

صص ۱۶-۱

## تأثیر تغییرات باد غالب بر پروازهای فرودگاه مشهد با رویکرد تغییر اقلیم

محمد خلیل نژاد

دانشجوی دکتری تخصصی آب و هواشناسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رضا برنا\*

دانشیار گروه جغرافیا، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

منوچهر فرج زاده اصل

استاد گروه جغرافیا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۱۴

### چکیده

جدیدترین گزارش IPCC اشاره می‌کند که در مطالعات اندکی به‌طور کمی، اثرات تغییر اقلیم بر هوانوردی مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس در مقاله حاضر به بررسی تأثیر تغییرات سمت و سرعت وزش باد غالب فرودگاه مشهد تا سال ۲۰۵۰ بر پروازهای این فرودگاه با رویکرد تغییر اقلیم پرداخته شده است. در این راستا با استفاده از نرم‌افزار SDSM و مدل CanESM2 و بر اساس سه سناریوی RCP<sub>2.6</sub>، RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub> سمت و سرعت وزش باد ایستگاه مشهد تا سال ۲۰۵۰ مورد مطالعه قرار گرفت و با استفاده از نرم‌افزار WRPLOT گلبادهای شانزده جهتی برای دوره آماری حاضر (۲۰۱۷-۱۹۹۱) و دوره پیش‌بینی (۲۰۵۰-۲۰۲۰) ترسیم گردید. پیش‌بینی‌ها بر اساس سه سناریوی مورد مطالعه نشان می‌دهد که جهت وزش باد غالب فرودگاه مشهد از سمت جنوبی به شمال شرقی تغییر می‌یابد و بر میزان وزش آن در سه سناریوی RCP<sub>2.6</sub>، RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub>، به ترتیب ۸/۳٪، ۹/۵٪ و ۹/۳٪ افزوده می‌شود. همچنین میزان وزش باد غالب این فرودگاه در محدوده سرعت ۵-۱۵ نات در سناریوهای یادشده به ترتیب با ۳/۹٪، ۵/۱٪ و ۵/۷٪ افزایش مواجه می‌شود و در محدوده سرعت ۱۳-۵ نات نیز به ترتیب ۴/۴٪، ۴/۶٪ و ۳/۸٪ افزایش می‌یابد و در محدوده سرعت‌های بیش از ۱۳ نات به صفر نزدیک می‌شود. از طرفی، ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه مشهد (باند ۳۱-۱۳) در دوره حاضر برابر با ۹۷/۷۵٪ است که در اثر تغییرات سمت و سرعت وزش باد غالب این فرودگاه تا سال ۲۰۵۰، ضریب مزبور در RCP<sub>2.6</sub> به ۹۵/۲۳٪ کاهش می‌یابد و در RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub> نیز به ترتیب به ۹۹/۶۶٪ و ۹۹/۹۳٪ افزایش می‌یابد. روشن است که افزایش ضریب استفاده از باند موجود یک فرودگاه، می‌تواند در افزایش ظرفیت ترافیک هوایی و بهبود ایمنی نشست و برخاست هواپیما در آن فرودگاه مؤثر واقع شود.

**واژگان کلیدی:** باد غالب، آب و هوا، تغییر اقلیم، فرودگاه مشهد، ضریب استفاده از باند پرواز.

### مقدمه

نامساعد بودن آب و هوا، عامل اصلی و یا حداقل یکی از عوامل مؤثر در وقوع ۲/۲۹٪ از سوانح هوانوردی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که یکی از هشت علت عمده رخ دادن این سوانح در گروهی، تحت عنوان "باد و ضعف در مقابله با آن" قرار دارد (ترولیپ و جنسن، ۱۹۹۱، ۳۱). جهت و سرعت وزش باد، نقش تعیین‌کننده‌ای در انجام یک پرواز ایمن دارد. زیرا

نامساعد بودن جهت و سرعت باد، عامل اصلی و یا حداقل یکی از عوامل مؤثر در وقوع ۴۷٪ از کل سوانح هوانوردی مرتبط با آب و هوا است. سهم وضعیت‌های مختلف باد در سوانح هوانوردی ناشی از این پدیده به ترتیب عبارت از: باد جانبی<sup>۱</sup> (سمت وزش باد نسبت به مسیر پرواز و یا نسبت به جهت باند، دارای یک زاویه باشد): ۵۵٪، باد پشت<sup>۲</sup>: ۲۲٪، باد گاستی<sup>۳</sup>: ۸٪، ویند شیر<sup>۴</sup>: ۸٪، باد متغیر<sup>۵</sup>: ۵٪ و گرد باد<sup>۶</sup>: ۲٪ است (برنا و خلیل نژاد، ۱۳۹۸). البته در برخی مواقع عدم وزش باد در هنگام بلند شدن و نشست هواپیما، می‌تواند مشکلاتی را به وجود آورد. زیرا برخی از بادهای هواپیما، مفید هستند (Thompson and Perry, 1997, 201) و باعث بهبود عملکرد هواپیما می‌شوند. بر این اساس می‌توان گفت که آب و هوا اثرات چشمگیری بر کارایی و امنیت حمل و نقل هوایی دارد و میزان این تأثیر، به پیش‌بینی صحیح و برنامه‌ریزی درست پرواز بستگی دارد (محمدی، ۱۳۸۹، ۲۱۲).

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که اثرات تغییر اقلیم بر هوانوردی شامل تغییر در الگوهای باد، تغییر در میزان بارش، بالا آمدن سطح آب دریا، افزایش دما و بیشتر و شدیدتر شدن همرفت است (Burbidge, 2016). همچنین تغییر اقلیم ممکن است از طریق تغییر در رویدادهای شدید آب و هوا، افزایش وقوع و شدت توربولانس هوای صاف، تغییرات گردش جوی در طول مسیر پرواز و تغییر در وزن برخاستن هواپیما بر عملیات‌های پروازی تأثیرگذار باشد (Zhou et al, 2018). این اثرات در مناطق مختلف آب و هوایی، متفاوت بوده و در مقیاس محلی عدم اطمینان‌ها افزایش می‌یابد. به‌طور کلی تغییر اقلیم می‌تواند منجر به وجود آمدن طیفی از مخاطرات بالقوه‌ای برای هوانوردی شود که با توجه به موقعیت جغرافیایی، نوع زیرساخت فرودگاه‌ها و نوع هواپیماها متفاوت خواهد بود (EUROCONTROL, 2013, 6).

یکی از اثرات شناخته شده تغییر اقلیم بر هوانوردی، تأثیر تغییرات الگوهای باد در انتخاب مسیر پرواز هواپیماها هست. به‌طور مثال، مطالعات انجام شده در خصوص انتخاب مسیر پرواز بهینه بر فراز شمال اقیانوس اطلس نشان می‌دهد که پروازهای این منطقه از الگوی بادهای فوقانی تأثیر پذیر هستند و غالب پروازهای رو به شرق از مزایای باد پشت قوی رود بادهای، از قبیل کوتاه شدن مدت پرواز و کاهش مصرف سوخت، بهره‌مند می‌شوند (Irvine et al, 2016). به‌علاوه تغییر در الگوهای باد می‌تواند بر ضریب استفاده از باند<sup>۷</sup> نیز تأثیرگذار باشد. بر اساس توصیه سازمان ایکائو، بایستی جهت‌گیری باند پرواز به نحوی انتخاب و طراحی شود که حداقل در ۹۵٪ پروازها، برای فرود و صعود قابل استفاده باشد که به آن ضریب استفاده ۹۵٪ گفته می‌شود (Annex 14, 2009, 1: p 3-1). به بیان دیگر، لازم است باند در امتدادی ساخته شود که برای ۹۵٪ پروازها، نشست و برخاست در وضعیت باد روبرو و یا باد جانبی با سرعت کمتر از ۱۳ نات، مقدور باشد (FAA, 2016, p 8-17). باندها در امتداد جهت باد غالب محلی ساخته می‌شوند. ولی ممکن است

1 Crosswind  
2. Tailwind  
3. Gusty wind  
4. Wind shear  
5. Variable wind  
6. Dust devil or Whirl wind  
7. Usability factor of runway

در اثر تغییر اقلیم، جهت باد غالب محلی تغییر نماید و در نتیجه وزش بادهای جانبی نسبت به باند موجود، افزایش یابد. در این شرایط اگر ضریب استفاده از باند در اثر افزایش بادهای جانبی کمتر از ۹۵٪ شود، نیاز به طراحی مجدد باندی دیگر به صورت متقاطع و یا غیر متقاطع با باند موجود، افزایش می‌یابد (Burbidge, 2016). بنابراین صنعت هوانوردی برای کاهش اثرات تغییر در الگوهای باد ناشی از تغییر اقلیم، نیازمند سرمایه‌گذاری‌های بیشتر در تجهیز وسایل پرنده جهت افزایش ایمنی پروازها است و ساخت باند جدید یا طراحی و ساخت فرودگاه‌های سازگارتر با تغییر اقلیم می‌تواند در خصوص عمل انطباق مؤثر واقع شود.

