

بررسی روند تغییرات سرعت باد در ایران مرکزی با استفاده از داده‌های بازتحلیل‌شده ECMWF

اصغر مولایی - دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی سینوپتیک، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران
حسن لشکری - دانشیار آب‌وهواشناسی دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۳۰

چکیده

باد یکی از پارامترهای مهم اقلیم است و به‌عنوان یک شاخص مناسب می‌تواند برای تغییرات اقلیمی و الگوهای مرتبط با جریان هوا به کار برده شود. هدف از این تحقیق بررسی روند تغییرات بلندمدت سرعت باد در ایران مرکزی است. به این منظور، از داده‌های سرعت باد پایگاه بازتحلیل‌شده ECMWF نسخه ERA-Interim با تفکیک مکانی $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ درجه قوسی و داده‌های هفت ایستگاه سینوپتیک طی دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۱۷ استفاده شد. برای درستی‌سنجی داده‌های پایگاه ECMWF از روش‌های R^2 ، MBE، و RMSE برای محاسبه روند از آزمون ناپارامتریک من-کندال (M-K) استفاده شد. نتایج نشان داد پایگاه ECMWF از دقت مناسبی برای برآورد سرعت باد برخوردار است؛ به طوری که مقدار R^2 در ایستگاه‌های مورد مطالعه بین 0.72 تا 0.95 متغیر است. متوسط سرعت باد در ایران مرکزی 3.19 m/s محاسبه شد. کمینه سرعت باد در ماه ژانویه با 2.01 و بیشینه سرعت باد با 3.95 m/s در ماه ژوئیه محاسبه شد. به ترتیب بیشترین شدت روند افزایشی و کاهش سرعت روند سرعت باد در ماه‌های مارس (نمره Z : 4.91) و دسامبر (نمره Z : -2.73) محاسبه شد که در سطح آماری 0.01 معنی‌دار است. همچنین، بیشینه پهنه‌های روند افزایشی و کاهش سرعت باد به ترتیب در ماه‌های فوریه و ژانویه به‌دست آمده است.

واژگان کلیدی: آزمون ناپارامتریک من-کندال، ایران مرکزی، پایگاه ECMWF سرعت باد.

مقدمه

اقلیم جزء فراگیر و مهم اکوسیستم محسوب می‌شود؛ تغییرات هرچند ناچیز آن می‌تواند سایر اجزای اکوسیستم را با درجات متفاوت تحت تأثیر خود قرار دهد. بررسی علل و آثار ناشی از تغییرات اقلیمی در علوم طبیعی امری لازم و ضروری است که توجه و در نظر گرفتن تأثیر آن‌ها در مدل‌سازی‌ها مدیریت سرزمین را مطابق با شرایط واقعی‌تر تضمین خواهد کرد (قهرمان و قره‌خانی، ۱۳۸۹).

سیستم آب‌وهوایی تغییرپذیری را در مقیاس‌های مختلف زمانی در بسیاری از مؤلفه‌های به‌هم‌پیوسته همچون جو و اقیانوس نشان می‌دهد (ویلیامز و همکاران، ۲۰۱۷). درک این تغییرات در رابطه حالت‌های تغییرپذیری و روند برای ارزیابی تغییرات اقلیمی ضروری است. در بین متغیرهای اقلیمی، باد به دلیل تغییرپذیری بالای زمانی - مکانی از یک سو و نقش آن در سایر پارامترها همچون دمای هوا از نقش چشم‌گیری برخوردار است. بررسی تغییرات باد از جنبه‌های مختلف اهمیت دارد؛ به طوری که با کاهش سرعت باد انرژی آن کاهش می‌یابد و در نتیجه آلودگی شهری افزایش می‌یابد. کاهش

سرعت باد همچنین سبب کم‌شدن انتقال گرما، رطوبت بین سطح زمین و جو، و نهایتاً افزایش دما می‌شود. کاهش سرعت باد در شب‌ها به‌خصوص در شب‌های زمستان باعث ایجاد وارونگی تابشی سطح زمین می‌شود. افزایش سرعت باد نیز سبب وقوع تندبادها، گردبادها، و وقوع خسارت در مناطق تحت تأثیر خواهد شد (رحیم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸). همچنین سرعت باد یکی از مؤلفه‌های مهم در معادلات ترکیبی برآورد تبخیر و تعرق است و وجود هرگونه روند در سرعت باد بر میزان نیاز آبی گیاهان نیز مؤثر خواهد بود (قهرمان و قره‌خانی، ۱۳۸۹).

