbas station were first projected up to the year 2050 using the SDSM method and CanESM2 data, based on three Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios: RCP2/6, RCP4/5, and RCP8/5. Daily 16-directional wind roses were then analyzed for the aforementioned statistical periods. The results indicated that the runway Utilization Coefficient for the current runway at Bandar Abbas Airport was 94/04% during the 1982-2021 period. Furthermore, predictions showed that by the year 2050, the runway Utilization Coefficient would increase by 2/41%, 1/82%, and 1/97% under the RCP2/6, RCP4/5, and RCP8/5 scenarios, respectively. The findings also demonstrated that, compared to the 1982-2021 period, the maximum daily wind speed will decrease in the 2024-2050 period for all seasons except summer, and the mean wind speed will decrease by less than one knot across all seasons.

**Keywords:** Climate Change, Wind Rose, Runway Utilization Coefficient

## مقدمه

پرواز در جهت و امتدادی ساخته شود که برای ۹۵٪ پروازهای نشست و یا برخاست در وضعیت باد روبرو و یا باد جانبی با سرعت و جهت مجاز (معین)، مقدور باشد. اگر سمت وزش باد نسبت به مسیر پرواز و یا نسبت به جهت باند، دارای یک زاویه باشد به آن باد جانبی یا باد پهلو گفته می‌شود که در شکل ۱، نشان داده شده است [۸].



شکل ۱- باد جانبی یا باد پهلو [۸]

هنگام رخداد متواتر باد جانبی شدید، جهت باند فرودگاه نیاز به تغییر دارد، درحالی‌که باد موافق سمت‌وسوی باند را تعیین می‌کند [۵]. سازمان هوانوردی کشوری آمریکا (FAA) حداکثر باد جانبی مجاز برای نشست و برخاست هواپیما را ۱۳ نات (۱۵ مایل در ساعت) تعیین نموده است [۹]. براین اساس در پژوهش حاضر بادهای جانبی با سرعت کمتر از ۱۳ نات در ساعت، مجاز در نظر گرفته شده است. در خصوص تأثیر تغییر اقلیم بر فرودگاه‌ها، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که برخی فرودگاه‌ها در اثر پیامدهای تغییر اقلیم از نظر عملیاتی و کسب‌وکار در معرض مخاطره هستند؛ به‌علاوه اثرات تغییر اقلیم بر هوانوردی شامل تغییر در الگوهای باد، تغییر در میزان بارش، بالا آمدن سطح آب دریا و امواج بلند طوفان، افزایش دما و رخداد بیشتر و شدیدتر سلول‌های همرفتی، است [۱۰]. باید توجه داشت که تغییر در الگوهای باد می‌تواند بر ضریب استفاده از باند تأثیرگذار باشد. ممکن است در اثر تغییر اقلیم، جهت باد غالب محلی تغییر نماید و در نتیجه وزش بادهای جانبی نسبت به باند موجود، بیشتر شود. در این شرایط اگر ضریب استفاده از باند در اثر افزایش وزش بادهای جانبی کمتر از ۹۵٪ شود، نیاز به طراحی مجدد باندی دیگر به صورت متقاطع و یا غیر متقاطع با باند موجود، افزایش می‌یابد. در شکل ۲ نحوه نشست و برخاست هواپیما نسبت به جهت باد مخالف نمایش داده شده است [۱۰].

آب‌وهوا تأثیر مستقیم در بنیان عوامل سازنده محیط‌های جغرافیایی داشته و اقلیم‌شناسی یکی از شاخه‌های کاربردی جغرافیای طبیعی بشمار می‌رود که سعی دارد با شناخت عوامل اقلیمی هر محل و تأثیر آن‌ها در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و... شرایط زندگی را برای انسان‌ها بهتر و آسان‌تر نماید [۱]. باد در اثر چرخش زمین و همچنین به دلیل اختلاف فشار هوا ایجاد می‌شود. باد از مناطق پرفشار به مناطق کم‌فشار حرکت می‌کند. بادها به دلیل اختلاف فشار یا دمای هوا در جهت افقی اتفاق می‌افتند. باد می‌تواند به صورت قائم و افقی با سرعت‌های مختلف و نوسانات دینامیکی حرکت کند [۲]. وقوع مکرر بادهای شدید دم و پهلو در باند فرودگاه عامل مهمی است که بر ایمنی پرواز و نشست و برخاست تأثیر می‌گذارد [۳]. در طراحی باند فرودگاه باید اقلیم‌شناسی باد را در نظر گرفت تا پتانسیل رویداد بادهای جانبی و بادهای موافق که می‌توانند باعث بروز سوانح و تأخیر پرواز هواپیما شوند کاهش یابد [۴]. باد جانبی<sup>۱</sup> بر پایداری پرواز تأثیر می‌گذارد، درحالی‌که باد موافق<sup>۲</sup> و مخالف بر طول باند موردنیاز برای فرود و برخاستن تأثیر می‌گذارد. این دو دلیل باعث می‌شود سرعت و جهت باد را به یک عامل مهم در فرایند انتخاب پیکربندی باند تبدیل شود. در صورت افزایش رخداد باد منطقه جهت باند فرودگاه نیاز به تغییر دارد، درحالی‌که باد موافق سمت‌وسوی باند را تعیین می‌کند [۵].

انتخاب داده‌های مورد استفاده برای محاسبه ضریب استفاده باید بر اساس آمار قابل اعتماد توزیع باد برای دوره حداقل پنج‌ساله باشد. مشاهدات مورد استفاده باید حداقل هشت بار در روز و در فواصل زمانی مساوی انجام شود [۶]. امتداد باند پرواز در جهت وزش باد غالب منطقه، طراحی و ساخته شود. از طرفی در برخی مناطق، عدم وجود باد غالب در یک فصل، باعث ایجاد محدودیت اقلیمی شده و ضرورت ایجاد می‌کند که باند دیگری به صورت متقاطع و یا غیر متقاطع (به صورت V شکل باز) و در جهت باد غالب دوم ساخته شود [۷]. بر اساس توصیه سازمان ایکائو بهتر است، امتداد یا جهت باند پرواز به نحوی انتخاب و طراحی شود که حداقل در ۹۵٪ پروازها، برای نشست و برخاست قابل استفاده باشد که به آن ضریب استفاده ۹۵٪ گفته می‌شود [۶]. به بیان دیگر لازم است باند

<sup>۱</sup>cross wind

<sup>۲</sup>tail wind

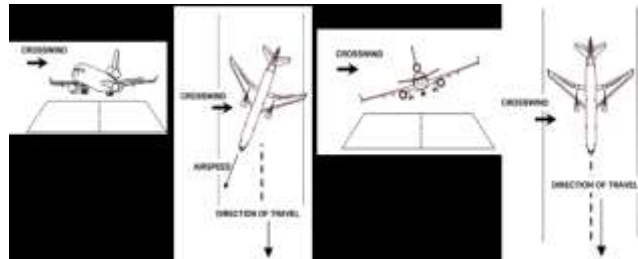
<sup>۳</sup>head wind

۱۹۹۱ و ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و با در نظر گرفتن بادهای جانبی مجاز به روش FAA محاسبه شد در این راستا با به کارگیری نرم افزار SDSM و مدل CanESM<sub>2</sub> و بر اساس سه سناریوی RCP<sub>2/6</sub> و RCP<sub>4/5</sub> و RCP<sub>8/5</sub> سمت و سرعت وزش باد ایستگاه زاهدان تا سال ۲۰۵۰ مورد مطالعه قرار گرفت و گلبادهای شانزده جهتی روزانه برای دوره‌های آماری مزبور ترسیم گردید. بر اساس سناریو RCP<sub>8/5</sub> در فرودگاه زاهدان جهت تأمین حداقل ضریب استفاده از باند، نیاز به احداث باند دیگری منطبق با جهت باد نایب غالب شناسایی شده در این سناریو وجود دارد [۱۴]؛ همچنین جهان‌بخش اصل و همکارانش در سال ۱۳۸۴ به ارزیابی امتداد باند پرواز فرودگاه اردبیل با تجزیه و تحلیل عنصر باد پرداختند. در این پژوهش با استفاده از آمار هفده سال ایستگاه سینوپتیک اردبیل (۲۰۰۰-۱۹۸۴) در هشت قرائت در روز و در ساعات اصلی و فرعی سینوپ گلبادهای شانزده جهتی ماهانه ترسیم شد و گلبادهای قطبی شانزده جهتی مختص محاسبات مربوط به ضریب استفاده از امتداد یا امتدادهای نشست و برخاست با استفاده از نرم افزار اتوکد برای هر ماه ترسیم شد. از بررسی‌ها و مطالعات انجام یافته نتیجه می‌شود که باند ۲۳-۵ و ۲۴-۶ بیش از ۹۵٪ بادها با در نظر گرفتن بادهای جانبی مجاز ۱۲ نات در ساعت در طول سال جذب می‌نمایند. امتدادهای فوق‌الذکر نسبت به باند ۳۳-۱۵ باند پرواز موجود فرودگاه اردبیل ۷۰ تا ۸۰ درجه به سمت راست چرخش نشان می‌دهند [۱۵].