نظر به اهمیت تأثیر تغییر اقلیم بر هوانوردی و فرودگاه‌ها، پژوهش‌های مختلفی در این زمینه شکل گرفته است. مطالعات کوتس و ریتولد<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) نشان می‌دهد که تغییر در بادهای سطوح فوقانی، ناشی از تغییر اقلیم می‌تواند بر هوانوردی تأثیرگذار باشد. به طوری که تغییر در موقعیت و قدرت رود بادهای می‌تواند بر وقوع بادهای شدید و تغییرپذیری جهت باد در فرودگاه‌ها تأثیر گذاشته و از این طریق ظرفیت باندها را تغییر دهد. لاوا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) به این نتیجه رسیدند که عملکرد سیستم‌های مختلف حمل و نقل در اکثر کشورها به طیف وسیعی از آستانه‌های آب و هوایی از قبیل بارش، دما، رعد و برق، باد و سطح آب دریاها حساس هستند. ویلیامز و جوشی<sup>۳</sup> (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر وقوع پدیده توربولانس هوای صاف<sup>۴</sup> (CAT) در شرایط دو برابر شدن غلظت CO<sub>2</sub> پرداختند. ایشان نشان دادند که تا سال ۲۰۵۰ در مختصات جغرافیایی ۵۰ تا ۷۵ درجه شمالی و ۱۰ تا ۶۰ درجه غربی، شدت وقوع این پدیده به میزان ۱۰٪ تا ۴۰٪ و نرخ تناوب وقوع آن ۴۰٪ تا ۱۷۰٪ افزایش می‌یابد. مطالعات باربیدج (۲۰۱۵) نشان می‌دهد که اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر هوانوردی عبارت از کاهش ظرفیت ترافیک هوایی، افزایش توربولانس، افزایش مدت پرواز و افزایش تأخیر پروازها است. کافل و هورتون<sup>۵</sup> (۲۰۱۵) نشان دادند که در اثر تغییر اقلیم عملکرد هوایمی بوتینگ ۸۰۰-۷۳۷ با افزایش ۵۰ تا ۲۰۰ درصدی در تعداد روزهای همراه با محدودیت وزن بین ماه‌های مه و سپتامبر سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۰۷۰ تحت سناریوی RCP<sub>8.5</sub> مواجه خواهد شد. ویلیامز (۲۰۱۶) با مطالعه اثر دو برابر شدن غلظت CO<sub>2</sub> بر مدت پرواز مسیر لندن- نیویورک نشان داد که در اثر تغییر اقلیم، رود بادهای غالب این منطقه تشدید شده و در نتیجه آن؛ مدت پرواز از نیویورک به لندن، کمتر از ۵ ساعت و ۲۰ دقیقه و از لندن به نیویورک، بیش از ۷ ساعت طول خواهد کشید و به طور سالانه حدود ۲۰۰۰ ساعت از مجموع مدت پرواز تمام ترافیک هوایی این مسیر کاسته می‌شود و منجر به صرفه جویی ۷/۲ میلیون گالون سوخت و کاهش انتشار ۷۰ میلیون کیلوگرم CO<sub>2</sub> می‌شود. مطالعه ژو و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که میانگین دمای حداکثر روزانه فصل تابستان، عامل اصلی تأثیرگذار بر عملکرد برخاستن هواپیما از روی باند است. مانگینی

---

1. Koetse and Rietveld  
 2. Lovea et al.  
 3. Williams and Joshi  
 4. Clear Air Turbulence  
 5. Coffel and Horton  
 6. Zhou et al.

و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) با مطالعه تأثیر تغییرات جهت و سرعت باد در ارتفاعات بالا بر مدت پرواز لندن-نیویورک نشان دادند که پروازهای روبه شرق به طور متوسط در ارتفاع ۳۴ هزار پا حدود ۲ دقیقه زودتر از ارتفاعهای ۳۰ و ۳۹ هزار پا به مقصد می‌رسند و پروازهای روبه غرب در ارتفاع ۳۰ هزار پا حدود ۳ دقیقه زودتر از ارتفاعهای بالاتر به مقصد می‌رسند.

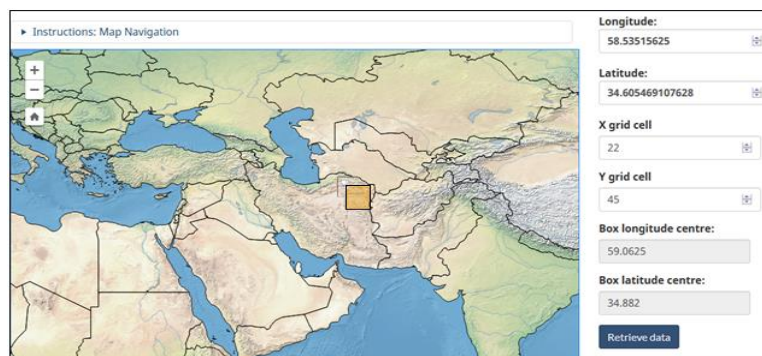
## داده‌ها و روش‌ها

**الف-** داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱- داده‌های مشاهده شده جهت و سرعت باد: در پژوهش حاضر از داده‌های موجود سمت و سرعت باد ایستگاه مشهد در دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۶۱ (در دو دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۶۱ و ۲۰۱۷-۱۹۹۱) استفاده شده است. داده‌های یادشده از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید؛

۲- داده‌های بزرگ‌مقیاس AOGCM و NCEP (داده‌های سناریویی): این داده‌ها با توجه به مختصات جغرافیایی ایستگاه مشهد از پایگاه داده مدل‌های گردش عمومی جو کشور کانادا اخذ گردید (شکل ۱). داده‌های بزرگ‌مقیاس مورد استفاده در این پژوهش، تحت سناریوهای RCPs و مدل‌های گردش عمومی جو سری CMIP<sub>5</sub> و به طور مشخص مدل CanESM<sub>2</sub> است. این داده‌ها در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۶۱ برای متغیرهای پیش‌بینی کننده NCEP و داده‌های تاریخی بوده و همچنین در دوره آماری ۲۱۰۰-۲۰۰۶ برای برآورد تغییرات آب و هوایی دهه‌های آتی بر اساس سناریوهای RCP<sub>2.6</sub>، RCP<sub>4.5</sub>، RCP<sub>6</sub> و RCP<sub>8.5</sub> می‌باشد. لازم به ذکر است که مدل CanESM<sub>2</sub> از سناریوی RCP<sub>6</sub> استفاده نکرده است؛ بر این اساس در پژوهش حاضر نیز از سناریوی یاد شده صرف نظر شده است.

