نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و هشتم، شماره اول، بهار و تابستان 1405

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

امیر، نادری[1]، حسین ملکوتی[*2]، اسد اله خورانی[3]
1- دانشجو دکتری، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
2- استاد، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
3- دانشیار، دانشکده اقلیم‌شناسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
(دریافت مقاله: 1404/04/09 تاریخ پذیرش: 1404/08/05)

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 03-21) در دو دوره آماری 2021-1982 و 2050-2024 و با درنظرگرفتن بادهای جانبی مجاز (13 نات در ساعت) به روش FAA محاسبه گردید. در این راستا با به‌کارگیری روش SDSM و اطلاعات CanESM2 و بر اساس سه سناریوی RCP2/6،RCP4/5 و RCP8/5، سمت و سرعت وزش باد ایستگاه بندرعباس تا سال 2050 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 2021-1982 برابر با 94/04% است. همچنین پیش‌بینی‌ها نشان دادند که تا سال2050، ضریب استفاده از باند فعلی این فرودگاه در سه سناریوی RCP2/6 و RCP4/5 و RCP8/5 به ترتیب با 2/41% و 1/82% و 1/97% افزایش مواجه می‌شود. نتایج نشان دادند که در دوره 2050-2024 نسبت به دوره 2021-1982 بیشینه سرعت باد روزانه در تمامی فصول به‌غیراز 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 khoorani

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.

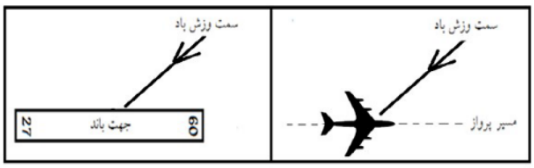
Keywords: Climate Change, Wind Rose, Runway Utilization Coefficient

* نویسنده پاسخگو: حسین ملکوتی، تلفن: 09122350591، پست الکترونیک: @hormozgan.ac.irmalakooti
این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمایید.

مقدمه

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 [1]. 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 به‌صورت قائم و افقی با سرعت‌های مختلف و نوسانات دینامیکی حرکت کند [2]. وقوع مکرر بادهای شدید دم و پهلو در باند فرودگاه عامل مهمی است که بر ایمنی پرواز و نشست‌وبرخاست تأثیر می‌گذارد [3]. 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 [4]. باد جانبی[1] بر پایداری پرواز تأثیر می‌گذارد، درحالی‌که باد موافق[2] 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 [5].

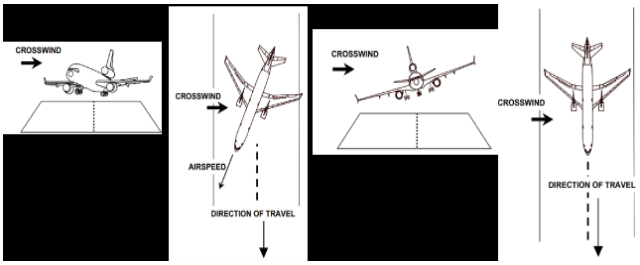
انتخاب داده‌های مورداستفاده برای محاسبه ضریب استفاده باید بر اساس آمار قابل‌اعتماد توزیع باد برای دوره حداقل پنج‌ساله باشد. مشاهدات مورداستفاده باید حداقل هشت بار در روز و در فواصل زمانی مساوی انجام شود [6]. امتداد باند پرواز در جهت وزش باد غالب منطقه، طراحی و ساخته شود. از طرفی در برخی مناطق، عدم وجود باد غالب در یک فصل، باعث ایجاد محدودیت اقلیمی شده و ضرورت ایجاب می‌کند که باند دیگری به‌صورت متقاطع و یا غیر متقاطع (به‌صورت V شکل باز) و در جهت باد غالب دوم ساخته شود [7]. بر اساس توصیه سازمان ایکائو بهتر است، امتداد یا جهت باند پرواز به‌نحوی انتخاب و طراحی شود که حداقل در 95% پروازها، برای نشست وبرخاست قابل استفاده باشد که به آن ضریب استفاده 95% گفته می‌شود [6]. به بیان دیگر لازم است باند پرواز در جهت و امتدادی ساخته شود که برای 95% 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 **1**، نشان داده شده است [8].



شکل 1- باد جانبی یا باد پهلو [8]

هنگام رخداد متواتر باد جانبی شدید، جهت باند فرودگاه نیاز به تغییر دارد، درحالی‌که باد موافق سمت‌وسوی باند را تعیین می‌کند [5]. سازمان هوانوردی کشوری آمریکا (FAA) حداکثر باد جانبی مجاز برای نشست‌وبرخاست هواپیما را 13 نات (15 مایل در ساعت) تعیین نموده است [9]. براین‌اساس در پژوهش حاضر بادهای جانبی با سرعت کمتر از 13 نات در ساعت، مجاز در نظر گرفته‌شده است. در خصوص تأثیر تغییر اقلیم بر فرودگاه‌ها، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که برخی فرودگاه‌ها در اثر پیامدهای تغییر اقلیم ازنظر 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 [10]. 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 درنتیجه 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 95% شود، نیاز به طراحی مجدد باندی دیگر به‌صورت متقاطع و یا غیر متقاطع با باند موجود، افزایش می‌یابد. در شکل **2** نحوه نشستن و برخاستن هواپیما نسبت به جهت باد مخالف نمایش داده شده است [10].

[1]cross wind
[2]tail wind
[3]head wind



شکل 2 - تصویر باد مخالف در هنگام برخاستن و فرود [11]