هدف از این پژوهش مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر ضریب استفاده از باند فرودگاه بندرعباس به روش FAA می‌باشد. در این راستا با به کارگیری نرم افزار SDSM و مدل CanESM<sub>2</sub> و بر اساس سه سناریوی RCP<sub>2/6</sub> و RCP<sub>4/5</sub> و RCP<sub>8/5</sub> سمت و سرعت وزش باد ایستگاه بندرعباس تا سال ۲۰۵۰ مورد مطالعه قرار گرفت و گلبادهای شانزده جهتی روزانه برای دوره‌های آماری مزبور ترسیم گردید.

### معرفی منطقه مورد مطالعه

شهر بندرعباس به عنوان مرکز استان هرمزگان در مختصات ۵۶ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۲ دقیقه طول شرقی و ۲۷ درجه و ۰۹ دقیقه تا ۲۷ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و



شکل ۲ - تصویر باد مخالف در هنگام برخاستن و فرود [۱۱]

مطالعه پتانسیل باد مخالف و موافق باند فرودگاه اندونزی توسط ساردجونو و همکارانش در سال ۲۰۲۲ انجام شد. تجزیه و تحلیل سرعت و جهت باد مربوط به سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۷ روی فرودگاه مورد مطالعه برای شناخت پتانسیل باد جانبی و موافق با استفاده از مدل WRF<sup>۴</sup> صورت گرفت. بیشترین مقدار باد جانبی در ماه اوت در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۷ به میزان ۳۰/۵۳ نات رخ داده بود، در حالی که ۲۵ نات باد موافق در ماه ژانویه برای باند ۲۵۰ درجه و ۲۴ نات برای باند ۷۰ درجه در ماه اوت رخ داده بود [۴]. بررسی تجزیه و تحلیل داده‌های باد برای طراحی باند فرودگاه توسط روبرتو بلازیو در سال ۲۰۱۴ انجام شد. هدف از این تحقیق ارائه یک روش کاربردی، برای تجزیه و تحلیل داده باد برای تصحیح جهت‌گیری باندهای فرودگاه است. در این پژوهش از بیش از ۹۰۰۰۰ داده باد مشاهداتی استفاده گردید. طبق این مقاله جهت‌گیری صحیح باندها اجزای باد مخالف را به حداقل می‌رساند در نتیجه ایمنی فرودگاه افزایش می‌یابد [۱۲]. مقایسه دو مدل ریزمقیاس، DELTA<sup>۵</sup> و SDSM<sup>۶</sup> در شبیه‌سازی و پیش‌بینی سرعت باد متوسط در ایستگاه زابل، با استفاده از خروجی‌های مدل‌های اقلیمی جهانی CGCM3<sup>۷</sup> و CanESM2<sup>۸</sup> تحت سناریوهای مختلف توسط صلاحی و پودینه در سال ۲۰۲۲ انجام شد [۱۳]. نتایج نشان می‌دهد که مدل دلتا دقت بهتری نسبت به مدل SDSM دارد و سرعت باد متوسط در دوره‌های آینده افزایش خواهد یافت. محمد خلیل‌نژاد و همکارانش در سال ۱۳۹۹ به مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر ضریب استفاده از باند فرودگاه به روش FAA<sup>۹</sup> در فرودگاه زاهدان پرداختند. در مقاله حاضر با استفاده از گلبادهای قطبی شانزده جهتی، ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه زاهدان در دو دوره آماری ۲۰۱۷-

<sup>۴</sup> Weather Research And Forecasting

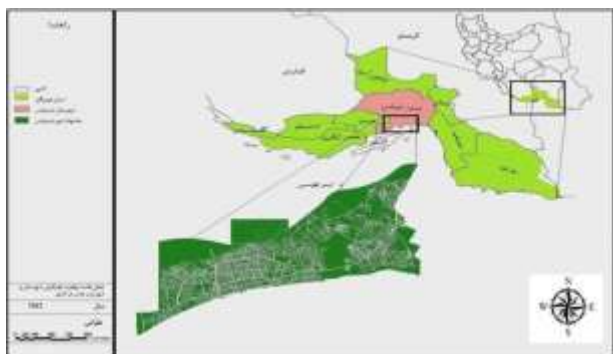
<sup>۵</sup> Delta Change Factor

<sup>۶</sup> Statistical Downscaling Model

<sup>۷</sup> Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model

<sup>۸</sup> Canadian Earth System Model

<sup>۹</sup> Federal Aviation Administration



شکل ۳ - موقعیت جغرافیایی استان هرمزگان و شهر بندرعباس  
[۱۷]

### مواد و روش‌ها

الف - داده‌های مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از:

۱- داده‌های دیدبانی جهت و سرعت باد: در این پژوهش از داده‌های سرعت و جهت باد ایستگاه مشاهداتی بندرعباس در دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۲ استفاده شده است. باتوجه به اینکه داده‌های ایستگاه هواشناسی به صورت سه ساعته توسط این سازمان ارائه می‌شود، این داده‌ها استانداردسازی گردید.

۲- داده‌های بزرگ مقیاس<sup>۱۰</sup> AOGCM و<sup>۱۱</sup> NCEP:

باتوجه به ارزیابی نسل دوم مدل کانادایی سیستم زمین یا CanESM2 که توسط مرکز کانادایی مدل‌سازی اقلیم<sup>۱۲</sup> CCCMA ارائه شده است به عنوان مدل گردش عمومی جو<sup>۱۳</sup> GCM استفاده گردید. اگرچه مدل‌های GCM برای بررسی پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده مناسب هستند، خروجی آن‌ها بر اساس شبکه‌های بزرگ مقیاس ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتری هستند [۱۸]. به دلیل تفکیک مکانی پایین خروجی این مدل‌ها برای بررسی اثرات تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای قابل کاربرد نیست. مناسب‌ترین ابزار برای ایجاد ارتباط بین مقیاس منطقه‌ای یا محلی و مدل‌های بزرگ مقیاس GCM ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی است. بدین منظور لازم است رابطه کمی بین متغیرهای مقیاس همدیدی/مدل گردش عمومی جو و متغیرهای مشاهداتی با مقیاس خرد (محلی/منطقه‌ای) ایجاد شود [۱۹] که می‌تواند به صورت رابطه  $Y=f(x)$  باشد.

در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریا قرار دارد. فرودگاه بندرعباس با شهرهای کیش، اصفهان، اهواز، فرودگاه بین‌المللی امام خمینی، فرودگاه مهرآباد تهران، چابهار، شیراز و مشهد ارتباط هوایی دارد. در مجموع، باید گفت که ظرفیت و کیفیت تأسیسات فرودگاه بین‌المللی بندرعباس، به هیچ وجه شایسته یک بندر تجاری بزرگ که نقش اساسی در ترانزیت جهانی کالا در کشور را دارا نیست. این فرودگاه تنها ۲۴۰۰ مترمربع زیربنا داشته و فقط دارای ۲ پایانه و ۳ پارکینگ هواپیما است. مساحت انبارهای فرودگاه نیز از ۶۰۰ متر تجاوز نمی‌کند. لازم به ذکر است که طرح توسعه تجهیزات و پایانه‌های مسافری و باری این فرودگاه در حال اجرا است. شهر بندرعباس که در جنوب استان می‌شود؛ بنابراین شیب عمومی شهر در راستای شمال به جنوب است. آب‌وهوای این شهر بیابانی است و رطوبت در آن بالاست. در بندرعباس میانگین بارندگی کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر است و طول دوره فصل خنک در آن کوتاه است. هوای شهر بندرعباس گرم و مرطوب بوده و بیشترین درجه حرارت در تابستان‌ها ۴۹ درجه بالای صفر و کمترین آن، در زمستان‌ها ۵ درجه بالای صفر است. نوار ساحلی استان هرمزگان دارای جایگاه ممتازی در جغرافیای اقتصاد ملی است. به نحوی که به دلیل موقعیت ویژه مکانی و برخورداری از امکانات مناسب ترابری، متجاوز از ۴۰ درصد از واردات و صادرات غیرنفتی کشور از طریق بندرعباس انجام می‌شود و این بندر بزرگ‌ترین مبدأ ورود و خروج کالا در کشور است (طرح آمایش نوار ساحلی استان هرمزگان ۱۳۸۵). بندرعباس با دارا بودن دو بندر شهید باهنر و بندر شهید رجایی به عنوان دو بندر بزرگ تجاری کشور از اهمیت خاصی در اقتصاد ایران برخوردار است. در میان بندرهای کشور، عملکرد بندرعباس به عنوان بندر تجاری بخصوص بعد از جنگ تحمیلی رشد فزاینده‌ای یافته و آن را به مهم‌ترین لنگرگاه و بارانداز تجاری کشور در جنوب ایران تبدیل نموده است. خلیج فارس گذرگاه دریایی مهمی است که ایران را از طرف جنوب و از طریق استان‌های هرمزگان و بوشهر به آب‌های آزاد جهان مربوط می‌کند. از آنجایی که این خلیج بر سر راه دریایی خاورمیانه واقع شده، اهمیت نظامی و ژئوپلیتیکی ویژه‌ای در منطقه خاورمیانه دارد. از طرف دیگر وجود این منابع عظیم آبی امکانات بالقوه و بالفعل بسیار جالب توجهی را در امر توسعه ایران‌گردی و جهانگردی فراهم آورده‌اند. [۱۶].