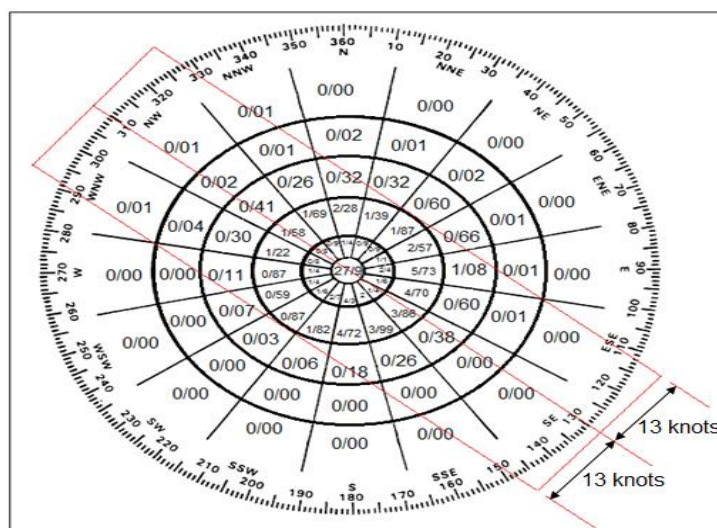
**ب-** در پژوهش حاضر از روش‌های کمی، جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده گردید. همچنین از نرم‌افزار WRPLOT برای ترسیم گلبادها و نرم‌افزار SDSM برای ریز مقیاس نمایی استفاده شده است. در ادامه به تشریح مختصر این دو نرم‌افزار پرداخته شده است.



مآخذ: <http://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2>

**شکل ۱:** سلول ایستگاه مشهد (با مربع نارنجی رنگ نشان داده شده است)، جهت دریافت داده‌های بزرگ‌مقیاس.

۱- نرم افزار WRPLOT: در مقاله حاضر از آخرین نسخه این نرم افزار (Version 8.0.2) استفاده شده است. در طراحی باند فرودگاه، داده های سمت و سرعت باد حداقل برای یک دوره پنج ساله مورد مطالعه قرار می گیرد (به بهمانی و ایمانی، ۱۳۷۶، ۳۷) و معمولاً از گلبادهای شانزده جهتی استفاده می شود (اویسی و حکیمی، ۱۳۹۴، ۲۸۸). بر این اساس در پژوهش حاضر از گلبادهای شانزده جهتی استفاده شد (جدول ۱) و از طریق تجزیه و تحلیل آماری گلبادهای موصوف، ابتدا ویژگی های سمت و سرعت باد در دو دوره آماری حاضر (۲۰۱۷-۱۹۹۱) و پیش بینی ها (۲۰۲۰-۲۰۵۰) مورد بررسی قرار گرفت و بادهای غالب هر دوره شناسایی گردید و با مقایسه نتایج دو دوره آماری یادشده، میزان تغییرات سمت و سرعت باد غالب این فرودگاه تا سال ۲۰۵۰ حاصل گردید. در ادامه ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه مشهود محاسبه شد. برای این منظور، از یک نوع سیستم مختصات قطبی گلباد (شکل ۲) که مختص محاسبات ضریب استفاده از باند است، استفاده گردید. در واقع این گلباد استاندارد شامل یک رشته دایره های هم مرکز است که با خطوط شعاعی متقارن قطع شده اند. خطوط شعاعی مزبور نشان دهنده میزان بزرگی و سرعت باد است، چنان که فضای بین هر دو خط شعاعی متوالی نشان دهنده جهت باد است (صفا زاده و همکاران ۱۳۹۳، ۲۷۳:۱).



مأخذ: نگارنگان

شکل ۲: ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه مشهد (باند ۳۱-۱۳) در دوره حاضر (۲۰۱۷-۱۹۹۱).

محاسبات مربوط به ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه مشهد در دوره حاضر به شرح زیر است:

$$۲۷/۹۳ + ۲۶/۲۳ + ۳۹/۸۵ + ۰/۱۲ + ۰/۲۶ + ۰/۳۸ + ۰/۶۰ + ۰/۹۰ + ۰/۱۰ + ۰/۰۱ + ۰/۰۲ + ۰/۰۹$$

$$+ ۰/۳۰ + ۰/۴۱ + ۰/۲۶ + ۰/۲۰ + ۰/۰۱ + ۰/۰۲ + ۰/۰۴ + ۰/۰۱ + ۰/۰۱ = ۹۷/۷۵$$

در این مطالعه از گلبادهای قطبی شانزده جهتی استفاده شده است که در آن ها دایره مرکزی گلباد، مقدار بادهای آرام کمتر از ۱ نات در ساعت را نشان می دهد. دایره اول، درصد بادهای با سرعت ۱ تا ۵ نات را نشان می دهد. دایره دوم، حداکثر سرعت باد جانبی مجاز بر محور باند را نشان می دهد. در این پژوهش، بادهای جانبی با سرعت کمتر از ۱۳ نات در

ساعت، مجاز در نظر گرفته شده است (FAA, 2016, p 8-17). دایره سوم، به بادهای با حداکثر سرعت ۲۰ نات، دایره چهارم به بادهای با حداکثر سرعت ۲۵ نات و دایره پنجم به بادهای با سرعت بیش از ۲۵ نات اختصاص یافته است. درصد زمانی که باد با سرعت معین و در جهت معینی می‌وزد، بر روی این گلباد و در قطعه مربوطه نوشته می‌شود. برای محاسبه ضریب استفاده از باند فعلی این فرودگاه (باند ۳۱-۱۳) از یک نوار کاغذی شفاف (ترانسپارانس) 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 ۱۳۰ درجه و ۳۱۰ درجه واقع شود. بدین ترتیب مجموع اعداد روی قطعه‌های واقع بین خطوط طرفین نوار شفاف (زیر سطح نوار شفاف)، محاسبه شد؛ در مواردی که قسمتی از یک قطعه زیر نوار شفاف و قسمتی خارج از آن واقع شود، در این صورت مقدار مربوطه متناسب با کل سطح قطعه محاسبه می‌گردد؛

۲- نرم‌افزار SDSM (مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری): برای ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم، ابتدا لازم است سامانه اقلیم به صورت مدل طراحی شود. در حال حاضر از مدل‌های جفت شده اقیانوس-اتمسفر استفاده می‌شود. به دلیل این که وضوح این مدل‌ها پایین است (بزرگ‌مقیاس هستند)، ریزمقیاس‌نمایی انجام می‌شود، تا وضوح آن‌ها بیشتر شود. سپس این مدل‌ها را با سناریوها ترکیب نموده و بر این اساس می‌توان آب و هوای آینده، مثلاً برای ۲۰۵۰ را پیش‌بینی نمود. با مقایسه پیش‌بینی‌های انجام شده با آب و هوای حاضر، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که آیا آب و هوا تغییر خواهد کرد یا نه (علیچانی، ۱۳۹۵)؟ بر این اساس در پژوهش حاضر از مدل بزرگ‌مقیاس سیاره‌ای CanESM2 که جزء مدل‌های جفت شده اقیانوس-اتمسفر است، استفاده گردید. این مدل توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب و هوایی کشور کانادا (CCCma<sup>1</sup>) طراحی شده است. در مدل یادشده، کل کره زمین به صورت  $64 \times 128$  سلول، شبکه‌بندی شده است. وضوح این مدل  $2/8^\circ \times 2/8^\circ$  درجه است. همچنین برای ریزمقیاس‌نمایی از نرم‌افزار SDSM استفاده گردید. این نرم‌افزار از داده‌های مشاهده شده ایستگاهی در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۶۱ استفاده کرده و تغییرات آب و هوایی را برای دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۰۶ برآورد می‌نماید (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۵، ۱۳۹). ولی به جهت این که با افزایش مدت پیش‌بینی، خطای آن نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین در پژوهش حاضر جهت کاهش خطای مزبور به پیش‌بینی سرعت و جهت باد ایستگاه مورد مطالعه تا سال ۲۰۵۰ بسنده شده است. نرم‌افزار SDSM ریزمقیاس‌نمایی آماری سری‌های روزانه آب و هوا را در هفت فرآیند مجزا انجام می‌دهد که عبارتند از: (۱) کنترل کیفی و تبدیل داده‌ها (۲) غربال‌گری متغیرهای پیش‌بینی کننده (۳) کالبد زنی مدل (۴) تولید داده‌های آب و هوا (پیش‌بینی کننده‌های مشاهده شده) (۵) تحلیل‌های آماری (۶) ترسیم خروجی مدل (۷) تولید سناریو (پیش‌بینی کننده‌های مدل اقلیم) (مشکوتی، ۱۳۹۴، ۷۴).