مطالعه پتانسیل باد مخالف و موافق باند فرودگاه اندونزی توسط ساردجونو و همکارانش در سال 2022 انجام شد. تجزیه‌وتحلیل سرعت و جهت باد مربوط به سال‌های 2017-2007 روی فرودگاه موردمطالعه برای شناخت پتانسیل باد جانبی و موافق با استفاده از مدل WRF[4] صورت گرفت. بیشترین مقدار باد جانبی در ماه اوت در سال‌های 2017-2007 به میزان 30/53 نات رخداده بود، درحالی‌که 25 نات باد موافق در ماه ژانویه برای باند 250 درجه و 24 نات برای باند 70 درجه در ماه اوت رخداده بود [4]. بررسی تجزیه‌وتحلیل داده‌های باد برای طراحی باند فرودگاه توسط روبرتو بلازیو در سال 2014 انجام شد. هدف از این تحقیق ارائه یک روش کاربردی، برای تجزیه‌وتحلیل داده باد برای تصحیح جهت‌گیری باندهای فرودگاه است. در این پژوهش از بیش از 90000 داده باد مشاهداتی استفاده گردید. طبق این مقاله جهت‌گیری صحیح باندها اجزای باد مخالف را به حداقل می‌رساند درنتیجه ایمنی فرودگاه افزایش می‌یابد [12]. مقایسه دو مدل ریزمقیاس، DELTA[5] و SDSM[6] در شبیه‌سازی و پیش‌بینی سرعت باد متوسط در ایستگاه زابل، با استفاده از خروجی‌های مدل‌های اقلیمی جهانی CGCM3[7] و CanESM2[8] تحت سناریوهای مختلف توسط صلاحی و پودینه در سال 2022 انجام شد [13]. 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 1399 به مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر ضریب استفاده از باند فرودگاه به روش FAA[9] 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 2017-1991 و 2050-2020 و با درنظرگرفتن بادهای جانبی مجاز به روش FAA محاسبه شد در این راستا با به‌کارگیری نرم‌افزار SDSM و مدل $CanESM_2$ و بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$ و $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$ سمت و سرعت وزش باد ایستگاه زاهدان تا سال 2050 موردمطالعه قرار گرفت و گلبادهای شانزده جهتی روزانه برای دوره‌های آماری مزبور ترسیم گردید. بر اساس سناریو $RCP_{8/5}$ در فرودگاه زاهدان جهت تأمین حداقل ضریب استفاده از باند، نیاز به احداث باند دیگری منطبق با جهت باد نایب غالب شناسایی‌شده در این سناریو وجود دارد [14]؛ همچنین جهانبخش اصل و همکارانش در سال 1384 به ارزیابی امتداد باند پرواز فرودگاه اردبیل با تجزیه‌وتحلیل عنصر باد پرداختند. در این پژوهش با استفاده از آمار هفده سال ایستگاه سینوپتیک اردبیل (2000-1984) 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 نشست‌وبرخاست با استفاده از نرم‌افزار اتوکد برای هر ماه ترسیم شد. از بررسی‌ها و مطالعات انجام‌یافته نتیجه می‌شود که باند 23-5 و 24-6 بیش از 95% بادها با درنظرگرفتن بادهای جانبی مجاز 12 نات در ساعت در طول سال جذب می‌نمایند. امتدادهای فوق‌الذکر نسبت به باند 33-15 باند پرواز موجود فرودگاه اردبیل 70 تا 80 درجه به سمت راست‌چرخش نشان می‌دهند [15].

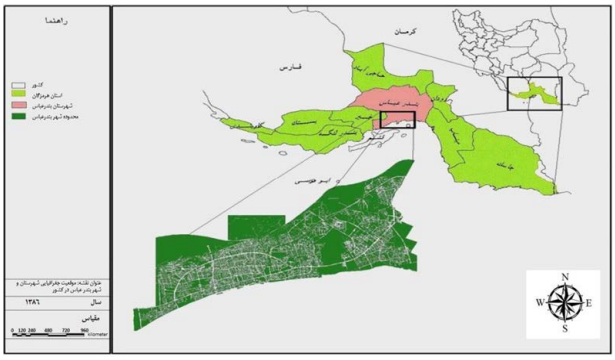
هدف از این پژوهش مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر ضریب استفاده از باند فرودگاه بندرعباس به روش FAA می‌باشد. در این راستا با به‌کارگیری نرم‌افزار SDSM و مدل$CanESM_2$ و بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$ و $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$ سمت و سرعت وزش باد ایستگاه بندرعباس تا سال 2050 موردمطالعه قرار گرفت و گلبادهای شانزده جهتی روزانه برای دوره‌های آماری مزبور ترسیم گردید.

معرفی منطقه موردمطالعه

شهر بندرعباس به‌عنوان مرکز استان هرمزگان در مختصات 56 درجه و 14 دقیقه تا 56 درجه و 22 دقیقه طول شرقی و 27 درجه و 09 دقیقه تا 27 درجه و 15 دقیقه عرض شمالی و

[۴] Weather Research And Forecasting
[۵] Delta Change Factor
[۶] Statistical Downscaling Model
[۷] Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model
[۸] Canadian Earth System Model
[۹] Federal Aviation Administration

در ارتفاع 10 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 .درمجموع، باید گفت که ظرفیت و کیفیت تأسیسات فرودگاه بین‌المللی بندرعباس، به‌هیچ‌وجه شایسته یک بندر تجاری بزرگ که نقش اساسی در ترانزیت جهانی کالا در کشور را دارا نیست .این فرودگاه تنها 2400 مترمربع زیربنا داشته و فقط دارای 2 پایانه و 3 پارکینگ هواپیما است . مساحت انبارهای فرودگاه نیز از 600 متر تجاوز نمی‌کند .لازم به ذکر است که طرح توسعه تجهیزات و پایانه‌های مسافربری 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 150 میلی‌متر است و طول دوره فصل خنک در آن کوتاه است. هوای شهر بندرعباس گرم و مرطوب بوده و بیشترین درجه‌حرارت در تابستان‌ها 49 درجه بالای صفر و کمترین آن، در زمستان‌ها 5 درجه بالای صفر است. نوار ساحلی استان هرمزگان دارای جایگاه ممتازی در جغرافیای اقتصاد ملی است .به‌نحوی که به دلیل موقعیت ویژه مکانی و برخورداری از امکانات مناسب ترابری، متجاوز از 40 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 1385). بندرعباس با دارابودن دو بندر شهید باهنر و بندر شهید رجایی به‌عنوان دو بندر بزرگ تجاری کشور از اهمیت خاصی در اقتصاد ایران برخوردار است. در میان بندرهای کشور، عملکرد بندرعباس به‌عنوان 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. خلیج‌فارس گذرگاه دریایی مهمی است که ایران را از طرف جنوب و از طریق استان‌های هرمزگان و بوشهر به آب‌های آزاد جهان مربوط می‌کند. ازآنجایی‌که این خلیج بر سر راه دریایی خاورمیانه واقع‌شده، اهمیت نظامی و ژئوپلیتیکی ویژه‌ای در منطقه خاورمیانه دارد. از طرف دیگر وجود این منابع عظیم آبی امکانات بالقوه و بالفعل بسیار جالب‌توجهی را در امر توسعه ایران‌گردی و جهانگردی فراهم آورده‌اند. [16].