<sup>۱۰</sup> Atmosphere-Ocean General Circulation Model

<sup>۱۱</sup> National Center For Environmental Prediction

<sup>۱۲</sup> General Circulation Model

<sup>۱۳</sup> Canada Climate Change Model Data

فرودگاه توسط مؤلفه باد مقابل محدود نمی‌شود و این مقدار نباید کمتر از ۹۵٪ بشود [۲۲]. ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس در دو دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۲ و ۲۰۵۰-۲۰۲۴ محاسبه گردید. برای این منظور، از یک نوع سیستم مختصات قطبی گلباد<sup>۱۵</sup> در شکل ۷ که مختص محاسبات ضریب استفاده از باند پرواز است، استفاده گردید. در واقع این گلباد استاندارد شامل یک‌رشته دایره‌های هم‌مرکز است که با خطوط شعاعی متقارن قطع شده‌اند. خطوط شعاعی مزبور نشان‌دهنده میزان بزرگی و سرعت باد است، چنانچه فضای بین هر دو خط شعاعی متوالی نشان‌دهنده جهت باد است [۶]. در این مطالعه از گلبادهای قطبی شانزده جهتی استفاده گردیده است که در آن‌ها دایره مرکزی گلباد، مقدار بادهای آرام کمتر از ۱ نات در ساعت را نشان می‌دهد. دایره اول، درصد بادهای با سرعت ۱ تا ۵ نات را نشان می‌دهد. دایره دوم، حداکثر سرعت باد جانبی مجاز بر محور باند را نشان می‌دهد. در این پژوهش، بادهای جانبی با سرعت کمتر از ۱۳ نات در ساعت، مجاز در نظر گرفته شده است. سرعت یک نات (knot) معادل ۰/۵۱۴۴۴ متر بر ثانیه است که برابر با یک مایل دریایی در ساعت می‌باشد. این واحد معمولاً در هواشناسی و ناوبری برای بیان سرعت باد یا جریان استفاده می‌شود [۹].

دایره سوم، به بادهای با سرعت حداکثر ۲۰ نات، دایره چهارم به بادهای با حداکثر سرعت ۲۵ نات و دایره پنجم به بادهای با سرعت بیشتر از ۲۵ نات اختصاص یافته است. درصد زمانی که باد با سرعت و جهت معینی می‌وزد، بر روی این گلباد و در قطعه مربوطه نوشته می‌شود. برای محاسبه ضریب استفاده از باند فعلی این فرودگاه (باند ۰۳-۲۱) از یک نوار کاغذی شفاف که بر روی آن سه خط موازی به فواصل مساوی رسم شده است، استفاده گردید. خط میانی نشان‌دهنده خط مرکزی باند پرواز و فاصله دو خط طرفین از خط میانی معادل مقدار باد جانبی مجاز (۱۳ نات) را (با مقیاس) نشان می‌دهد. این نوار شفاف طوری روی گلباد قرار گرفت که خط میانی آن از مرکز گلباد گذشته و دو سر این خط روبروی ۲۱۰ درجه و ۳۰ درجه واقع شود. بدین ترتیب مجموع اعداد روی قطعه‌های واقع بین خطوط طرفین نوار شفاف (زیر سطح نوار شفاف)، محاسبه گردید. در مواردی که قسمتی از یک قطعه زیر نوار شفاف و

در مدل‌سازی ریزمقیاس‌نمایی آماری، رابطه‌ای تجربی میان متغیرهای همدیدی (X) و متغیر هدف (Y) برقرار می‌شود که تابع انتقال آن از داده‌های مشاهداتی استخراج می‌گردد. در این پژوهش، از نسخه ۵ مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های سمت و سرعت باد ایستگاه بندرعباس استفاده شد. این مدل که توسط [۱۹] توسعه یافته است، ابزاری کاربردی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای و محلی محسوب می‌شود و شامل چهار مرحله اصلی انتخاب متغیرهای همدیدی از پایگاه NCEP، واسنجی مدل، اعتبارسنجی نتایج، و تولید سناریوهای آینده است.

در این مطالعه، مدل CanESM2 به‌عنوان منبع داده‌های بزرگ‌مقیاس انتخاب شد؛ زیرا یکی از معدود مدل‌های گردش عمومی جو است که داده‌های روزانه سازگار با نرم‌افزار SDSM را برای سناریوهای RCP (RCP<sub>2/6</sub>، RCP<sub>4/5</sub> و RCP<sub>8/5</sub>) ارائه می‌دهد. سایر مدل‌ها یا فاقد داده‌های روزانه هستند یا نیاز به پردازش و تبدیل قالب دارند که استفاده مستقیم از آن‌ها در SDSM را محدود می‌سازد [۲۰].

برای انتخاب متغیرهای همدیدی مناسب، از ابزار Screen Variables در نرم‌افزار SDSM بهره گرفته شد. این ابزار با بررسی همبستگی خطی میان متغیرهای همدیدی و متغیر وابسته (سمت و سرعت باد)، متغیرهایی با بیشترین ضریب همبستگی را برای ورود به مدل انتخاب نمود. برای اعتبارسنجی داده‌های مشاهداتی برای کالیبراسیون در بازه ۱۹۸۲-۲۰۰۵ و برای اعتبارسنجی مستقل در بازه ۲۰۰۶-۲۰۲۱ استفاده شدند.

### اعتبارسنجی

برای ارزیابی عملکرد مدل شاخص‌های MAE، RMSE، bias و ضریب تعیین R<sup>2</sup> محاسبه شدند. همچنین نمودارهای scatter observed vs simulated<sup>۱۶</sup> و QQ<sup>۱۴</sup> برای هر دوره تولید و گزارش شد.

این داده‌ها با توجه به مختصات جغرافیایی ایستگاه بندرعباس از پایگاه داده مدل‌های گردش عمومی جو کشور کانادا به آدرس اینترنتی [۲۱] اخذ گردید.

ب- محاسبه ضریب استفاده از باند<sup>۱۴</sup>: ضریب استفاده از باند نشان‌دهنده درصد زمانی است که طی آن باند مورد استفاده

<sup>۱۴</sup> Utilization Coefficient Of The Runway

<sup>۱۵</sup> Windrose

<sup>۱۶</sup> quantile-quantile

وجود دارد. در بیشتر جهات سرعت باد کمتر از  $10\text{ m/s}$  (20knot) است. جهات شمال غربی دارای کمترین فراوانی می‌باشند.

از جهت جنوب تا شمال غربی فراوانی باد روند کاهشی داشته، سپس تا شمال افزایش و پس از آن تا شرق روند کاهشی دارد. در شکل ۶ گلبادهای ماهانه ایستگاه بندرعباس جهت مقایسه ارائه شده است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که جهت باد غالب در تمامی ماه‌ها به جز دسامبر و ژانویه جنوبی است. در دو ماه مذکور جهت باد غالب شمالی است از اواسط زمستان سرعت‌های بیش از  $10\text{ m/s}$  از جهات جنوبی شروع شده و تا اوایل پاییز ادامه پیدا می‌کند. بیشترین فراوانی در این ماه‌ها مربوط به بازه سرعت  $12-20\text{ knot}$  ( $6-10\text{ m/s}$ ) است که از جهت جنوبی می‌وزد. بادهای غربی از اواسط بهار تضعیف شده و تا اواخر پاییز تقریباً از این جهت بادی به منطقه بندرعباس وزیده نمی‌شود. روند کلی تغییرات بر روی سرعت‌ها در فصول سال تقریباً یکسان است؛ با این تفاوت که مقادیر سرعت‌ها از اوایل بهار مقداری کاهش یافته و از اکتبر به بعد افزایش می‌یابد. سرعت‌های بیش از  $4\text{ m/s}$  (8knot) دارای احتمال وقوع ۵۰٪ در ماه‌های مختلف است. در زمستان بادهای غربی نظام‌مند که جهت آن‌ها در تبعیت از خط ساحلی و کوه‌های همسو با آن تبدیل به بادهای جنوب غربی شده و به واسطه‌ی اثر کوه‌ها تضعیف هم شده‌اند، در روز با برهم‌نهی آن با نسیم دریا ایجاد بادهای غالب جنوبی و جنوب غربی را در بندرعباس نموده‌اند. بادهای شمالی و شمال شرقی در این فصل ناشی از حاکمیت نظام پرفشار سرد سیبری بر روی این منطقه و در این فصل است، ولی این بادهای در روزبه دلیل جهت مخالف با نسیم روزانه ضعیف بوده و در شب به علت همخوانی با نسیم شبانه تقویت شده‌اند؛ در نتیجه آنچه در گلباد کلی به‌عنوان باد غالب در این فصل ظاهر شده است کاملاً نسیم خشکی و دریای تشدید شده به‌واسطه‌ی کوه‌های پشت این منطقه است [۲۴]. باد غالب در سواحل غرب خلیج فارس غرب - شمال غربی بوده که با حرکت به سمت مرکز خلیج فارس به سمت غرب میل کرده و در نزدیکی جزیره قشم به جنوب غربی متمایل شده و در بندرعباس و تنگه هرمز به‌صورت غیرقابل‌انتظاری جنوبی می‌شود. باوجود اینکه با پیشروی از غرب به شرق خلیج فارس از شدت بادهای نظام‌مند غالب در غرب منطقه کاسته می‌شود، مؤلفه غالب دیگری در امتداد عمود بر سواحل