باد در استراتژی‌های انرژی با هدف کاهش اثرهای تغییرات آب‌وهوایی بر جامعه و محیط زیست به‌عنوان مهم‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر تبدیل شده است (سلمون و همکاران، ۲۰۰۷). با وجود این، این منبع انرژی نیز مستعد تغییرات جهانی است، زیرا بادهای شدید ناشی از طوفان‌ها می‌توانند به خسارات جبران‌ناپذیری منجر شوند؛ حتی کاهش طولانی‌مدت سرعت باد در صورت عدم تحقق نیز می‌تواند به خسارات مهمی در صنعت برق منجر شود (واوتارد و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین، درک تغییرات متغیرهای آب‌وهوایی می‌تواند برای برآورد ریسک به‌ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر مفید باشد. همچنین، شناخت درست تغییرات باد می‌تواند برای توسعه سیاست‌های توسعه پایدار و جلوگیری از سرمایه‌گذاری‌های پرریسک مفید باشد (فانت و همکاران، ۲۰۱۶).

همان‌طور که بحث شد، باد پارامتر بسیار مهم آب‌وهوایی است، اما مطالعه آن به‌ویژه روند تغییرات آن دارای محدودیت‌هایی است؛ از جمله عدم دسترسی سری زمانی همگن و داده‌های بلندمدت با ایستگاه‌های ناکافی. از طرف دیگر، داده‌های ایستگاهی همچنین می‌توانند تحت تأثیر ناپوستگی‌های مربوط به تغییر در تجهیزات اندازه‌گیری، مکان ایستگاه، یا روش‌های متفاوت اندازه‌گیری باشد (تورالبا و همکاران، ۲۰۱۷). برای غلبه بر این محدودیت‌ها، مجموعه داده‌های بازتحلیل‌شده آب‌وهواشناسی جهانی که برای یک دوره بلندمدت در دسترس‌اند برای مطالعات آب‌وهواشناسی مفیدند. در سال‌های اخیر نیز از داده‌های این پایگاه‌ها برای کاربردهای مختلف انرژی باد استفاده شده است (کانون و همکاران، ۲۰۱۵؛ روز و اپت، ۲۰۱۵).

اهمیت مطالعه باد در حوزه‌های مختلف، اعم از انرژی، تغییرپذیری الگوهای جوی، تعدیل دما، تبخیر و تعرق، کشاورزی، و سایر زمینه‌های مرتبط باعث شده است تا مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شود.

پریور و همکاران (۲۰۰۹) روند سرعت باد را در ایالات متحده با استفاده از داده‌های بازتحلیل‌شده^۱ NCEP - 1 و ERA - 40^۲ و مدل عددی MM5 مطالعه کردند و به نتیجه رسیدند که، به‌رغم اختلافات جزئی در پایگاه‌های بازتحلیل‌شده، روند کلی سرعت باد کاهش است. روند سرعت باد بر فراز اقیانوس جنوبی عنوان پژوهشی است که هندی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی آن با استفاده از داده‌های چهار دهه گذشته رادیوسوند جزیره ماکقواریه^۳ پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد سرعت باد در حال افزایش است و روند آن برای سطوح بالاتر ملموس‌تر است. همچنین، آن‌ها از داده‌های پایگاه ECMWF^۴ نسخه ERA-Interim نیز برای بررسی با جزئیات بهتر استفاده کردند که نتایج داده‌های ایستگاهی را تأیید کرده است. درنهایت، تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سرعت باد چهار رژیم مجزای باد را نشان داد که بادهای شمال غربی از فراوانی بیشتری برخوردار بودند. پلیندر و همکاران (۲۰۱۳) روند طولانی‌مدت سرعت باد را در استرالیا مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین روند افزایشی را نشان می‌دهد.

1. National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Version-1
2. ECMWF Re-Analysis (ERA-40)
3. Macquarie
4. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

ولی در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین این روند چندان روشن نیست و به این نتیجه دست یافتند که تغییرات در گردش کلی جو می‌تواند دلیل این تغییرات در سرعت باد باشد. مارکوس و همکاران (۲۰۱۹) به مطالعه توزیع سرعت باد در مقیاس جهانی با استفاده از پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim و نسخه چهارم سیستم پیش‌بینی فصلی ECMWF پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد نسخه ERA-Interim از توانایی بالایی برای برآورد سرعت باد برخوردار است. همچنین، به این نتیجه رسیدند که اختلاف در توزیع پیش‌بینی‌های فصلی در مقیاس زمانی بزرگ‌تر بیشتر می‌شود که نیازمند رفع آریبی مجموعه داده‌هاست.