## یافته‌ها

در شکل‌های ۳ و ۴، همبستگی بین متغیرهای پیش‌بینی کننده بزرگ مقیاس NCEP و پیش‌بینی شونده سرعت و جهت باد در ایستگاه مشهد مورد ارزیابی قرار گرفته است. نرم‌افزار SDSM همبستگی‌های جزئی بین متغیرهای یادشده را نیز گزارش می‌نماید. این آماره‌ها به تشخیص میزان توان توصیفی مختص به هر یک از پیش‌بینی کننده‌ها کمک می‌کند (مشکوتی، ۱۳۹۴، ۱۰۰). بر اساس شکل ۳، بین متغیرهای پیش‌بینی کننده بزرگ مقیاس واگرایی در ۸۵۰ هکتوپاسکال و متوسط دما در ارتفاع دو متری با متغیر پیش‌بینی شونده سرعت باد ایستگاه مورد مطالعه همبستگی جزئی وجود دارد. همچنین بر اساس شکل ۴، بین متغیرهای پیش‌بینی کننده بزرگ مقیاس فشار متوسط سطح دریا و چرخندگی سطحی با متغیر پیش‌بینی شونده جهت باد ایستگاه مورد مطالعه همبستگی جزئی وجود دارد.

CORRELATION MATRIX					
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/1980 (Annual)					
Missing values: 0					
Missing rows: 0					
		1	2	3	4
1	mashhad-s.txt	1	0.150	0.159	0.239
2	ncepp500gl.dat	0.150	1	0.540	0.866
3	ncepp8zhgl.dat	0.159	0.540	1	0.363
4	nceptempgl.dat	0.239	0.866	0.363	1

PARTIAL CORRELATIONS WITH mashhad-s.txt		
	Partial r	P value
ncepp500gl.dat	-0.180	0.0000
ncepp8zhgl.dat	0.158	0.0000
nceptempgl.dat	0.254	0.0000

مأخذ: نگارندگان

شکل ۳: همبستگی بین سرعت باد و پارامترهای بزرگ مقیاس جوی در ایستگاه مشهد.

CORRELATION MATRIX				
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/1980 (Annual)				
Missing values: 0				
Missing rows: 0				
		1	2	3
1	mashhad s.txt	1	0.255	0.205
2	ncepmslpgl.dat	0.255	1	-0.045
3	ncepp1_zgl.dat	0.205	-0.045	1

PARTIAL CORRELATIONS WITH mashhad s.txt		
	Partial r	P value
ncepmslpgl.dat	0.270	0.0000
ncepp1_zgl.dat	0.224	0.0000

مأخذ: نگارندگان

شکل ۴: همبستگی بین جهت باد و پارامترهای بزرگ مقیاس جوی در ایستگاه مشهد.

جهت تجزیه و تحلیل داده‌های پیش‌بینی شده سمت و سرعت وزش باد ایستگاه فرودگاهی مشهد از نتایج گلبادهای شانزده جبهتی دوره آماری حاضر (۲۰۱۷-۱۹۹۱) و گلبادهای مربوط به RCP ها در دوره آماری ۲۰۵۰-۲۰۲۰ استفاده شد؛ گلبادهای مزبور در جدول ۱ ارائه شده است. با تجزیه و تحلیل گلبادهای مندرج در این جدول، وضعیت تغییرات سمت و

سرعت باد فرودگاه مشهد در دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۵۰ مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه گردید؛ در ادامه به تشریح جدول‌های موصوف پرداخته شده است.

**الف-** بر اساس جدول ۲ و با مقایسه سرعت وزش بادهای ایستگاه فرودگاهی مشهد در دوره آماری حاضر(۲۰۱۷-۱۹۹۱) نسبت به پیش‌بینی‌ها(۲۰۲۰-۲۰۵۰) تغییراتی به شرح زیر قابل ذکر است :

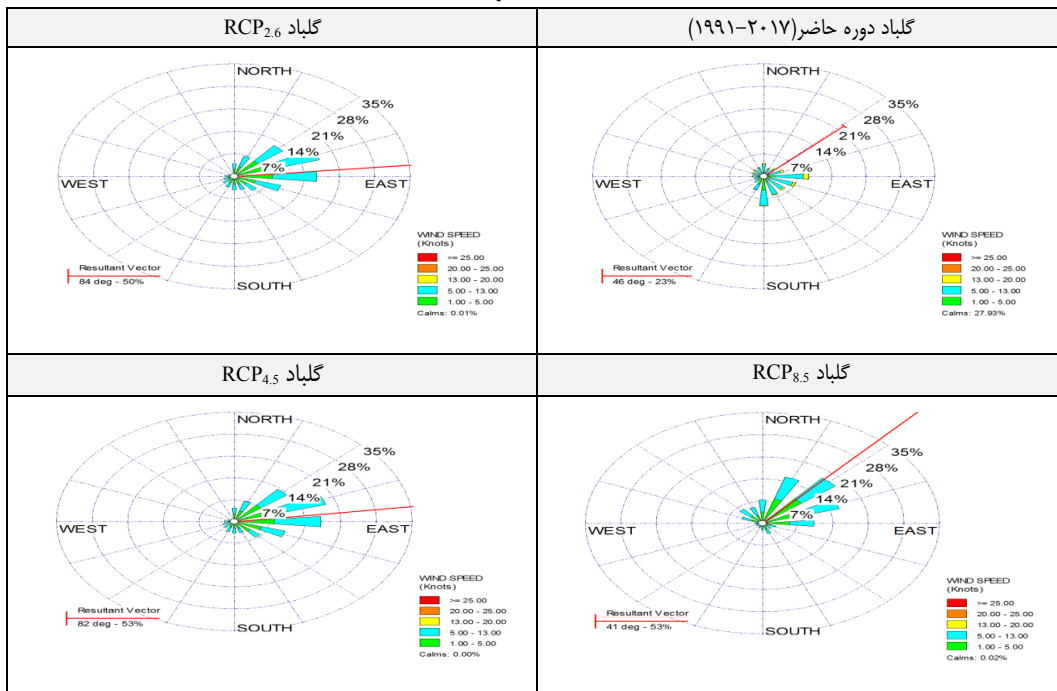
۱- تغییراتی که تا سال ۲۰۵۰ در سرعت وزش بادهای این ایستگاه رخ می‌دهد؛ در هر سه سناریوی مورد مطالعه تا حدودی مشابه است؛

۲- بادهای آرام این ایستگاه بر اساس سه سناریوی مورد مطالعه تا حدود صفر کاهش خواهد یافت. مقدار این کاهش در هر سه سناریو به‌طور یکسان برابر با ۲۷/۹٪ است. به عبارت دیگر می‌توان گفت، سرعت وزش بادهای آرام این ایستگاه تا سال ۲۰۵۰ نسبت به دوره حاضر با افزایش همراه است و ۲۷/۹٪ از بادهای آرام این ایستگاه به بادهایی با سرعت بیش از یک نات در ساعت تغییر می‌یابد؛

۳- میزان وزش بادهای با سرعت ۱-۵ نات و ۱۳-۵ نات تا سال ۲۰۵۰ با افزایش مواجه می‌شود. به‌طوری که کمترین افزایش در محدوده سرعت‌های یادشده مربوط به RCP<sub>2.6</sub> بوده و به ترتیب برابر با ۲۲/۷٪ و ۶/۴٪ است؛

۴- پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که در هر سه سناریو مورد مطالعه، وزش بادهای این ایستگاه با سرعت بیش از ۱۳ نات به صفر نزدیک می‌شود.

**جدول ۱:** گلبادهای شانزده جهتی ایستگاه مشهد در دوره آماری حاضر(۲۰۱۷-۱۹۹۱) و پیش‌بینی‌ها(۲۰۲۰-۲۰۵۰) بر اساس سه سناریوی RCP<sub>2.6</sub>, RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub>.