قسمتی خارج از آن نوار واقع شود، در این صورت مقدار مربوطه متناسب با کل سطح قطعه محاسبه می‌گردد.

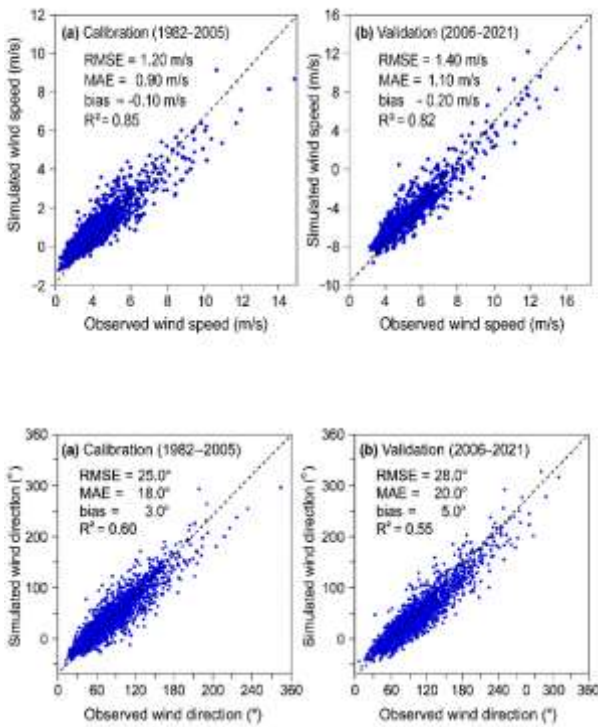
همان‌گونه که بیان شد، ضریب استفاده از باند فرودگاه بایستی حداقل ۹۵٪ باشد؛ یعنی سطح زیر نوار شفاف دارای پوشش ۹۵٪ باشد. براین‌اساس اگر ضریب استفاده از باند موجود محاسبه شده کمتر از میزان مزبور باشد، نیاز به طراحی و ساخت باند دیگری به‌صورت متقاطع و یا غیر متقاطع با باند موجود افزایش می‌یابد. در این صورت لازم است که نوار شفاف دوم را طوری روی گلباد مزبور قرار دهیم که اکثر اعداد بیرون از نوار شفاف اول، داخل نوار شفاف باند دوم قرار گیرد. بدین ترتیب جهت مناسب باند دوم به دست می‌آید. باید توجه داشت که اگر مجموع ضرایب استفاده از باند اول و دوم (سطح زیر نوار شفاف اول بعلاوه سطح زیر نوار شفاف دوم به استثناء قسمت مشترک) ۹۵٪ و یا بیشتر شود، کافی خواهد بود. در غیر این صورت محاسبه جهت باند برای باند سوم بررسی می‌شود. البته ممکن است قرارگرفتن باند پرواز به طور کامل در جهت تعیین شده به‌وسیله گلباد به روش پیش گفته، امکان‌پذیر نباشد. در این صورت تعدیل جزئی در جهت تعیین شده به علت دلایل زیر الزامی است:

- ۱- موانع: برای پیاده‌کردن باند پرواز، موجود نبودن موانع مهم‌تر از باند جانبی مجاز است. در چنین وضعیتی تأمین منطقه فرود با موانع کمتر نسبت به منطقه با پوشش باد بیشتر، اولویت دارد.
- ۲- شیب زیاد: جهت باند پرواز ممکن است به علت شیب زیاد و عملیات خاکی تعدیل گردد.
- ۳- آزار و سروصدا: در صورتی که باند پرواز در امتداد مناطق مسکونی و مناطق عمومی طوری واقع شود که این مناطق در محدوده برخاست هواپیما واقع گردند، تعدیل جهت باند پرواز در صورتی که پایین بودن شدت باد مناسب است [۲۳].

### یافته‌های تحقیق

تحلیل باد غالب و تندبادهای ایستگاه بندرعباس در دوره مشاهداتی:

گلباد کلی ایستگاه بندرعباس در دوره ۲۰۲۱-۱۹۵۷ در شکل ۴ نشان داده شده است. باد غالب در این ایستگاه جنوبی است پس از آن جهات جنوب - جنوب غربی، شمال، شمال - شمال شرقی دارای بیشترین فراوانی باد می‌باشند. سرعت بیشتر از  $12\text{ m/s}$  (24knot) فقط در جهت‌های جنوب و با فراوانی ۰/۲٪



شکل ۵: مقایسه کمیت‌های داده‌های مشاهداتی و مدل ایستگاه بندرعباس در دوره کالیبراسیون (۱۹۸۲-۲۰۰۵) و اعتبارسنجی (۲۰۰۶-۲۰۲۱)

ظاهر شده که شدت و تداوم سالانه آن به سوی شرق خلیج فارس افزایش می‌یابد به طوری که در بندرعباس به دلیل موقعیت امتداد ساحل، این مؤلفه باد غالب منطقه را تعیین می‌نماید. به طور کلی الگوی باد غالب در مناطق مختلف خلیج فارس به جهت و موقعیت خط ساحلی و همچنین شرایط فصلی بادها و عوارض ساحلی (مانند کوه‌ها) بستگی دارد [۲۴].



شکل ۴ - مقایسه گلباد مشاهداتی ماهانه ایستگاه فرودگاهی بندرعباس برای دوره ۱۹۵۷-۲۰۲۱

متغیرهای همدیدی اولیه با استفاده از ابزار Screen Variables در SDSM انتخاب شدند؛ متغیرهایی که بیشترین همبستگی خطی با سرعت و سمت باد مشاهداتی داشتند وارد مدل شدند. جهت محاسبه ضریب استفاده باند برای هر بازه زمانی (روز/ماه)، گلباد ۱۶ جهتی استخراج شد. برای هر بخش رز با جهت مرکزی  $\theta$  و سرعت متوسط  $V$ ، مؤلفه عرضی باد با رابطه زیر محاسبه گردید  $V_{cross} = V \cdot \sin(|\theta - \theta_b|)$  که  $\theta_b$  جهت باند (۳۰° برای باند ۰۳ و ۲۱۰° برای باند ۲۱) است. بخش‌هایی که  $V_{cross} \leq 13$  knot تلقی و درصد وقوع آن‌ها جمع زده شد تا ضریب استفاده باند به دست آید. در مواردی که بخشی به صورت جزئی زیر آستانه قرار می‌گرفت، تناسب سطح همان بخش در محاسبه لحاظ شد (روش مشابه توضیح داده شده در FAA).

اعتبارسنجی و پارامترهای SDSM برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SDSM، داده‌های مشاهداتی ایستگاه بندرعباس در دوره کالیبراسیون (۱۹۸۲-۲۰۰۵) و اعتبارسنجی (۲۰۰۶-۲۰۲۱) استفاده شد. آمار کارایی شامل RMSE، MAE، bias و ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای سرعت و سمت باد محاسبه و در جدول ۱ درج گردید و محاسبه گام به گام ضریب استفاده باند در جدول ۲ آورده شده است. همچنین نمودارهای مقایسه observed vs simulated به همراه خط ۱:۱ برای هر متغیر در شکل ۵ آورده شده است تا دقت شبیه‌سازی بصری و کمی نشان داده شود. پیش‌پردازش و انتخاب متغیرهای همدیدی خروجی روزانه CanESM2 از پایگاه رسمی بارگیری شد. پردازش شامل هم‌زمان‌سازی تقویم، تبدیل واحدها، و پرکردن شکاف‌های زمانی با روش میانگین مجاور بود.