شکل 3 - موقعیت جغرافیایی استان هرمزگان و شهر بندرعباس [17]

مواد و روش‌ها

الف - داده‌های مورداستفاده در این تحقیق عبارت‌اند از:

1-داده‌های دیدبانی جهت و سرعت باد: در این پژوهش از داده‌های سرعت و جهت باد ایستگاه مشاهداتی بندرعباس در دوره آماری 1982-2021 استفاده‌شده است. باتوجه‌به اینکه داده‌های ایستگاه هواشناسی به‌صورت سه‌ساعته توسط این سازمان ارائه می‌شود، این داده‌ها استانداردسازی گردید.

2-داده‌های بزرگ‌مقیاس AOGCM[10] و NCEP[11]:

باتوجه‌به ارزیابی نسل دوم مدل کانادایی سیستم زمین یا CanESM2 که توسط مرکز کانادایی مدل‌سازی اقلیم CCCMA[12] ارائه‌شده است به‌عنوان مدل گردش عمومی جو GCM[13] استفاده گردید. اگرچه مدل‌های GCM برای بررسی پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده مناسب هستند، خروجی آن‌ها بر اساس شبکه‌های بزرگ‌مقیاس 250 تا 600 کیلومتری هستند [18]، 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 بزرگ‌مقیاس 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 [19] که می‌تواند به‌صورت رابطه $Y-f(x)$ باشد.

[10]Atmosphere-Ocean General Circulation Model
[11]National Center For Environmental Prediction
[12]General Circulation Model
[13]Canada Climate Change Model Data

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 5 مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های سمت و سرعت باد ایستگاه بندرعباس استفاده شد. این مدل که توسط [19] 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 ($RCP_{2/6}$ ، $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$) 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 [20].

برای انتخاب متغیرهای همدیدی مناسب، از ابزار Screen Variablesدر 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 2005-1982 و برای اعتبارسنجی مستقل در بازه 2021-2006 استفاده شدند.

اعتبارسنجی

برای ارزیابی عملکرد مدل شاخص‌هایRMSE ، MAE، bias و ضریب تعیین R^2 محاسبه شدند. همچنین نمودارهای QQ[16] وscatter observed vs simulated برای هر دوره تولید و گزارش شد.

این داده‌ها باتوجه‌به مختصات جغرافیایی ایستگاه بندرعباس از پایگاه داده مدل‌های گردش عمومی جو کشور کانادا به آدرس اینترنتی [21] اخذ گردید.

ب-محاسبه ضریب استفاده از باند[14]: ضریب استفاده از باند نشان‌دهنده درصد زمانی است که طی آن باند مورداستفاده فرودگاه توسط مؤلفه باد مقابل محدود نمی‌شود و این مقدار نباید کمتر از 95% بشود [22]. ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس در دو دوره آماری 2021-1982 و 2050-2024 محاسبه گردید. برای این منظور، از یک نوع سیستم مختصات قطبی گلباد[15] در شکل **7** که مختص محاسبات ضریب استفاده از باند پرواز است، استفاده گردید. درواقع این گلباد استاندارد شامل یک‌رشته دایره‌های هم‌مرکز است که با خطوط شعاعی متقارن قطع‌شده‌اند. خطوط شعاعی مزبور نشان‌دهنده میزان بزرگی و سرعت باد است، چنانچه فضای بین هر دو خط شعاعی متوالی نشان‌دهنده جهت باد است [6]. در این مطالعه از گلبادهای قطبی شانزده جهتی استفاده گردیده است که در آن‌ها دایره مرکزی گلباد، مقدار بادهای آرام کمتر از 1 نات در ساعت را نشان می‌دهد. دایره اول، درصد بادهای با سرعت 1 تا 5 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 13 نات در ساعت، مجاز در نظر گرفته‌شده است. سرعت یک نات (knot) معادل 0/51444 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 20 نات، دایره چهارم به بادهای با حداکثر سرعت 25 نات و دایره پنجم به بادهای با سرعت بیشتر از 25 نات اختصاص‌یافته است. درصد زمانی که باد با سرعت وجهت معینی می‌وزد، بر روی این گلباد و در قطعه مربوطه نوشته می‌شود. برای محاسبه ضریب استفاده از باند فعلی این فرودگاه (باند 03-21) 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 (13 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 210 درجه و 30 درجه واقع شود. بدین ترتیب مجموع اعداد روی قطعه‌های واقع‌بین خطوط طرفین نوار شفاف (زیر سطح نوار شفاف)، محاسبه گردید. در مواردی که قسمتی از یک قطعه زیر نوار شفاف و

[14] Utilization Coefficient Of The Runway
[15] Windrose
[16] quantile–quantile

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 95% باشد؛ یعنی سطح زیر نوار شفاف دارای پوشش 95% باشد. براین‌اساس اگر ضریب استفاده از باند موجود محاسبه‌شده 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 استثنا قسمت مشترک) 95% 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 تعیین‌شده به‌وسیله گلباد به روش پیش‌گفته، امکان‌پذیر نباشد. در این صورت تعدیل جزئی در جهت تعیین‌شده به علت دلایل زیر الزامی است:

1-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.

2-شیب زیاد: جهت باند پرواز ممکن است به علت شیب زیاد و عملیات خاکی تعدیل گردد.

3-آزار و سروصدا: درصورتی‌که 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 درصورتی‌که پایین‌بودن شدت باد مناسب است [23].

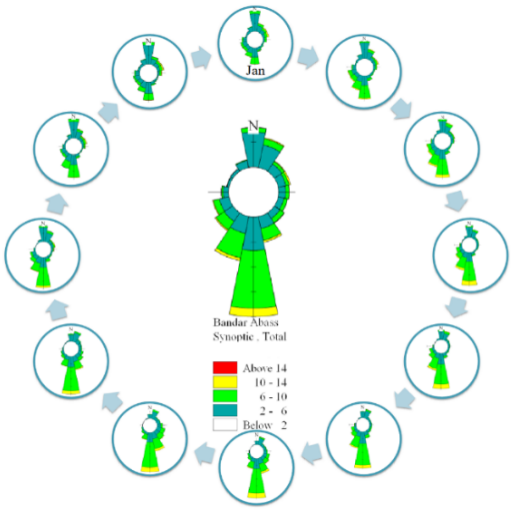
یافته‌های تحقیق

تحلیل باد غالب و تندبادهای ایستگاه بندرعباس در دوره مشاهداتی:

گلباد کلی ایستگاه بندرعباس در دوره 2021-1957 در شکل **4** 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 12m/s(24knot) فقط در جهت‌های جنوب و با فراوانی 0/2% وجود دارد. در بیشتر جهات سرعت باد کمتر از 10m/s(20knot) است. جهات شمال غربی دارای کمترین فراوانی می‌باشند.