مأخذ: نگارندگان



**جدول ۲:** وضعیت سرعت باد ایستگاه مشهد در دوره آماری حاضر (۲۰۱۷-۱۹۹۱) و پیش‌بینی‌ها (۲۰۵۰-۲۰۲۰) بر اساس سه سناریوی RCP<sub>2.6</sub>، RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub>.

سرعت باد دوره	بادهای آرام	۱-۵ نات	۵-۱۳ نات	۱۳-۲۰ نات	۲۰-۲۵ نات	≥ ۲۵
حاضر	٪۲۷/۹	٪۲۶/۲	٪۳۹/۹	٪۵/۷	٪۰/۲	٪۰/۱
RCP <sub>2.6</sub>	۰	٪۴۸/۹	٪۴۶/۳	۰	۰	۰
تغییرات نسبت به دوره حاضر	کاهش ٪۲۷/۹	افزایش ٪۲۲/۷	افزایش ٪۶/۴	کاهش ٪۵/۷	کاهش ٪۰/۲	کاهش ٪۰/۱
RCP <sub>4.5</sub>	۰	٪۵۲/۶	٪۴۷/۱	۰	۰	۰
تغییرات نسبت به دوره حاضر	کاهش ٪۲۷/۹	افزایش ٪۲۶/۴	افزایش ٪۷/۲	کاهش ٪۵/۷	کاهش ٪۰/۲	کاهش ٪۰/۱
RCP <sub>8.5</sub>	۰	٪۵۳/۲	٪۴۶/۷	۰	۰	۰
تغییرات نسبت به دوره حاضر	کاهش ٪۲۷/۹	افزایش ٪۲۷	افزایش ٪۶/۸	کاهش ٪۵/۷	کاهش ٪۰/۲	کاهش ٪۰/۱

مأخذ: محاسبات نگارندگان

ب- بر اساس جدول ۳ و با مقایسه جهت وزش بادهای ایستگاه فرودگاهی مشهد در دوره آماری حاضر (۲۰۱۷-۱۹۹۱) نسبت به پیش‌بینی‌ها (۲۰۲۰-۲۰۵۰) تغییراتی به شرح زیر قابل ذکر است:

۱- تغییراتی که تا سال ۲۰۵۰ در سمت وزش بادهای این ایستگاه رخ می‌دهد؛ در دو سناریوی RCP<sub>2.6</sub> و RCP<sub>4.5</sub> تا حدودی مشابه است. در حالی که این تغییرات در RCP<sub>8.5</sub> متفاوت است؛

۲- پیش‌بینی‌ها بر اساس سه سناریو مورد مطالعه نشان می‌دهد که برآیند یا میانگین جهت وزش باد این ایستگاه تا سال ۲۰۵۰ نسبت به دوره حاضر دارای تغییراتی است. به طوری که بیشترین تغییر در RCP<sub>2.6</sub> برابر با ۳۸ درجه و کمترین تغییر در RCP<sub>8.5</sub> برابر با ۵ درجه است؛

۳- باد غالب این ایستگاه در دوره حاضر جنوبی است و بر اساس دو سناریوی RCP<sub>2.6</sub> و RCP<sub>4.5</sub> جهت این باد ۱۱۲/۵ درجه تغییر نموده و از سمت ۶۷/۵ درجه خواهد وزید. در RCP<sub>8.5</sub> با ۱۳۵ درجه تغییر همراه بوده و از سمت ۴۵ درجه خواهد وزید. به علاوه میزان وزش باد غالب در هر سه سناریوی مورد مطالعه با افزایش همراه است. بیشترین افزایش در RCP<sub>4.5</sub> برابر با ۹/۵٪ و کمترین افزایش در RCP<sub>2.6</sub> برابر با ۸/۳٪ است؛

۴- باد نائب غالب این ایستگاه در دوره حاضر شرقی است. پیش‌بینی‌ها بر اساس دو سناریوی RCP<sub>2.6</sub> و RCP<sub>4.5</sub> نشان می‌دهد که سمت وزش این باد تا سال ۲۰۵۰ تغییر نمی‌یابد. ولی در سناریوی RCP<sub>8.5</sub> سمت وزش این باد با ۲۲/۵ درجه تغییر از سمت ۶۷/۵ درجه خواهد وزید. همچنین بر میزان وزش این باد تا سال ۲۰۵۰ افزوده می‌شود. مقدار این افزایش بر اساس سه سناریوی یادشده در محدوده ۶/۷٪ تا ۷/۹٪ است؛

۵- از میزان وزش بادهای قرینه باد غالب این ایستگاه تا سال ۲۰۵۰ کاسته می‌شود. مقدار این کاهش بر اساس سه سناریوی مورد مطالعه، در محدوده ۱/۷٪ تا ۲/۷٪ است.

**جدول ۳:** وضعیت جهت باد ایستگاه مشهد در دوره آماری حاضر (۲۰۱۷-۱۹۹۱) و پیش‌بینی‌ها (۲۰۲۰-۲۰۵۰) بر اساس سه سناریوی RCP<sub>2.6</sub>، RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub>.

جهت باد / دوره	برآیند جهت / بادهای	باد غالب / درصد	باد نائِب غالب / درصد	فرینه باد غالب / درصد	ضریب استفاده از باند / موجود (باند ۳۱-۱۳)
حاضر	۴۶ درجه	S / ۹/۳ %	E / ۹/۲ %	N / ۴/۱ %	۹۷/۷۵ %
RCP <sub>2.6</sub>	۸۴ درجه	ENE / ۱۷/۶ %	E / ۱۶/۴ %	WSW / ۲/۳ %	۹۵/۲۳ %
تغییرات نسبت به دوره حاضر	۳۸ درجه	۱۱۲/۵ درجه / ۸/۳ % افزایش	بدون تغییر / ۷/۲ % افزایش	۱۱۲/۵ درجه / ۱/۸ % کاهش	۲/۵۲ % کاهش
RCP <sub>4.5</sub>	۸۲ درجه	ENE / ۱۸/۸ %	E / ۱۷/۱ %	WSW / ۲/۴ %	۹۹/۶۶ %
تغییرات نسبت به دوره حاضر	۳۶ درجه	۱۱۲/۵ درجه / ۹/۵ % افزایش	بدون تغییر / ۷/۹ % افزایش	۱۱۲/۵ درجه / ۱/۷ % کاهش	۱/۹۱ % افزایش
RCP <sub>8.5</sub>	۴۱ درجه	NE / ۱۸/۶ %	ENE / ۱۵/۹ %	SW / ۱/۴ %	۹۹/۹۳ %
تغییرات نسبت به دوره حاضر	۵ درجه	۱۳۵ درجه / ۹/۳ % افزایش	۲۲/۵ درجه / ۶/۷ % افزایش	۱۳۵ درجه / ۲/۷ % کاهش	۲/۱۸ % افزایش

مأخذ: محاسبات نگارندگان

- ج- در جدول ۳، ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه مشهد (باند ۳۱-۱۳) بر اساس سه سناریوی مورد مطالعه تا سال ۲۰۵۰ محاسبه شده است که در مقایسه با ضریب استفاده این باند در دوره حاضر، تغییراتی به شرح زیر قابل ذکر است:
- ۱- بر اساس محاسبات انجام شده، ضریب استفاده از باند فعلی این فرودگاه در سناریوی RCP<sub>2.6</sub> با ۲/۵۲ % کاهش مواجه می‌شود و در سناریوهای RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub> به ترتیب ۱/۹۱ % و ۲/۱۸ % افزایش می‌یابد؛
  - ۲- افزایش ضریب استفاده از باند فعلی این فرودگاه در سناریوهای RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub> می‌تواند در نتیجه کاهش سرعت وزش بادهای جانبی به کمتر از ۱۳ نات رخ دهد.
- د- تغییرات جهت و سرعت وزش بادهای غالب ایستگاه فرودگاهی مشهد بر اساس سه سناریوی مورد مطالعه تا سال ۲۰۵۰ در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این که در جدول ۳، تغییرات جهت وزش بادهای غالب این ایستگاه بررسی گردید؛ بر این اساس در ادامه به تغییرات سرعت وزش بادهای غالب به شرح زیر پرداخته شده است:
- ۱- تغییراتی که تا سال ۲۰۵۰ در سرعت وزش بادهای غالب این ایستگاه رخ می‌دهد؛ در هر سه سناریوی مورد مطالعه تا حدودی مشابه است؛
  - ۲- وزش بادهای غالب با سرعت ۵-۱ نات و ۱۳-۵ نات افزایش می‌یابد. مقدار این افزایش در هر سه سناریوی مورد مطالعه بیش از ۳/۸ % است؛
  - ۳- وزش بادهای غالب با سرعت بیش از ۱۳ نات به صفر نزدیک می‌شود.