جدول ۱: اعتبارسنجی (کالیبراسیون ۱۹۸۲-۲۰۰۵؛ اعتبارسنجی ۲۰۲۱-۲۰۰۶)

تغییر	دوره	RMSE	MAE	bias	R <sup>2</sup>
سرعت باد	کالیبراسیون ۲۰۰۵-۱۹۸۲ (m/s)	۰/۶۰	۰/۴۵	۰/۰۲±	۰/۹۲
سرعت باد	اعتبارسنجی ۲۰۲۱-۲۰۰۶ (m/s)	۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۰۳±	۰/۸۹
جهت باد (درجه)	کالیبراسیون ۲۰۰۵-۱۹۸۲	۱۱	۸	۰/۵+	۰/۸۰
جهت باد (درجه)	اعتبارسنجی ۲۰۲۱-۲۰۰۶	۱۳	۹/۵	۰/۸+	۰/۷۷

جدول ۲: نمونه محاسبه گام به گام ضریب استفاده باند (نمونه عددی ماهانه)

جهت گلباد (درجه)	میانگین درصد وقوع (%)	سرعت (knot)	مؤلفه عرضی V <sub>cross</sub> = V·sin(Δθ) (knot)	قابل استفاده (V <sub>cross</sub> ≤ 13)
۱۵۰	۶/۳۵	۸/۵	8/5·sin(30°)=4/25	بله
۱۶۰	۶/۴۸	۹/۲	9/2·sin(20°)=3/15	بله
۱۷۰	۶/۱۲	۱۰	10/0·sin(10°)=1/74	بله
۱۸۰	۹/۱۶	۷/۸	7/8·sin(0°)=0	بله
۱۹۰	۱۱/۸۵	۱۱/۲	11/2·sin(10°)=1/94	بله
۲۰۰	۴	۶/۵	6/5·sin(30°)=3.25	بله
۲۱۰	۳	۱۴	14·sin(30°)=7.00	بله
۳۳۰	۰/۴۵	۱۶	16·sin(120°)=13/86	خیر
سایر جهات (مجموع)	۵۲/۰۹	—	—	—
جمع	۹۴/۰۴	—	—	—

### نتایج اعتبارسنجی

جدول ۱ مقادیر شاخص‌های مهارت پس از اجرای مراحل کالیبراسیون و اصلاح را نشان می‌دهد (کالیبراسیون ۱۹۸۲-۲۰۰۵؛ اعتبارسنجی ۲۰۲۱-۲۰۰۶). در اعتبارسنجی مدل، دقت سرعت قابل قبول است (RMSE ≈ 0/6-0/75 m/s)؛ (R<sup>2</sup> ≈ 0/89-0/92)، دقت جهت باد اندکی حساس است (RMSE ≈ 11-13°)؛ (R<sup>2</sup> ≈ 0/77-0/80). اعداد پس از اعمال اصلاحات کالیبراسیون فصلی و بیاس کورکشن به دست

آمده‌اند. جهت محاسبه ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس (باند ۰۳-۲۱)، ابتدا داده‌های سمت و سرعت باد ایستگاه فرودگاهی بندرعباس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این راستا از نتایج گلبادهای شانزده جهتی روزانه آماری ۱۹۸۲-۲۰۲۱ و گلبادهای مربوط به سه سناریوی RCP<sub>2/6</sub>، RCP<sub>4/5</sub>، RCP<sub>8/5</sub> در دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۵۰ استفاده گردید. گلبادهای مزبور در شکل ۶، ارائه گردیده است و ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس (باند ۰۳-۲۱) در دوره آماری ۱۹۸۲-۲۰۲۱ و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴-۲۰۵۰) بر اساس سه سناریوی RCP<sub>2/6</sub>، RCP<sub>4/5</sub>، RCP<sub>8/5</sub> در شکل ۷ محاسبه گردیده است. با تجزیه و تحلیل گلبادهای مندرج در شکل ۶، وضعیت تغییرات سمت و سرعت باد این فرودگاه تا سال ۲۰۵۰ بندرعباس در دوره آماری ۱۹۸۲-۲۰۲۱ و دوره پیش‌بینی ۲۰۲۴-۲۰۵۰ بر اساس سه سناریوی RCP<sub>2/6</sub>، RCP<sub>4/5</sub> و RCP<sub>8/5</sub> مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه گردید.

الف - بر اساس جدول ۳ و با مقایسه سرعت وزش بادهای ایستگاه فرودگاهی بندرعباس در دوره آماری ۱۹۸۲-۲۰۲۱ نسبت به دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴-۲۰۵۰) تغییرات به شرح زیر است:

۱- تغییراتی که تا سال ۲۰۵۰ در سرعت وزش بادهای این ایستگاه رخ می‌دهند در هر سه سناریوی مورد مطالعه تا حدودی مشابه است.

۲- پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که بادهای آرام این ایستگاه در سناریوهای RCP<sub>2/6</sub> و RCP<sub>8/5</sub> به ترتیب ۱/۳۷٪ و ۲/۳۸٪ کاهش و در سناریوی RCP<sub>4/5</sub> ۱/۶۵ درصد افزایش می‌یابد.

۳- بادهای با سرعت ۵-۱۳ نات در هر سه سناریو با افزایش مواجه شده که بیشترین افزایش در RCP<sub>4/5</sub> برابر با ۷/۴۴٪ و کمترین افزایش در سناریوی RCP<sub>8/5</sub> برابر با ۶/۵۸٪ است.

۴- بادهای با سرعت ۱۳-۵ نات در هر سه سناریو با کاهش مواجه می‌شوند که بیشترین کاهش مربوط به سناریوی RCP<sub>4/5</sub> برابر با ۳/۹۴٪ و کمترین کاهش مربوط به سناریوی RCP<sub>8/5</sub> برابر با ۲/۲٪ است.

۵- بادهای با سرعت ۲۰-۱۳ در هر سه سناریو با کاهش روبرو می‌شوند که بیشترین کاهش مربوط به سناریوی RCP<sub>2/6</sub> برابر با ۲/۲۶٪، کمترین کاهش مربوط به سناریوی RCP<sub>4/5</sub> برابر با ۱/۶۴٪ است.

کاهش در  $RCP_{4/5}$  برابر با  $۶/۷۳\%$  و کمترین کاهش در  $RCP_{8/5}$  برابر با  $۵/۳۷\%$  است.

۳- باد نایب غالب این ایستگاه در دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱ از سمت  $۱۸۰$  درجه می‌وزد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که در سناریو  $RCP_{2/6}$  جهت وزش باد بدون تغییر خواهد بود و در سناریوی  $RCP_{4/5}$  با  $۳۰$  درجه تغییر از سمت  $۱۵۰$  درجه و در سناریوی  $RCP_{8/5}$  با  $۱۰$  درجه کاهش از سمت  $۱۷۰$  درجه خواهد وزید. همچنین در سه سناریوی مورد مطالعه، میزان وزش باد در  $RCP_{4/5}$  و  $RCP_{8/5}$  به ترتیب با  $۴/۷\%$  و  $۳/۲\%$  کاهش مواجه می‌شود.

۴- بادهای قرینه غالب این ایستگاه تا سال ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد. به طوری که بر اساس سه سناریوی مورد مطالعه از میزان وزش این بادها در محدوده  $۳/۱۵\%$  تا  $۳/۲۲\%$  کاهش می‌یابد.

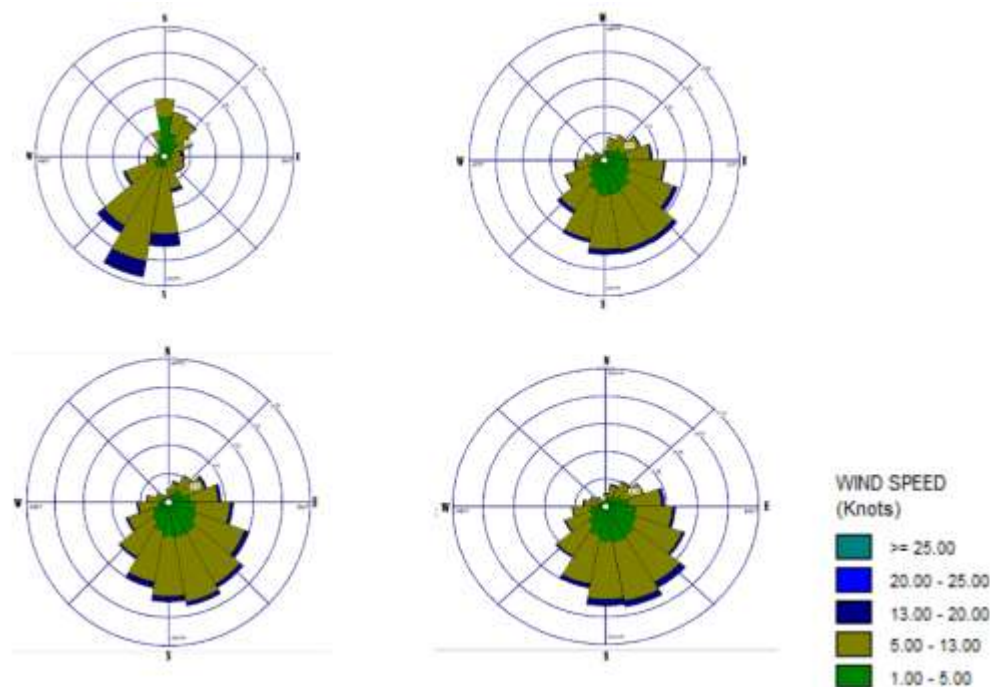
۵- بررسی گلبادهای مربوط به  $RCP$  نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ از میزان وزش بادهای  $SSW$  و  $SW$  کاسته می‌شود. در حالی که بادهای  $SSE$  افزایش می‌یابد. ضریب استفاده از باند در سناریوهای  $RCP_{2/6}$ ،  $RCP_{4/5}$  و  $RCP_{8/5}$  به ترتیب  $۲/۴۱\%$ ،  $۱/۷۸\%$  و  $۱/۹۷\%$  افزایش یافته است.