از جمله مطالعات در ایران در زمینه سرعت باد می‌توان به پژوهش رحیم‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) اشاره کرد. آن‌ها میانگین ماهانه سرعت باد و انرژی آن را براساس داده‌های ساعتی یازده ایستگاه سینوپتیک اصفهان طی دوره آماری ۱۹۹۲-۲۰۰۵ مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که سرعت باد در طی ماه‌های سرد کمتر است و با شروع فصل بهار سرعت باد افزایش می‌یابد. رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی روند تغییرات سرعت باد در شمال غرب ایران با هفت ایستگاه سینوپتیک، که دارای طولانی‌ترین دوره آماری بودند (۱۹۶۱-۲۰۰۵)، پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شمال غرب ایران در طول دوره آماری از نظر سرعت باد منطقه همگنی نیست. همچنین، در ایستگاه‌های ارومیه و خوی روند کاهشی و در اردبیل و زنجان روند افزایشی دیده شد. در تبریز و سنندج به ترتیب در یک و دو سری زمانی روند کاهشی دیده می‌شود. ایستگاه سقز در مقیاس‌های فصلی و سالانه فاقد روند است. میرعباسی نجف‌آبادی و دین‌پژوه (۱۳۹۴) به بررسی روند تغییرات سرعت باد در ایستگاه‌های منتخب ایران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در حالت کلی در بیشتر ایستگاه‌های ایران روند سرعت باد در همه ماه‌های سال (به جز ماه‌های فوریه و نوامبر) نزولی است. قاسمی و سیدی (۱۳۹۴) به شبیه‌سازی تغییرات و پیش‌بینی سرعت باد در ایران با استفاده از داده‌های آماری پنجاه‌ساله (۱۹۶۱-۲۰۱۰) پرداختند. نتایج حاصل از مدل هالت-وینترز برای پیش‌بینی سرعت باد تا سال ۲۰۲۰ نشان داد که سرعت باد در نیمه شرقی کشور و همچنین دامنه‌های جنوبی البرز که از نظر اقلیمی خشک و نیمه‌خشک‌اند تا سال ۲۰۲۰ افزایش خواهد یافت؛ درحالی‌که مناطق نیمه‌غربی، جنوب‌غربی، و مرکزی کشور روند کاهشی سرعت باد را تجربه خواهند کرد. بیشترین مقدار افزایش سرعت باد تا سال ۲۰۲۰ در ایستگاه گرگان و به مقدار ۱/۸ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار کاهش سرعت باد در ایستگاه‌های جنوب‌غربی کشور رخ خواهد داد؛ به نحوی که در ایستگاه آبادان سرعت باد تا سال ۲۰۲۰ از ۶/۳۱ متر بر ثانیه به ۴/۴۸ متر بر ثانیه کاهش خواهد یافت.