**جدول ۴:** تغییرات جهت و سرعت بادهای غالب ایستگاه مشهد در دوره آماری حاضر (۲۰۱۷-۱۹۹۱)

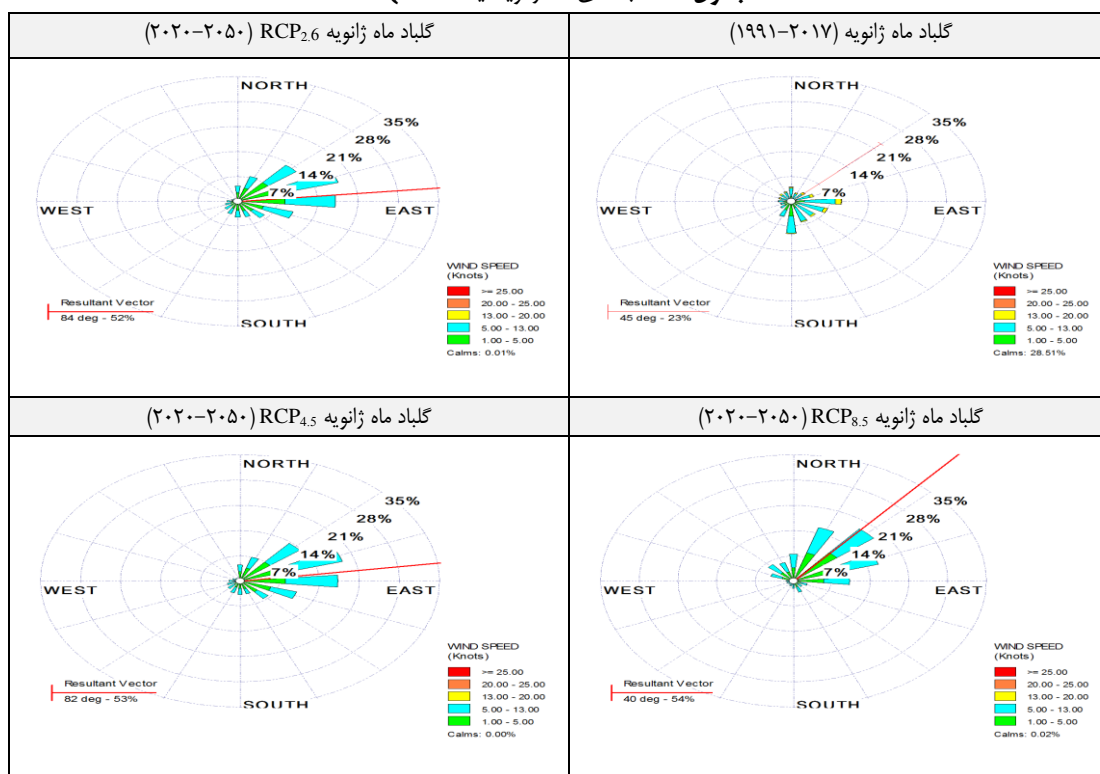
دوره	جهت باد غالب / درصد	سرعت باد غالب				
		۱-۵ نات	۵-۱۳ نات	۱۳-۲۰ نات	۲۰-۲۵ نات	≥ ۲۵
حاضر	%۹/۳ / S	%۴/۴	%۴/۷	%۰/۲	۰	۰
RCP <sub>2.6</sub>	%۱۷/۶ / ENE	%۸/۳	%۹/۳	۰	۰	۰
تغییرات نسبت به دوره حاضر	درجه ۱۱۲/۵ / %۸/۳ افزایش	%۳/۹ افزایش	%۴/۶ افزایش	%۰/۲ کاهش	بدون تغییر	بدون تغییر
RCP <sub>4.5</sub>	%۱۸/۸ / ENE	%۹/۵	%۹/۳	۰	۰	۰
تغییرات نسبت به دوره حاضر	درجه ۱۱۲/۵ / %۹/۵ افزایش	%۵/۱ افزایش	%۴/۶ افزایش	%۰/۲ کاهش	بدون تغییر	بدون تغییر
RCP <sub>8.5</sub>	%۱۸/۶ / NE	%۱۰/۱	%۸/۵	۰	۰	۰
تغییرات نسبت به دوره حاضر	درجه ۱۳۵ / %۹/۳ افزایش	%۵/۷ افزایش	%۳/۸ افزایش	%۰/۲ کاهش	بدون تغییر	بدون تغییر

مأخذ: محاسبات نگارندگان

### تغییرات ماهانه

جدول ۵، گلبادهای ترسیمی شانزده جهتی ماه ژانویه ایستگاه مشهد را نشان می‌دهد. بر اساس گلبادهای موصوف، در ماه ژانویه دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۷ باد غالب این ایستگاه از سمت جنوب و با فراوانی %۹/۲ وزیده است. بر اساس دو سناریوی RCP<sub>2.6</sub> و RCP<sub>4.5</sub> تا سال ۲۰۵۰، جهت وزش باد غالب در این ماه ۱۱۲/۵ درجه تغییر کرده و از سمت ۶۷/۵ (ENE) درجه و با فراوانی به ترتیب %۱۸/۳ و %۱۸/۸ خواهد وزید. در سناریوی RCP<sub>8.5</sub> با ۱۳۵ درجه تغییر همراه بوده و از سمت ۴۵ (NE) درجه با فراوانی %۱۸/۷ خواهد وزید؛ همچنین تغییراتی که تا سال ۲۰۵۰ در سرعت وزش باد غالب ایستگاه مشهد در ماه ژانویه رخ می‌دهد؛ در هر سه سناریوی مورد مطالعه تا حدودی مشابه است. بدین صورت که در هر سه سناریوی یادشده، فراوانی وزش باد غالب با سرعت ۱-۵ نات و ۵-۱۳ نات افزایش می‌یابد و میزان وزش آن‌ها به ترتیب به بیش از دو برابر و یک و نیم برابر می‌رسد. وزش باد غالب با سرعت بیش از ۱۳ نات نیز به صفر نزدیک می‌شود. در ادامه، گلبادهای مشابهی برای بقیه ماه‌های سال ترسیم شد. سپس جهت و سرعت باد غالب همراه با فراوانی وزش آن‌ها به تفکیک هر ماه، تعیین گردید. برای جلوگیری از اطاله مطلب، خلاصه نتایج مربوطه در جدول ۶ درج شده است. بررسی تغییرات جهت و سرعت باد غالب ماهانه ایستگاه مشهد نشان می‌دهد که وضعیت پیش‌بینی شده در جدول ۴، در همه ماه‌های سال رایج خواهد بود.

جدول ۵: گلبادهای ماه ژانویه ایستگاه مشهد.



مأخذ: نگارندگان

جدول ۶: تغییرات ماهانه جهت و سرعت وزش باد غالب ایستگاه مشهد.