۶- پیش‌بینی‌ها بر اساس هر سه سناریو مورد مطالعه نشان می‌دهد که وزش بادهای با سرعت بیشتر از  $۲۰$  نات به صفر نزدیک می‌شود.

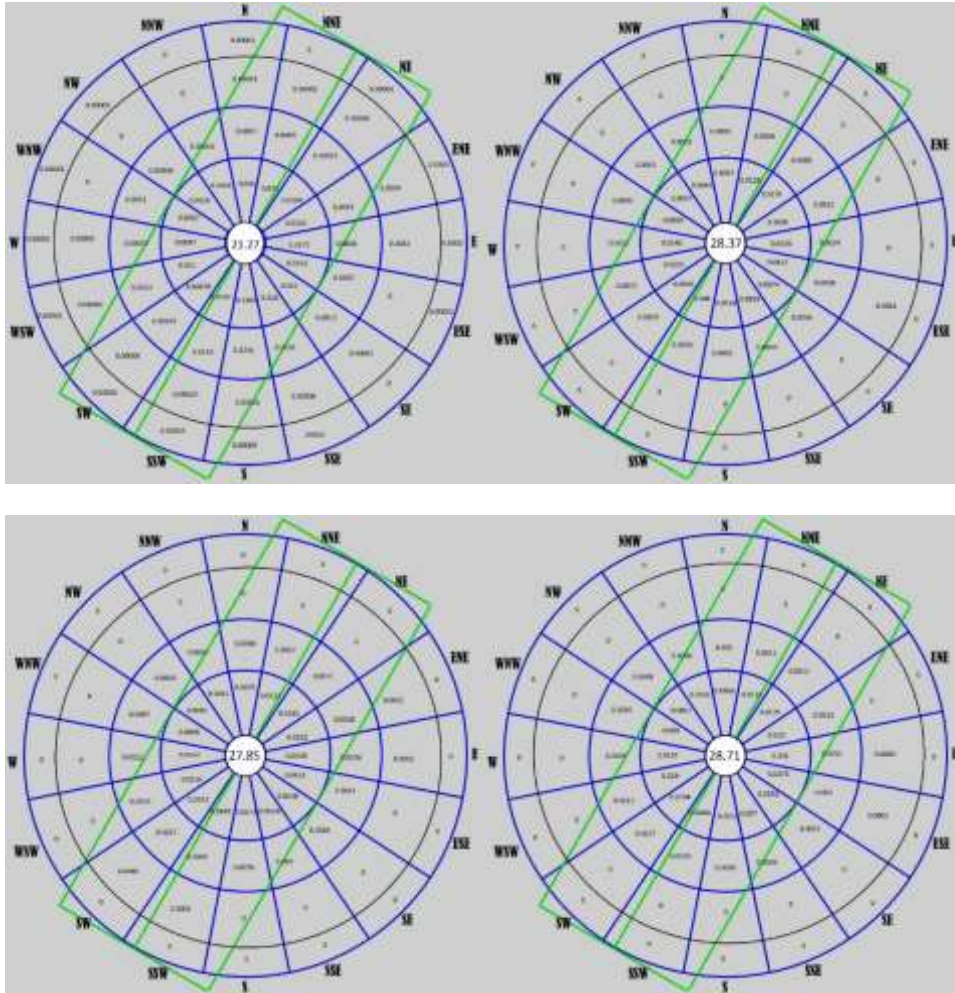
ب- براساس جدول ۳ و با مقایسه جهت وزش بادهای ایستگاه فرودگاهی بندرعباس در دوره آماری ۱۹۸۲-۲۰۲۱ نسبت به دوره پیش‌بینی ۲۰۲۴-۲۰۵۰ تغییراتی به شرح زیر قابل ذکر است.

۱- پیش‌بینی‌ها بر اساس سه سناریو مورد مطالعه نشان می‌دهد که برآیند جهت باد این ایستگاه تا سال ۲۰۵۰ نسبت به دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱ دارای تغییراتی به در محدوده  $۱۵۰$  تا  $۱۸۰$  درجه است.

۲- باد غالب این ایستگاه در دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱،  $SSW$  و برابر با  $۱۹۰$  درجه است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که در سناریو  $RCP_{2/6}$  جهت وزش این باد  $۴۰$  درجه تغییر نموده و از سمت  $۱۵۰$  درجه خواهد وزید. در سناریوی  $RCP_{4/5}$  با  $۲۰$  درجه کاهش از  $۱۷۰$  درجه و در سناریوی  $RCP_{8/5}$  با  $۳۰$  درجه کاهش از  $۱۶۰$  درجه خواهد وزید. همچنین میزان وزش باد غالب در هر سه سناریوی مورد مطالعه با کاهش همراه است. بیشترین



شکل ۶- گلبادهای روزانه ایستگاه بندرعباس به ترتیب از بالا از راست به چپ در دوره آماری ۱۹۸۲-۲۰۲۱ و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴-۲۰۵۰) بر اساس سه سناریوی  $RCP_{2/6}$ ،  $RCP_{4/5}$  و  $RCP_{8/5}$  منبع (نگارنده)



شکل ۷- ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس (باند ۰۳-۲۱) به ترتیب از بالا از راست به چپ در دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۲ و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴-۲۰۵۰) بر اساس سه سناریوی  $RCP_{2/6}$ ,  $RCP_{4/5}$  و  $RCP_{8/5}$

جدول ۳: وضعیت سرعت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۲ و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴-۲۰۵۰) بر اساس سه سناریوی  $RCP_{8.5}$  و  $RCP_{4.5}$  و  $RCP_{2.6}$

سرعت باد	بادهای آرام	۵-۱ نات	۵-۱۳ نات	۱۳-۲۰ نات	۲۰-۲۵ نات	بیشتر از ۲۵ نات	دوره
							۲۰۲۱-۱۹۸۲
							$RCP_{2.6}(2024-2050)$
							تغییرات نسبت به دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱
							$RCP_{4.5}(2024-2050)$
							تغییرات نسبت به دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱
							$RCP_{8.5}(2024-2050)$
							تغییرات نسبت به دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱

جدول ۴ - وضعیت جهت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری (۲۰۲۱-۱۹۸۲) و دوره پیش‌بینی (۲۰۵۰-۲۰۲۴) بر اساس سه سناریوی