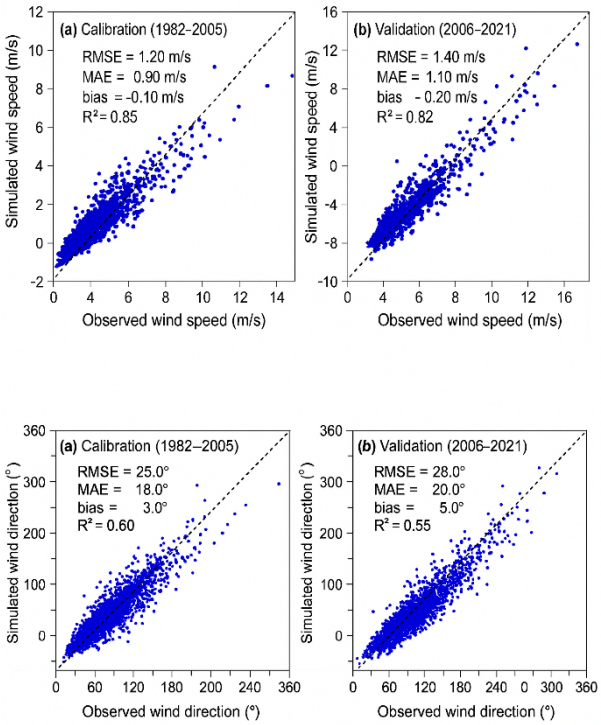
از جهت جنوب تا شمال غربی فراوانی باد روند کاهشی داشته، سپس تا شمال افزایش و پس از آن تا شرق روند کاهشی دارد. در شکل **6** گلبادهای ماهانه ایستگاه بندرعباس جهت مقایسه ارائه‌شده است. در شکل **6** مشاهده می‌شود که جهت باد غالب در تمامی ماه‌ها به‌جز دسامبر و ژانویه جنوبی است. در دو ماه مذکور جهت باد غالب شمالی است از اواسط زمستان سرعت‌های بیش از 10m/s از جهات جنوبی شروع‌شده و تا اوایل پاییز ادامه پیدا می‌کند. بیشترین فراوانی در این ماه‌ها مربوط به بازه سرعت (12-20 knot) 6-10 m/s است که از جهت جنوبی می‌وزد. بادهای غربی از اواسط بهار تضعیف‌شده و تا اواخر پاییز تقریباً ازاین‌جهت 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 کاهش‌یافته و از اکتبر به بعد افزایش می‌یابد. سرعت‌های بیش از 4m/s (8knot) دارای احتمال وقوع 50% 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 به‌واسطه‌ی 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 بادها در روزبه دلیل جهت مخالف با نسیم روزانه ضعیف بوده و در شب به علت همخوانی با نسیم شبانه تقویت‌شده‌اند؛ درنتیجه آنچه در گلباد کلی به‌عنوان باد غالب در این فصل ظاهرشده است کاملاً نسیم خشکی و دریای تشدید شده به‌واسطه‌ی کوه‌های پشت این منطقه است [24].باد غالب در سواحل غرب خلیج‌فارس غرب - شمال غربی بوده که با حرکت به سمت مرکز خلیج‌فارس 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. باوجوداینکه با پیشروی از غرب به شرق خلیج‌فارس از شدت بادهای نظام‌مند غالب در غرب منطقه کاسته می‌شود، مؤلفه غالب دیگری در امتداد عمود بر سواحل

ظاهرشده که شدت و تداوم سالانه آن به‌سوی شرق خلیج‌فارس افزایش می‌یابد به‌طوری که در بندرعباس به دلیل موقعیت امتداد ساحل، این مؤلفه باد غالب منطقه را تعیین می‌نماید. به‌طورکلی الگوی باد غالب در مناطق مختلف خلیج‌فارس به جهت و موقعیت خط ساحلی و همچنین شرایط فصلی بادها و عوارض ساحلی (مانند کوه‌ها) بستگی دارد [24].



شکل 4 - مقایسه گلباد مشاهداتی ماهانه ایستگاه فرودگاهی بندرعباس برای دوره 2021-1957

اعتبارسنجی و پارامترهای SDSM برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SDSM ، داده‌های مشاهداتی ایستگاه بندرعباس در دوره کالیبراسیون (1982-2005) و اعتبارسنجی (2006-2021) استفاده شد. آمار کارایی شامل RMSE، MAE، bias و ضریب تعیین (R^2) برای سرعت و سمت باد محاسبه و در جدول **1** درج گردید و محاسبه گام‌به‌گام ضریب استفاده باند در جدول **2** آورده شده است. همچنین نمودارهای مقایسه observed vs simulated به همراه خط 1:1 برای هر متغیر در شکل **5** 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.



شکل 5: مقایسه کمیت‌های داده‌های مشاهداتی و مدل ایستگاه بندرعباس در دوره کالیبراسیون (1982-2005) و اعتبارسنجی (2006-2021)

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 16 جهتی استخراج شد. برای هر بخش رز با جهت مرکزی θ و سرعت متوسط V ، مؤلفه عرضی باد با رابطه زیر محاسبه گردید: $V_cross = V \cdot \sin(|\theta - \theta_b|)$ که θ_b جهت باند (30° برای باند 03 و 210° برای باند 21) 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 به‌صورت جزئی زیر آستانه قرار می‌گرفت، تناسب سطح همان بخش در محاسبه لحاظ شد (روش مشابه توضیح داده شده در FAA) .