ماه	دوره	جهت باد غالب / درصد	سرعت باد غالب				
			۱-۵ نات	۵-۱۳ نات	۱۳-۲۰ نات	۲۰-۲۵ نات	≥ ۲۵
ژانویه	حاضر	٪۹/۲ / S	٪۴/۳	٪۴/۸	٪۰/۱	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	٪۱۸ / ENE	٪۹	٪۹/۳	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	٪۱۸/۸ / ENE	٪۹/۴	٪۹/۴	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	٪۱۸/۷ / NE	٪۱۰/۲	٪۸/۵	.	.	.
فوریه	حاضر	٪۹/۲ / S	٪۴/۳	٪۴/۷	٪۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	٪۱۸/۳ / ENE	٪۹	٪۹/۳	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	٪۱۸/۸ / ENE	٪۹/۴	٪۹/۴	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	٪۱۸/۷ / NE	٪۱۰/۲	٪۸/۵	.	.	.
مارس	حاضر	٪۹/۲ / S	٪۴/۳	٪۴/۷	٪۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	٪۱۸/۳ / ENE	٪۹/۱	٪۹/۲	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	٪۱۸/۸ / ENE	٪۹/۵	٪۹/۳	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	٪۱۸/۶ / NE	٪۱۰/۲	٪۸/۴	.	.	.
آوریل	حاضر	٪۹/۲ / S	٪۴/۳	٪۴/۷	٪۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	٪۱۸/۳ / ENE	٪۹/۱	٪۹/۲	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	٪۱۸/۷ / ENE	٪۹/۵	٪۹/۲	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	٪۱۸/۶ / NE	٪۱۰/۲	٪۸/۴	.	.	.
مه	حاضر	٪۹/۲ / S	٪۴/۳	٪۴/۷	٪۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	٪۱۸/۲ / ENE	٪۹/۱	٪۹/۱	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	٪۱۸/۷ / ENE	٪۹/۵	٪۹/۲	.	.	.

	RCP <sub>8.5</sub>	%۱۸/۵ / NE	%۱۰/۲	%۸/۳	.	.	.
ژوئن	حاضر	%۹/۲ / S	%۴/۳	%۴/۷	%۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	%۱۸/۱ / ENE	%۹/۱	%۹	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	%۱۸/۶ / ENE	%۹/۵	%۹/۱	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	%۱۸/۶ / NE	%۱۰/۳	%۸/۳	.	.	.
ژوئیه	حاضر	%۹/۲ / S	%۴/۳	%۴/۷	%۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	%۱۸/۱ / ENE	%۹	%۹/۱	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	%۱۸/۶ / ENE	%۹/۵	%۹/۱	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	%۱۸/۶ / NE	%۱۰/۲	%۸/۴	.	.	.
اوت	حاضر	%۹/۲ / S	%۴/۳	%۴/۷	%۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	%۱۸/۲ / ENE	%۹	%۹/۲	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	%۱۸/۵ / ENE	%۹/۴	%۹/۱	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	%۱۸/۷ / NE	%۱۰/۳	%۸/۴	.	.	.
سپتامبر	حاضر	%۹/۲ / S	%۴/۳	%۴/۷	%۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	%۱۸/۲ / ENE	%۹	%۹/۲	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	%۱۸/۶ / ENE	%۹/۵	%۹/۱	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	%۱۸/۷ / NE	%۱۰/۲	%۸/۵	.	.	.
اکتبر	حاضر	%۹/۳ / S	%۴/۳	%۴/۸	%۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	%۱۸/۲ / ENE	%۹	%۹/۲	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	%۱۸/۶ / ENE	%۹/۴	%۹/۲	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	%۱۸/۶ / NE	%۱۰/۱	%۸/۵	.	.	.
نوامبر	حاضر	%۹/۳ / S	%۴/۴	%۴/۷	%۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	%۱۸/۳ / ENE	%۹	%۹/۳	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	%۱۸/۸ / ENE	%۹/۵	%۹/۳	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	%۱۸/۶ / NE	%۱۰/۱	%۸/۵	.	.	.
دسامبر	حاضر	%۹/۳ / S	%۴/۴	%۴/۷	%۰/۲	.	.
	RCP <sub>2.6</sub>	%۱۸/۴ / ENE	%۹/۱	%۹/۳	.	.	.
	RCP <sub>4.5</sub>	%۱۸/۹ / ENE	%۹/۶	%۹/۳	.	.	.
	RCP <sub>8.5</sub>	%۱۸/۶ / NE	%۱۰/۱	%۸/۵	.	.	.

مأخذ: محاسبات نگارندگان

## نتیجه گیری

جدیدترین گزارش شورای بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC) اشاره می کند که در مطالعات اندکی به طور کمی، اثرات تغییر اقلیم بر هوانوردی مورد بررسی قرار گرفته است (Irvine et al, 2016). درک این موضوع که تغییرات آب و هوایی، چگونه بر عملیات هوانوردی تأثیر خواهد گذاشت؛ برای برنامه ریزی های آتی هوانوردی اهمیت دارد (Zhou et al, 2018). بر این اساس در مقاله حاضر به بررسی تأثیر تغییرات سمت و سرعت وزش باد غالب فرودگاه مشهد تا سال ۲۰۵۰ بر پروازهای این فرودگاه با رویکرد تغییر اقلیم پرداخته شده است؛ باید توجه داشت که سمت وزش باد غالب فرودگاه مشهد در دوره حاضر (۲۰۱۷-۱۹۹۱)، جنوبی است. پیش بینی ها نشان می دهد که تا سال ۲۰۵۰، جهت وزش باد غالب این فرودگاه تغییر می یابد. به طوری که در دو سناریوی RCP<sub>2.6</sub> و RCP<sub>4.5</sub>، باد غالب فرودگاه مشهد از سمت ۶۷/۵

درجه و در سناریوی RCP<sub>8.5</sub> از سمت ۴۵ درجه خواهد وزید و بر میزان وزش آن‌ها به‌عنوان باد غالب، در سه سناریوی RCP<sub>2.6</sub>، RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub>، به ترتیب ۸/۳٪، ۹/۵٪ و ۹/۳٪ افزوده می‌شود. بر این اساس می‌توان چنین نتیجه گرفت که تا سال ۲۰۵۰، از وزش بادهای جنوبی این فرودگاه کاسته می‌شود؛ در حالی که بر وزش بادهای شمال شرقی به‌صورت قابل توجهی افزوده می‌شود. نتایج پژوهشی که در فرودگاه‌های قاره اروپا انجام شده است، نشان می‌دهد که یکی از اثرات کلیدی تغییر اقلیم بر فرودگاه‌های این قاره، تغییر در الگو و وضعیت باد است. به‌طوری که با تغییر سمت وزش بادهای غالب محلی در اثر تغییر اقلیم، وزش بادهای زاویه دار (باد جانبی) با امتداد باندهای پرواز، بیشتر شده و نیاز به احداث باند متقاطع افزایش می‌یابد (باربیدج، ۲۰۱۶)؛ همچنین پیش‌بینی‌ها بر اساس سه سناریوی مورد مطالعه نشان می‌دهد که سرعت وزش باد غالب فرودگاه مشهد دارای تغییراتی است. بدین صورت که تا سال ۲۰۵۰، وزش باد غالب در محدوده سرعت ۵-۱۳ نات در سناریوهای یادشده به ترتیب با ۳/۹٪، ۵/۱٪ و ۵/۷٪ افزایش مواجه می‌شود و در محدوده سرعت ۱۳-۵ نات نیز به ترتیب ۴/۶٪، ۴/۶٪ و ۳/۸٪ افزایش می‌یابد. در حالی که در هر سه سناریو مورد مطالعه در محدوده سرعت ۱۳-۲۰ نات حدود ۰/۲٪ کاهش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان گفت که وزش بادهای غالب این فرودگاه با سرعت بیش از ۱۳ نات به صفر نزدیک می‌شود؛ از طرفی، میانگین سرعت باد فرودگاه مشهد در دوره سی ساله ۱۹۹۰-۱۹۶۱، برابر با ۱/۸۰ متر بر ثانیه بوده است و در دوره ۲۰۱۷-۱۹۹۱، برابر با ۲/۵۷ متر بر ثانیه شده است و به عبارتی میانگین سرعت باد این فرودگاه حدود ۰/۷۷ متر بر ثانیه افزایش یافته است. در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ میانگین سرعت باد فرودگاه مشهد در هر سه سناریوی مورد مطالعه برابر با ۲/۵۰ متر بر ثانیه می‌شود. بنابراین تا سال ۲۰۵۰، میانگین سرعت باد این فرودگاه حدود ۰/۷ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. این موضوع در گزارش سازمان هواشناسی کشور نیز به نحوی ارائه شده است. به‌طوری که بر اساس گزارش این سازمان و به استناد آمار ۴۶ ساله ثبت شده از ایستگاه‌های هواشناسی کشور طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۰، میانگین سرعت باد در بسیاری از نقاط علی‌الخصوص در شهرهای بزرگ کشور، علاوه بر نوسانات شدید دارای روند کاهشی بوده است. گسترش شهرها و اثرات ساخت و سازها بر کاهش سرعت باد، آشکار است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۶، ۱۳)؛ در اثر تغییرات مزبور، ضریب استفاده از باند فعلی فرودگاه مشهد (باند ۳۱-۱۳) تا سال ۲۰۵۰، تغییر می‌یابد. ضریب استفاده از باند فعلی این فرودگاه در دوره حاضر برابر با ۹۷/۷۵٪ است. نتایج پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ این ضریب در RCP<sub>2.6</sub> به ۹۵/۲۳٪ کاهش می‌یابد. ولی در RCP<sub>4.5</sub> و RCP<sub>8.5</sub> به ترتیب به ۹۹/۶۶٪ و ۹۹/۹۳٪ افزایش می‌یابد. روشن است که افزایش ضریب استفاده از باند موجود یک فرودگاه، می‌تواند در افزایش ظرفیت ترافیک هوایی و بهبود ایمنی نشست و برخاست هواپیما در آن فرودگاه مؤثر واقع شود.