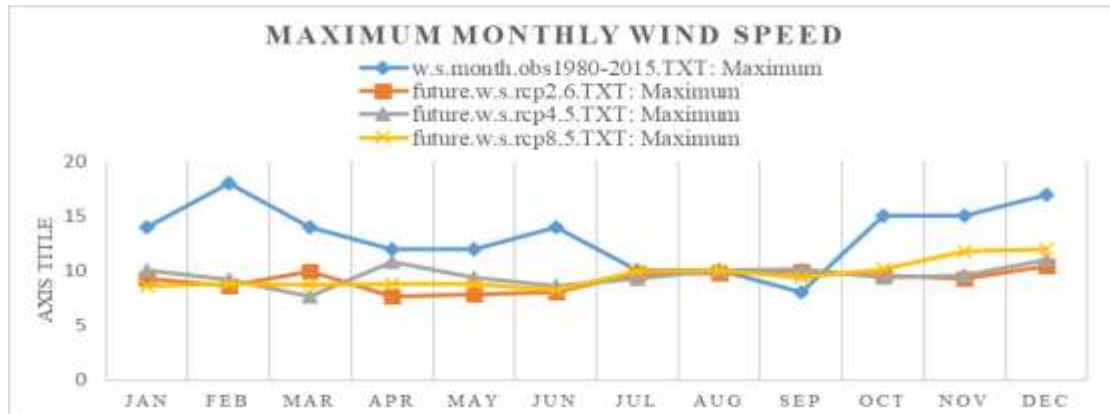
جهت باد دوره	RCP <sub>8/5</sub> و RCP <sub>4/5</sub> RCP <sub>2/6</sub>			ضریب استفاده از باند موجود (باند ۰۳-۲۱)
	باد غالب/ درصد	باد نایب غالب/ درصد	قرینه باد غالب/ درصد	
۱۹۸۲-۲۰۲۱	۱۹۰ درجه ٪۱۱/۸۵	۱۸۰ درجه ٪۹/۱۶	۱۰ درجه ٪۳/۶	٪۹۴/۰۴
RCP <sub>2,6</sub> (2024-2050)	۱۵۰ درجه ٪۶/۳۵	۱۸۰ درجه ٪۵/۸	۳۳۰ درجه ٪۰/۴۵	٪۹۶/۴۵
تغییرات نسبت به دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱	۴۰ درجه ٪۵/۵ کاهش	۰ درجه ٪۴/۸ کاهش	۴۰ درجه ٪۳/۱۵ کاهش	٪۲/۴۱ افزایش
RCP <sub>4,5</sub> (2024-2050)	۱۷۰ درجه ٪۶/۱۲	۱۵۰ درجه ٪۵/۹	۳۵۰ درجه ٪۰/۳۸	٪۹۵/۸۶
تغییرات نسبت به دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱	۲۰ درجه ٪۶/۷۳ کاهش	۳۰ درجه ٪۴/۷ کاهش	۲۰ درجه ٪۳/۲۲ کاهش	٪۱/۸۲ افزایش
RCP <sub>8,5</sub> (2024-2050)	۱۶۰ درجه ٪۶/۴۸	۱۷۰ درجه ٪۵/۹۶	۳۴۰ درجه ٪۰/۴۵	٪۹۶/۰۱
تغییرات نسبت به دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱	۳۰ درجه ٪۵/۳۷ کاهش	۱۰ درجه ٪۳/۲ کاهش	۳۰ درجه ٪۳/۱۵ کاهش	٪۱/۹۷ افزایش

۲- با توجه به نمودار ۲ واریانس سرعت باد ایستگاه بندرعباس واریانس هر سه سناریو حدوداً با یک‌میزان تغییر همراه است؛ اما در فصل‌های زمستان و بهار تفاوت زیادی را بین دوره پیش‌بینی ۲۰۲۴-۲۰۵۰ و دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱ شاهد هستیم.

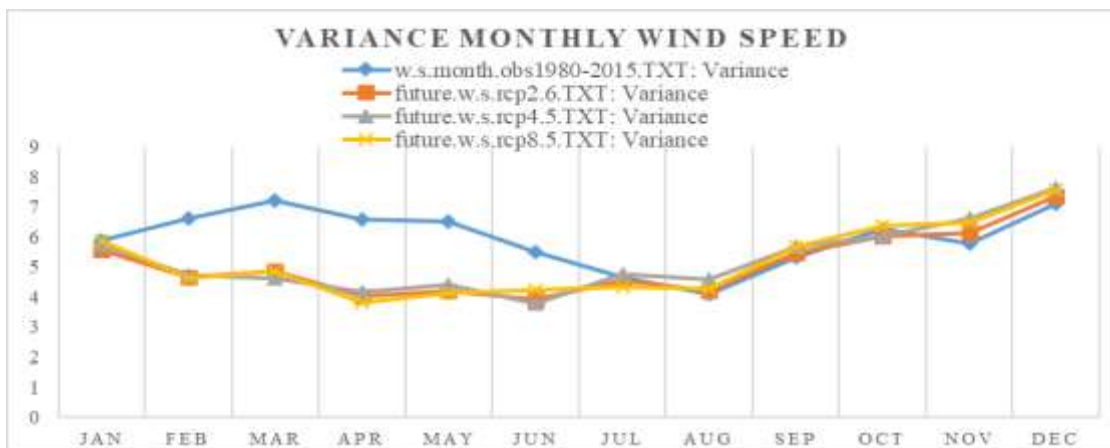
۳- نمودار ۳ میانگین سرعت باد در هر دو دوره را به ما نشان می‌دهد. همان‌طور که شاهد هستیم، میانگین سرعت باد در هر سه سناریو نسبت به دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱ کمتر بوده و از طرفی میانگین سرعت باد در فصل تابستان بیشتر از فصول دیگر است و بیشینه آن در ماه اوت نزدیک به ۴ متر بر ثانیه است.

ج- بر اساس نمودار ۱، ۲ و ۳ مقایسه ماهانه میانگین، واریانس و بیشینه سرعت باد در ایستگاه فرودگاهی بندرعباس طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱ با سناریوهای RCP دوره پیش‌بینی ۲۰۵۰-۲۰۲۴ به شکل زیر است:

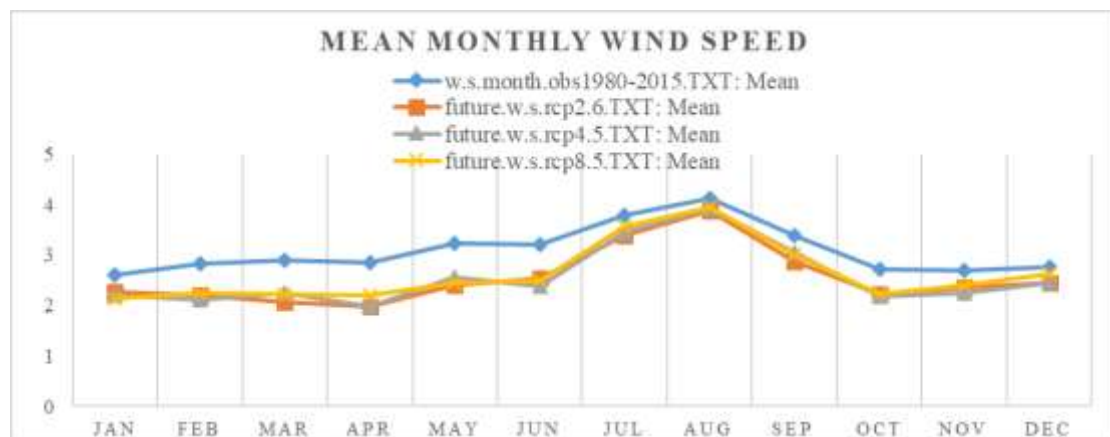
۱- با توجه به نمودار ۱ بیشینه سرعت باد این ایستگاه در تمامی ماه‌ها در تمامی سناریوها به‌جز ماه‌های تابستانی کمتر از دوره ۱۹۸۲-۲۰۲۱ بوده است. در هر سه سناریو حدوداً یک‌میزان تغییر را شاهد هستیم. بیشینه سرعت باد در دوره پیش‌بینی ۲۰۲۴-۲۰۵۰ حدوداً ۱۰ متر بر ثانیه است که بیشترین آن در ماه‌های پاییزی و کمترین آن در ماه‌های زمستانی است.



نمودار ۱: پیشینه ماهانه سرعت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۲ و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴-۲۰۵۰) بر اساس سه سناریوی RCP<sub>8/5</sub> و RCP<sub>4/5</sub>, RCP<sub>2/6</sub>



نمودار ۲: واریانس ماهانه سرعت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۲ و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴-۲۰۵۰) بر اساس سه سناریوی RCP<sub>8/5</sub> و RCP<sub>4/5</sub>, RCP<sub>2/6</sub>



نمودار ۳: میانگین ماهانه سرعت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۲ و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۴-۲۰۵۰) بر اساس سه سناریوی RCP<sub>8/5</sub> و RCP<sub>4/5</sub>, RCP<sub>2/6</sub> منبع (نگارنده)

## نتیجه‌گیری

مدل CanESM2 یک مدل اقلیم جهانی است که توسط مرکز مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل اقلیم کانادا توسعه یافته است. این مدل می‌تواند جنبه‌های مختلف سامانه زمین، از جمله چرخه کربن، اقیانوس، خاک و جو را شبیه‌سازی کند.

یکی از کاربردهای مدل CanESM2 بررسی تأثیرات سامانه‌های بندالی جوی بر اقلیم تابستانی آمریکای شمالی است. سامانه‌های بندالی جوی یک پدیده است که زمانی رخ می‌دهد که یک سامانه پرفشار در مقیاس همدیدی بر روی یک منطقه پایدار می‌ماند و جریان عادی سامانه‌های هواشناسی را مسدود می‌کند؛ بنابراین، مدل CanESM2 می‌تواند به‌عنوان یک ابزار خوب برای مطالعه باد در نظر گرفته شود، زیرا می‌تواند اثرات سامانه‌های بندالی بر سرعت و جهت باد و همچنین بازخوردهای بین باد و متغیرهای دیگر اقلیم را نشان دهد؛ اما مانند هر مدل دیگری، مدل CanESM2 نیز محدودیت‌ها و ابهاماتی دارد، مانند تفکیک، پارامتریک کردن فرایندهای زیرمقیاس نمایی و حساسیت به شرایط اولیه و واداشت‌ها. این عوامل باید هنگام تفسیر نتایج مدل و مقایسه آن‌ها با مشاهدات و مدل‌های دیگر مدنظر قرار گیرند [۲۲].