جدول 1: اعتبارسنجی (کالیبراسیون 1982-2005؛ اعتبارسنجی 2006-2021)

تغیر	دوره	RMSE	MAE	bias	R^2
سرعت باد (m/s)	کالیبراسیون 1982-2005	0/60	0/45	0/02±	0/92
سرعت باد (m/s)	اعتبارسنجی 2006-2021	0/75	0/55	0/03±	0/89
جهت باد (درجه)	کالیبراسیون 1982-2005	11	8	0/5+	0/80
جهت باد (درجه)	اعتبارسنجی 2006-2021	13	9/5	0/8+	0/77

جدول 2: نمونه محاسبه گام‌به‌گام ضریب استفاده باند (نمونه عددی ماهانه)

قابل‌استفاده (V_cross ≤ 13)	مؤلفه عرضی V_cross = V·sin(Δθ) (knot)	میانگین سرعت (knot)	درصد وقوع (%)	جهت گلباد (درجه)
بله	8/5·sin(30°)=4/25	8/5	6/35	۱۵۰
بله	9/2·sin(20°)=3/15	9/2	6/48	۱۶۰
بله	10/0·sin(10°)=1/74	10	6/12	۱۷۰
بله	7/8·sin(0°)=0	7/8	9/16	۱۸۰
بله	11/2·sin(10°)=1/94	11/2	11/85	۱۹۰
بله	6/5·sin(30°)=3.25	6/5	4	۲۰۰
بله	14·sin(30°)=7.00	14	3	۲۱۰
خیر	16·sin(120°)=13/86	16	0/45	۳۳۰
—	—	—	52/09	سایر جهات (مجموع)
—	—	—	94/04	جمع درصدهای قابل‌استفاده

نتایج اعتبارسنجی

جدول **1** مقادیر شاخص‌های مهارت پس از اجرای مراحل کالیبراسیون و اصلاح را نشان می‌دهد (کالیبراسیون 1982-2005؛ اعتبارسنجی 2006-2021). در اعتبارسنجی مدل، دقت سرعت قابل‌قبول است (RMSE ≈ 0/6–0/75 m/s) ؛ (R^2 ≈ 0/89–0/92)، دقت جهت باد اندکی حساس است (RMSE ≈ 11–13°)؛ (R^2 ≈ 0/77–0/80) . اعداد پس از اعمال اصلاحات کالیبراسیون فصلی و بیاس‌کورکشن به دست آمده‌اند. جهت محاسبه ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس (باند 03-21)، ابتدا داده‌های سمت و سرعت باد ایستگاه فرودگاهی بندرعباس مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. در این راستا از نتایج گلبادهای شانزده جهتی روزانه آماری 1982-2021 و گلبادهای مربوط به سه سناریوی $RCP_{2/6}$، $RCP_{4/5}$، $RCP_{8/5}$ در دوره آماری 2024-2050 استفاده گردید. گلبادهای مزبور در شکل **6**، ارائه گردیده است و ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس (باند 03-21) در دوره آماری 1982-2021 و دوره پیش‌بینی (2024-2050) بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$، $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$ در شکل **7** محاسبه گردیده است. با تجزیه‌وتحلیل گلبادهای مندرج در شکل **6**، وضعیت تغییرات سمت و سرعت باد این فرودگاه تا سال 2050 بندرعباس در دوره آماری 1982-2021 و دوره پیش‌بینی 2024-2050 بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$، $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$ مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه در جدول‌های **3** و **4** ارائه گردید.

الف - بر اساس جدول **3** و با مقایسه سرعت وزش بادهای ایستگاه فرودگاهی بندرعباس در دوره آماری 1982-2021 نسبت به دوره پیش‌بینی (2024-2050) تغییرات به شرح زیر است:

1-تغییراتی که تا سال 2050 در سرعت وزش بادهای این ایستگاه رخ می‌دهند در هر سه سناریوی موردمطالعه تا حدودی مشابه است.

2-پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که بادهای آرام این ایستگاه در سناریوهای $RCP_{2/6}$ و $RCP_{8/5}$ به ترتیب 1/37% و 2/38% کاهش و در سناریوی $RCP_{4/5}$، 1/65 درصد افزایش می‌یابد.

3-بادهای با سرعت 1-5 نات در هر سه سناریو با افزایش مواجه شده که بیشترین افزایش در $RCP_{4/5}$ برابر با 7/44% و کمترین افزایش در سناریوی $RCP_{8/5}$ برابر با 6/58% است.

4-بادهای با سرعت 5-13 نات در هر سه سناریو با کاهش مواجه می‌شوند که بیشترین کاهش مربوط به سناریوی $RCP_{4/5}$ برابر با 3/94% و کمترین کاهش مربوط به سناریوی $RCP_{8/5}$ برابر با 2/2% است.

5-بادهای با سرعت 13-20 در هر سه سناریو با کاهش روبرو می‌شوند که بیشترین کاهش مربوط به سناریوی $RCP_{2/6}$ برابر با 2/26%. کمترین کاهش مربوط به سناریوی $RCP_{4/5}$ برابر با 1%/64 است.

6-پیش‌بینی‌ها بر اساس هر سه سناریو موردمطالعه نشان می‌دهد که وزش بادهای با سرعت بیشتر از 20 نات به صفر نزدیک می‌شود.

ب-براساس جدول **3** و با مقایسه جهت وزش بادهای ایستگاه فرودگاهی بندرعباس در دوره آماری 1982-2021 نسبت به دوره پیش‌بینی 2024-2050 تغییراتی به شرح زیر قابل‌ذکر است.