## منابع

- ۱- اویسی، خسرو و رحمت اله حکیمی (۱۳۹۴): برنامه‌ریزی و طراحی فرودگاه چاپ دوم، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، مرکز نشر.
- ۲- برنا، رضا و محمد خلیل نژاد (۱۳۹۸): بررسی نقش عناصر آب و هوا در سوانح هوانوردی، دومین کنفرانس ملی هوانوردی عمومی، پژوهشگاه هوافضا، فردوس، ۲۳ تا ۲۵ بهمن ۱۳۹۸.
- ۳- بهبهانی، حمید و مختار ایمانی (۱۳۷۶): طرح و محاسبه فرودگاه، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- ۴- ترولپ، استنلی آر و ریچارد اس جنسن (۱۹۹۱): عوامل انسانی در هواپیمایی عمومی، ترجمه علی اکبر پژوهان منش، تهران، دفتر تحقیقات کاربردی هواپیمایی ناجا.
- ۵- صفار زاده، محمود و همکاران (۱۳۹۳): برنامه‌ریزی و طراحی فرودگاه، جلد اول، چاپ چهارم، ویرایش دوم، تهران، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- ۶- علیجانی، بهلول (۱۳۹۵): یادداشت‌های کلاسی، درس مدل‌سازی آب و هوایی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد، مقطع دکتری، پاییز ۱۳۹۵.
- ۷- گودرزی، مسعود. حسینی، اسعد و ابراهیم مسگری (۱۳۹۵): مدل‌های آب و هواشناسی، زنجان، آذر کلک.
- ۸- محمدی، حسین (۱۳۸۹): آب و هواشناسی کاربردی چاپ سوم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۹- مشکوتی، امیرحسین (۱۳۹۴): کاربرد مدل‌های آماری در ارزیابی تغییر اقلیم و آثار آن (مدل‌های LARS-WG و SDSM)، تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات.
- ۱۰- سازمان هواشناسی کشور، دفتر مرجع ملی هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم (۱۳۹۶): آشکارسازی، ارزیابی اثرات و چشم‌انداز تغییر اقلیم در ایران طی قرن بیست و یکم، ویرایش ۲۳/۰۸/۱۳۹۶،  
<[Http://Irimo.Ir//Parameters/Weather/Modules/Cdk/Upload/Content/News/4892/Climate%20change%20report.Pdf](http://Irimo.Ir//Parameters/Weather/Modules/Cdk/Upload/Content/News/4892/Climate%20change%20report.Pdf)>.
- 11- Burbidge, Rachel (2015): *Avoiding The Predictable Surprise: Early Action Is The Key To Building A Climate Resilient Aviation Network*, Wiley Online Library, <[Doi.Org/10.1002/9780470686652.Eae1066](https://doi.org/10.1002/9780470686652.Eae1066)>.
- 12- Burbidge, Rachel (2016): *Adapting European Airports To A Changing Climate*, 6th Transport Research Arena, April 18-21, 2016, Pp 14-23, <[Doi: 10.1016/J.Trpro.2016.05.036](https://doi.org/10.1016/J.Trpro.2016.05.036)>.
- 13- Coffel, E. And Horton, R. (2015): *Climate Change And The Impact Of Extreme Temperatures On Aviation*. Weather, Climate And Society, Vol. 7, Pp 94-102, <[Doi:10.1175/Wcas-D-14-00026.1](https://doi.org/10.1175/Wcas-D-14-00026.1)>.
- 14- Eurocontrol (2013): *Challenges Of Growth 2013: Climate Change Risk And Resilience*, Available At: <<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/article/content/documents/official-documents/reports/201303-challenges-of-growth-2013-task-8.pdf>>.
- 15- Faa (Federal Aviation Administration). (2016): *Airplane Flying Handbook*, U.S. Department Of Transportation, Available At: <[www.faa.gov/library/manuals/aviation](http://www.faa.gov/library/manuals/aviation)>.
- 16- Icao (International Civil Aviation Organization). (2009): *Annex 14: Aerodromes, Volume I, Aerodrome Design And Operations*, Fifth Edition.
- 17- Irvine, Emma A. Shine, Keith P And Stringer, Marc A. (2016): *What Are The Implications Of Climate Change For Trans-Atlantic Aircraft Routing And Flight Time? Transportation Research, Part D: Transport And Environment*, Vol. 47, Pp 44-53, Available At: <[Doi.Org/10.1016/J.Trd.2016.04.014](https://doi.org/10.1016/J.Trd.2016.04.014)>.
- 18- Koetse, Mark J. Rietveld, Piet. (2009): *The Impact Of Climate Change And Weather On Transport: An Overview Of Empirical Findings*, Transportation Research Part D: Transport And Environment, Vol. 14, May 2009, Pp 205-221, Available At: <[Doi.Org/10.1016/J.Trd.2008.12.004](https://doi.org/10.1016/J.Trd.2008.12.004)>.
- 19- Lovea, Geoff. Soares, Alice And Herbert Puempel (2010): *Climate Change, Climate Variability And Transportation*, Procedia Environmental Sciences, Volume 1, Pp 130-145.

- 20- Mangini, Fabio. Irvine, Emma A. Shine, Keith P. (2018): The Dependence Of Minimum Time Routes Over The North Atlantic On Cruise Altitude, Royal Meteorological Society, Vol .25, Pp 655-664, Available At: <Doi.Org/10.1002/Met.1733>.
- 21- Thompson, Russell D And Allen Perry (1997): Applied Climatology Principles And Practice, London, Routledge.
- 22- Williams, Paul D And Manoj M. Joshi (2013): Intensification Of Winter Transatlantic Aviation Turbulence In Response To Climate Change, Nature Climate Change, Available At: <Https://Www.Nature.Com/Articles/Nclimate1866>.
- 23- Williams, Paul D. (2016): Transatlantic Flight Times And Climate Change, Environmental Research Letters. Available At: <Http://Iopscience.Iop.Org/Article/10.1088/1748-9326/11/2/024008/Pdf>.
- 24- Zhou, Tianjun. Ren, Liwen. Liu, Haiwen And Jingwen Lu. (2018): Impact Of 1.5°C And 2.0°C Global Warming On Aircraft Takeoff Performance In China, Science Bulletin, Vol. 63, Pp 700–707, Available At: <Doi.Org/10.1016/J.Scib.2018.03.018>.