مدل SDSM یک مدل ریزمقیاس آماری است که می‌تواند سناریوهای با تفکیک مکانی پایین از متغیرهای هواشناسی روزانه سطح زمین را بر اساس مدل‌های اقلیم جهانی تولید کند. مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی شبیه‌سازی مدل CanESM2 مناسب است زیرا می‌تواند خروجی مدل CanESM2 را به‌عنوان ورودی استفاده کند تا پیش‌بینی‌های جزئی‌تر و محلی‌تری از تأثیرات تغییر اقلیم ارائه دهد. مدل SDSM همچنین می‌تواند به عدم قطعیت‌ها و انحرافات مدل CanESM2 با اعمال اصلاحات و اعتبارسنجی‌های آماری پاسخ دهد؛ بنابراین، مدل SDSM می‌تواند کارایی و قابلیت اطمینان مدل CanESM2 را برای برنامه‌ریزی سازگاری و کاهش تغییر اقلیم افزایش دهد [۲۳].

در این پژوهش ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بین‌المللی بندرعباس (باند ۰۳-۲۱) در دو دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۸۲ و ۲۰۲۴-۲۰۵۰ و با در نظر گرفتن بادهای جانبی مجاز (۱۳ نات در ساعت) به روش FAA، محاسبه گردیده است. ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه برابر با ۹۴/۰۴٪ است. باتوجه به اینکه ارزیابی‌های نتایج شبیه‌سازی اقلیمی مدل

CanESM2 برای باد از کیفیت مناسبی برخوردار است؛ این مدل تحت سناریوهای RCP<sub>2/6</sub>, RCP<sub>4/5</sub> و RCP<sub>8/5</sub> خروجی گرفته شد؛ همچنین پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰، ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه مزبور در سناریوهای RCP<sub>2/6</sub>, RCP<sub>4/5</sub> و RCP<sub>8/5</sub> به ترتیب ۲/۴۱٪، ۱/۸۲٪ و ۱/۹۷٪ افزایش یابد روشن است که افزایش ضریب استفاده از باند در یک فرودگاه، می‌تواند افزایش ظرفیت ترافیک هوایی و بهبود ایمنی نشست و برخاست هواپیما در آن فرودگاه مؤثر واقع شود؛ بنابراین تا سال ۲۰۵۰ نیاز به تغییر جهت باند فرودگاه بندرعباس نیست؛ اما باتوجه به گلبادهای هر سه سناریو و باتوجه به جهت بادهای غالب و قرینه باد غالب آن‌ها، برای جذب بادهای بیشتر از ۱۳ نات احداث باند ۱۶۰-۳۴۰ پیشنهاد می‌شود.

باتوجه به  $RMSE \approx 0/6-0/75$  m/s و  $R^2 \approx 0/89-0/92$ ، دقت سرعت برای محاسبات ضریب استفاده<sup>۱۶</sup> مناسب است؛ باین حال  $RMSE$  جهت ۱۱-۱۳ (جهت  $R^2 \approx 0/77-0/80$ ) منبع اصلی عدم قطعیت است و نتایج درصدی افزایش ضریب استفاده باید همراه بازه عدم قطعیت گزارش شوند.

پیشنهاد عملی برای خواننده: برای کاهش عدم قطعیت پیشنهاد می‌شود بیاس کورکشن برداری، میانگین‌گیری برداری و ensemble از چند GCM اجرا شود؛ همچنین ضریب استفاده از باند برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۵۰ مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع و مراجع:

- [1] Jahanbakhsh Asl, S., Khorshid-Doust, A. M., & Hosseini, A. (2002). Wind as an influential factor in airport design and construction (Case study: Miyaneh Airport). *Geographical Space*, (6), 1-1. (in Persian)
- [2] Oktavia, S., Syafriani, D., Dwiridaland, L., & Sudiar, N. Y. (2023). Analysis of surface wind speed at Minangkabau International Airport for the period 2011-2020 using the windrose method. In *Proc. 5th International Conference on Research and Learning of Physics* (pp. 6-12). Padang, Indonesia.
- [3] Le, Y., Yan, L., & Zhang, Y. (2022). Impact of runway surface wind on afternoon and night flight operation at Linzhi Airport.

- [12] Bellasio, R. (2014). Analysis of wind data for airport runway design. *J. Airline Airport Manage.*, 4(2), 97–116.
- [13] Salahi, B., & Poudineh, E. (2023). An evaluation of Delta and SDSM downscaling models for simulating and forecasting average wind velocity in Sistan, Iran. In *Modeling Earth Systems and Environment* (Vol. 9, No. 1, pp. 123–135). (in Persian)
- [14] Khalilnejad, M., Borna, R., & Farajzadeh Asl, M. (2020). Assessing the effects of climate change on runway utilization factor using the FAA method (Case study: Zahedan Airport). *Climate Change Res.*, 1(1), 52–62. (in Persian)
- [15] Jahanbakhsh Asl, S., Sari Sarraf, B., & Hosseini, A. (2006). Evaluation of runway orientation at Ardabil Airport using wind element analysis. *Geographical Research*, (57), 113–126. (in Persian)
- [16] Khajeh, M., Kheyrandish, H., & Pishdad, H. (2015). Review of the phenomenon of dust and study of effective winds on it (Case study: Bandar Abbas, Hormozgan Province). *Environ Energy Res.*, 4(4), 37–48. (in Persian)
- [17] Gebremeskel, S., Liu, Y. B., de Smedt, F., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2005). Analysing the effect of climate changes on streamflow using statistically downscaled GCM scenarios. *Int. J. River Basin Manage.*, 2(4), 271–280.
- [18] Wilby, R. L., & Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames. *Water Resour Res.*, 42(2), W02419.
- [19] Salimi, A., Mesbahzadeh, T., Melkian, A., & Mirakbari, M. (2022). Evaluation of the performance of the regional climate model REMO and the general circulation model CanESM2 in predicting climate parameters (Case study: Isfahan Province). *Integrated Industrial Engineering and Innovation Management*, 5(6), 2522–6924. Clausius Scientific Press, Canada.
- [4] Sardjono, W., Zulkarnain, Kusnoputranto, H., Soesilo, T., Utama, D., & Sudirwan, J. (2022). Study of runway crosswind and tailwind potential for airport sustainability: A study of Soekarno Hatta Airport, Cengkareng, Indonesia. *IOP Conf Earth Environ. Sci.*, 729, 01201.
- [5] Maslovara, A., & Mirković, B. (2021). Impact of tailwind on airport capacity and delay at Zurich Airport. *Transp Res Procedia*, 59, 117–126.
- [6] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2009). *Annex 14: Aerodromes, Vol. I: Aerodrome Design and Operations* (5th ed.).
- [7] Safarzadeh, M., Masoumi, G., & Nadimi, N. (2014). *Airport Planning and Design* (2nd ed., Vols. I–II). Transportation Research Institute, Ministry of Roads and Urban Development. (in Persian)
- [8] Kumar, B. (2006). *An Illustrated Dictionary of Indian Aviation*. Tata McGraw-Hill Publishing Company.
- [9] Federal Aviation Administration (FAA). (2016). *Airplane Flying Handbook*. U.S. Department of Transportation. Retrieved from <https://www.faa.gov/library/manuals/aviation> [Accessed: 27 May 2026]
- [10] Burbidge, R. (2018). Adapting European airports to a changing climate. *Transport Research Arena*, 14, 14–23.
- [11] Sumaja, K., Syahdian, A. S., & Satriyabawa, I. K. M. (2019). Analysing crosswind, headwind, and tailwind at I Gusti Ngurah Rai Airport for aircraft risk assessment during take-off and landing. *Process*, 1, 13456.

*Watershed Management*, 2(2), 1–12. (in Persian)

[20] Environment and Climate Change Canada. (2025). CanESM2 predictors: CMIP5 experiments. Retrieved from <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2> [Accessed: 27 May 2026]

[21] Civil Aviation Organization of Iran. (2018). *Aeronautical Information Publication (AIP): Aerodromes 2*. Tehran: CAO Iran.

[22] Behbahani, H., & Imani, M. (1997). *Airport Design and Calculation* (4th ed.). Iran University of Science and Technology. (in Persian)

[23] Kamijani, F., Nasrollahi, A., Nazari, N., & Nahi, S. (2014). Analysis of the wind regime of the Persian Gulf using synoptic meteorological station data. *Nivar Scientific and Promotional Journal*, (84–85), 1–12. (in Persian)

[24] Salahi, B., & Poudineh, E. (2022). An evaluation of Delta and SDSM downscaling models for simulating and forecasting average wind velocity in Sistan, Iran. *Model Earth Syst Environ.*, 8, 4441–4453.

[25] Di Mascio, A., Cosciotti, M., Fusco, R., & Moretti, L. (2020). Runway veer-off risk analysis: An international airport case study. *Sustainability*, 12(1), 60–93.