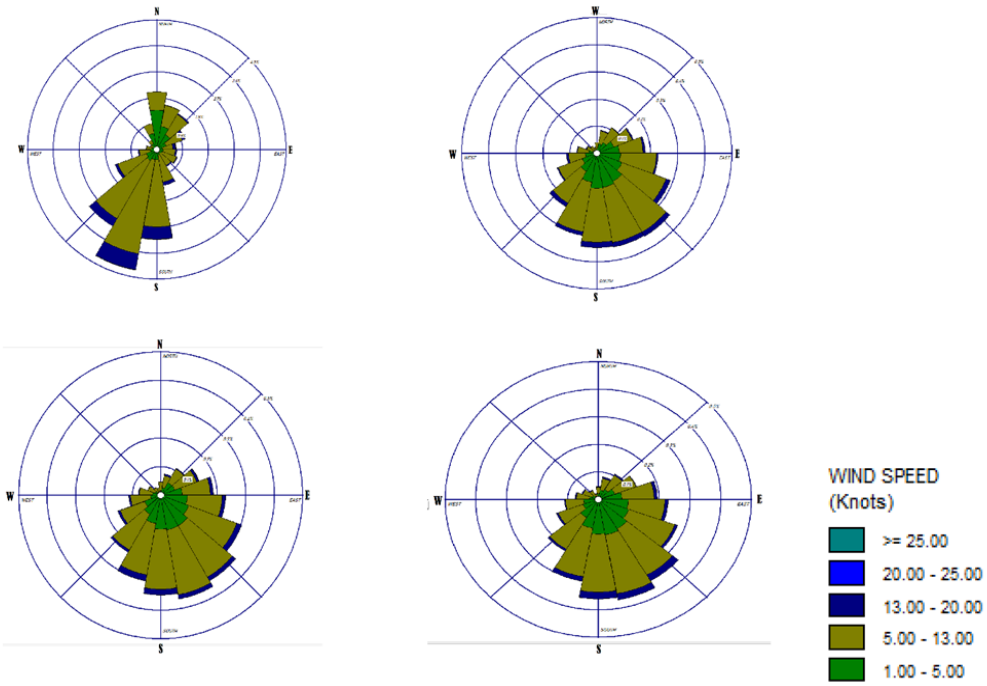
1-پیش‌بینی‌ها بر اساس سه سناریو موردمطالعه نشان می‌دهد که برآیند جهت باد این ایستگاه تا سال 2050 نسبت به دوره 2021-1982 دارای تغییراتی به در محدوده 150 تا 180 درجه است.

2-باد غالب این ایستگاه در دوره 2021-1982، SSW و برابر با 190 درجه است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که در سناریو $RCP_{2/6}$ جهت وزش این باد 40 درجه تغییر نموده و از سمت 150 درجه خواهد وزید. در سناریو $RCP_{4/5}$ با 20 درجه کاهش از 170 درجه و در سناریوی $RCP_{8/5}$ با 30 درجه کاهش از 160 درجه خواهد وزید. همچنین میزان وزش باد غالب در هر سه سناریوی موردمطالعه با کاهش همراه است. بیشترین کاهش در $RCP_{4/5}$ برابر با 6/73% و کمترین کاهش در $RCP_{8/5}$ برابر با 5/37% است.

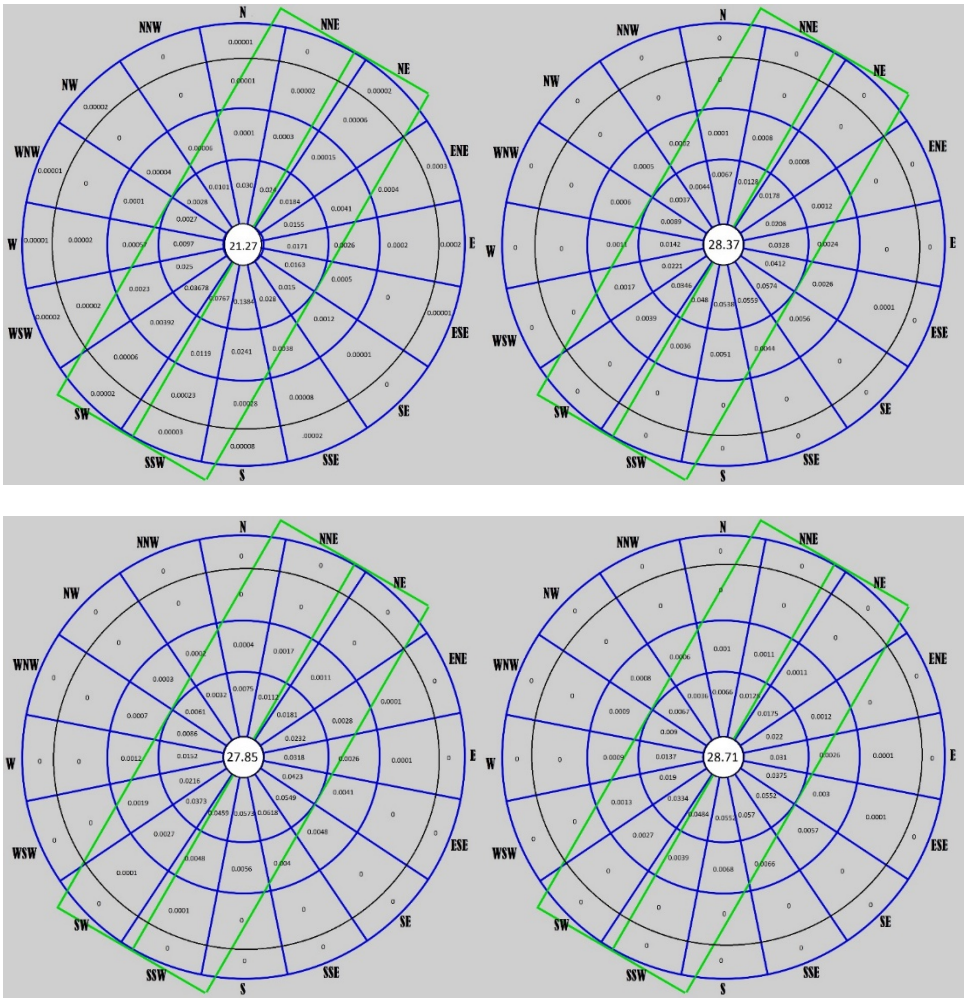
3-باد نایب غالب این ایستگاه در دوره 2021-1982 از سمت 180 درجه می‌وزد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که در سناریو $RCP_{2/6}$ جهت وزش باد بدون تغییر خواهد بود و در سناریوی $RCP_{4/5}$ با 30 درجه تغییر از سمت 150 درجه و در سناریوی $RCP_{8/5}$ با 10 درجه کاهش از سمت 170 درجه خواهد وزید. همچنین در سه سناریوی موردمطالعه، میزان وزش باد در $RCP_{4/5}$ و$RCP_{8/5}$ به ترتیب با 4/7% و 3/2% کاهش مواجه می‌شود.

4-بادهای قرینه غالب این ایستگاه تا سال 2050 کاهش می‌یابد. به‌طوری که بر اساس سه سناریوی موردمطالعه از میزان وزش این بادها در محدوده 3/15% تا 3/22% کاهش می‌یابد.

5-بررسی گلبادهای مربوط به RCP نشان می‌دهد که تا سال 2050 از میزان وزش بادهای SSW و SW کاسته می‌شود، درحالی‌که بادهای SSE افزایش می‌یابد. ضریب استفاده از باند در سناریوهای $RCP_{2/6}$،$RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$ به ترتیب 2/41%، 1/82% و 1/97% افزایش‌یافته است.



شکل 6- گلبادهای روزانه ایستگاه بندرعباس به ترتیب از بالا از راست به چپ در دوره آماری 2021-1982 و دوره پیش‌بینی (2050-2024) بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$، $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$ منبع (نگارنده)



شکل 7- ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بندرعباس (باند 03-21) به ترتیب از بالا از راست به چپ در دوره آماری 2021-1982 و دوره پیش‌بینی (2050-2024) بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$، $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$

جدول 3: وضعیت سرعت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری 2021-1982 و دوره پیش‌بینی (2050-2024) بر اساس سه سناریوی RCP2.6،RCP4.5 و RCP8.5

سرعت باد / دوره	بادهای آرام	1-5 نات	5-13 نات	13-20 نات	20-25 نات	بیشتر از 25 نات
2021-1982	٪25/85	٪21/27	٪46/87	٪5/76	٪0/14	٪0/08
$RCP_{2.6}$(2024-2050)	٪24/48	٪28/37	٪43/58	٪3/5	٪0/01	0
تغییرات نسبت به دوره 1982-2021	٪1/37 کاهش	٪7/1 افزایش	٪3/29 کاهش	٪2/26 کاهش	٪0/13 کاهش	٪0/08 کاهش
$RCP_{4.5}$(2024-2050)	٪24/2	٪28/71	٪42/93	٪4/12	٪0/02	0
تغییرات نسبت به دوره 1982-2021	٪1/65 افزایش	٪7/44 افزایش	٪3/94 کاهش	٪1/64 کاهش	٪0/12 کاهش	٪0/08 کاهش
$RCP_{8.5}$(2024-2050)	٪23/47	٪27/85	٪44/67	٪3/96	٪0/04	0
تغییرات نسبت به دوره 1982-2021	٪2/38 کاهش	٪6/58 افزایش	٪2/2 کاهش	٪1/8 کاهش	0/1 کاهش	٪0/08کاهش

جدول 4 - وضعیت جهت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری (1982-2021) و دوره پیش‌بینی (2024-2050) بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$، $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$

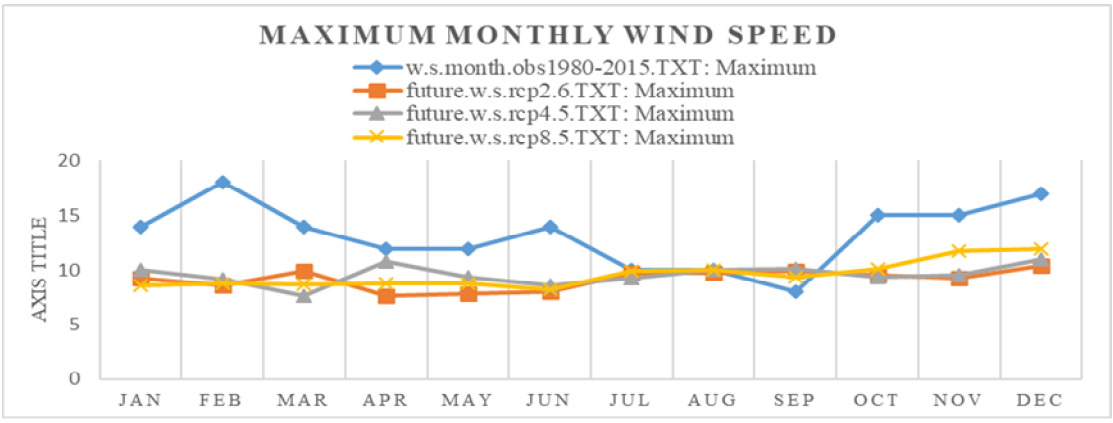
جهت باد / دوره	باد غالب/ درصد	باد نایب غالب/ درصد	قرینه باد غالب/ درصد	ضریب استفاده از باند موجود (باند 03-21)
1982-2021	190 درجه ٪11/85	180 درجه ٪9/16	10 درجه ٪3/6	٪94/04
$RCP_{2.6}$(2024-2050)	150 درجه ٪6/35	180 درجه ٪5/8	330 درجه ٪0/45	٪96/45
تغییرات نسبت به دوره 1982-2021	40 درجه ٪5/5 کاهش	0 درجه ٪4/8 کاهش	40 درجه ٪3/15 کاهش	٪2/41 افزایش
$RCP_{4.5}$(2024-2050)	170 درجه ٪6/12	150 درجه ٪5/9	350 درجه ٪0/38	٪95/86
تغییرات نسبت به دوره 1982-2021	20 درجه ٪6/73 کاهش	30 درجه ٪4/7 کاهش	20 درجه ٪3/22 کاهش	٪1/82 افزایش
$RCP_{8.5}$(2024-2050)	160 درجه ٪6/48	170 درجه ٪5/96	340 درجه ٪0/45	٪96/01
تغییرات نسبت به دوره 1982-2021	30 درجه ٪5/37 کاهش	10 درجه ٪3/2 کاهش	30 درجه ٪3/15 کاهش	٪1/97 افزایش

ج-بر اساس نمودار **1**، **2** و **3** مقایسه ماهانه میانگین، واریانس و بیشینه سرعت باد در ایستگاه فرودگاهی بندرعباس طی دوره 1982-2021 با سناریوهای RCP دوره پیش‌بینی 2050-2024 به شکل زیر است:

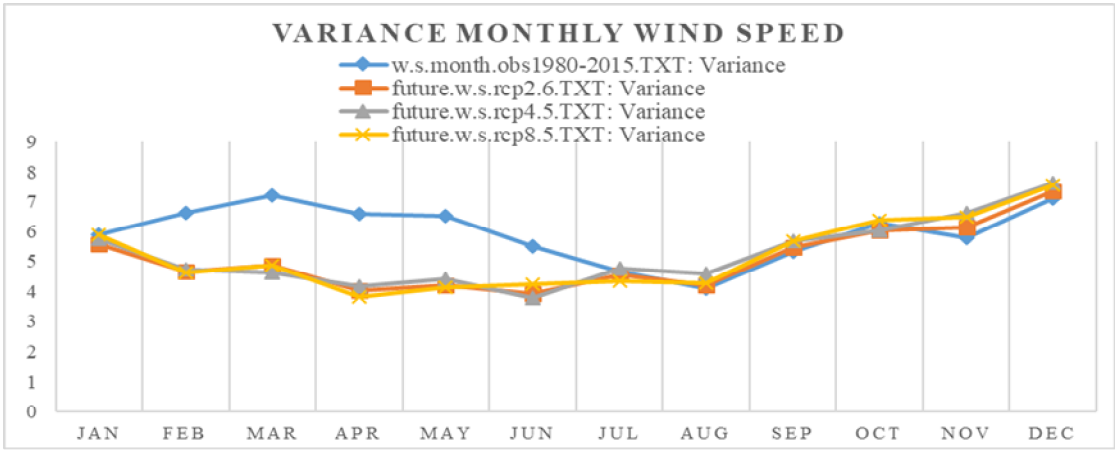
1-با توجه به نمودار **1** بیشینه سرعت باد این ایستگاه در تمامی ماه‌ها در تمامی سناریوها به‌جز ماه‌های تابستانی کمتر از دوره 1982-2021 بوده است. در هر سه سناریو حدوداً یک‌میزان تغییر را شاهد هستیم. بیشینه سرعت باد در دوره پیش‌بینی 2050-2024 حدوداً 10 متر بر ثانیه است که بیشترین آن در ماه‌های پاییزی و کمترین آن در ماه‌های زمستانی است.

2-با توجه به نمودار **2** 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 2050-2024 و دوره 1982-2021 شاهد هستیم.

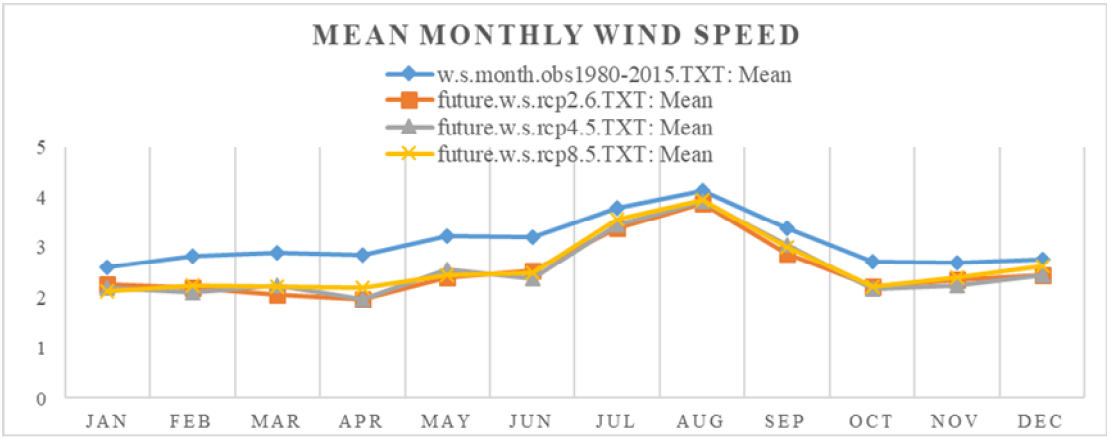
3-نمودار **3** میانگین سرعت باد در هر دو دوره را به ما نشان می‌دهد. همان‌طور که شاهد هستیم، میانگین سرعت باد در هر سه سناریو نسبت به دوره 1982-2021 کمتر بوده و از طرفی میانگین سرعت باد در فصل تابستان بیشتر از فصول دیگر است و بیشینه آن در ماه اوت نزدیک به 4 متر بر ثانیه است.



نمودار 1: بیشینه ماهانه سرعت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری 2021-1982 و دوره پیش‌بینی (2050-2024) بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$، $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$



نمودار 2: واریانس ماهانه سرعت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری 2021-1982 و دوره پیش‌بینی (2050-2024) بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$، $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$



نمودار 3: میانگین ماهانه سرعت باد ایستگاه بندرعباس در دوره آماری 2021-1982 و دوره پیش‌بینی (2050-2024) بر اساس سه سناریوی $RCP_{2/6}$، $RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$ منبع (نگارنده)

نتیجه‌گیری

مدل CanESM2 یک مدل اقلیم جهانی است که توسط مرکز مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل اقلیم کانادا توسعه یافته است. این مدل می‌تواند جنبه‌های مختلف سامانه زمین، ازجمله 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 [23].

در این پژوهش ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه بین‌المللی بندرعباس (باند 03-21) در دو دوره آماری 2021-1982 و 2024-2050 و با درنظرگرفتن بادهای جانبی مجاز (13 نات در ساعت) به روش FAA، محاسبه گردیده است. ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه برابر با 94/04% است. باتوجه‌به اینکه ارزیابی‌های نتایج شبیه‌سازی اقلیمی مدل CanESM2 برای باد از کیفیت مناسبی برخوردار است؛ این مدل تحت سناریوهای $RCP_{2/6}$,$RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$ خروجی گرفته شد؛ همچنین پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال 2050، ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه مزبور در سناریوهای $RCP_{2/6}$,$RCP_{4/5}$ و $RCP_{8/5}$ به ترتیب 2/41%، 1/82% و1/97% افزایش یابد روشن است که افزایش ضریب استفاده از باند در یک فرودگاه، می‌تواند افزایش ظرفیت ترافیک هوایی و بهبود ایمنی نشست‌وبرخاست هواپیما در آن فرودگاه مؤثر واقع شود؛ بنابراین تا سال 2050 نیاز به تغییر جهت باند فرودگاه بندرعباس نیست؛ اما باتوجه‌به گلبادهای هر سه سناریو و باتوجه‌به جهت بادهای غالب و قرینه باد غالب آن‌ها، برای جذب بادهای بیشتر از 13 نات احداث باند 160-340 پیشنهاد می‌شود.

باتوجه‌به RMSE≈0/6–0/75 m/s وR^2≈0/89–0/92 ، دقت سرعت برای محاسبات ضریب استفاده[16] مناسب است؛ بااین‌حال RMSE جهت≈11–13 (R^2≈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 بیاس‌کورکشن برداری، میانگین‌گیری برداری و ensemble از چند GCM اجرا شود؛ همچنین ضریب استفاده از باند برای دورهٔ 2050-2100 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.