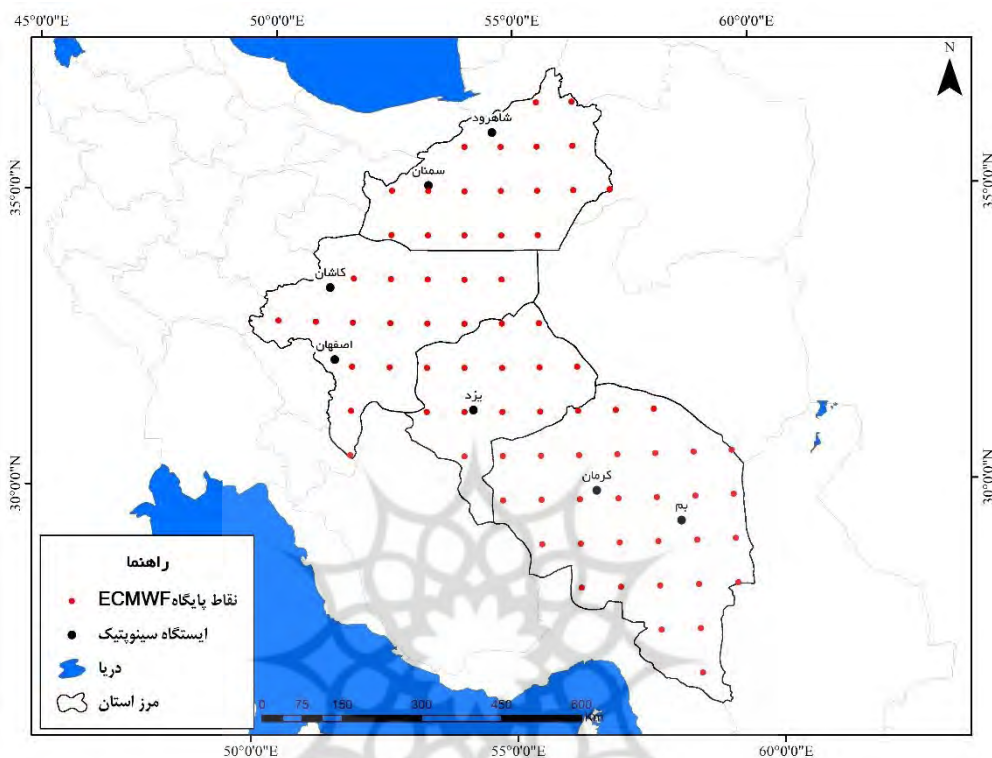
بررسی منابع تحقیق نشان می‌دهد تاکنون تحقیقی با استفاده از داده‌های شبکه‌ای با توان تفکیک بالا برای سرعت باد در ایران انجام نشده است و بیشتر مطالعات انجام‌شده در کشور سرعت باد را در ایستگاه‌های به‌خصوص مطالعه کرده‌اند. این تحقیق با هدف ارزیابی تغییرات سرعت باد و روند آن در ایران مرکزی انجام شده است و از آنجا که بخش قابل توجهی از این منطقه خشک است و ایستگاه‌های کافی در اختیار نیست از داده‌های پایگاه ECMWF استفاده شد. نتایج این مطالعه می‌تواند برای مطالعات مربوط به تغییرات اقلیمی، کشاورزی، و انرژی‌های تجدیدپذیر مفید باشد.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این تحقیق ایران مرکزی است. ایران مرکزی به محدوده‌ای گفته می‌شود که از شمال توسط کوه‌های البرز، از غرب و جنوب توسط رشته‌کوه زاگرس، و از شرق توسط کوه‌های پراکنده خراسان محدود می‌شود.

بخش اعظم ایران مرکزی آب‌وهوای گرم و خشک دارد که در ارتفاعات ملایم‌تر و مرطوب‌تر است. در این تحقیق چهار استان از ایران مرکزی انتخاب و به ارزیابی تغییرات باد آن پرداخته شد. استان‌های مورد مطالعه عبارت‌اند از: سمنان، اصفهان، یزد، و کرمان (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه همراه نقاط پایگاه ECMWF و ایستگاه‌های منتخب سینوپتیک

داده‌های تحقیق

در این تحقیق از دو گروه داده استفاده شد: ۱. داده‌های سرعت باد ایستگاه‌های سینوپتیک (۱۰ متری)؛ ۲. داده‌های سرعت باد پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim با تفکیک مکانی $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ درجه قوسی (همانند داده‌های ایستگاهی در ارتفاع ۱۰ متری).

داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک روزانه طی دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۱۷ برای هفت ایستگاه بم، کرمان، یزد، اصفهان، کاشان، شاهرود، و سمنان (در مرحله پردازش اولیه داده‌های روزانه تبدیل به ماهانه شدند) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد (موقعیت ایستگاه‌های منتخب در شکل ۱ آمده است). همگنی داده‌ها با استفاده از آزمون SNHT بررسی شد که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. سپس، با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) نرمال بودن داده‌ها تأیید شد و داده‌های مقفود در مقیاس میانگین ماهانه با استفاده از روش درون‌یابی خطی بازسازی شد. همچنین، از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک برای درستی‌سنجی داده‌های پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim استفاده شد.

پایگاه ECMWF یکی از مهم‌ترین پایگاه‌های داده‌های بازتحلیل‌شده در جهان است که مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است (دی و همکاران، ۲۰۱۱). در مطالعات بسیاری نشان داده شد که میزان خطای این پایگاه اطلاعاتی در مقایسه با داده‌های زمینی در بسیاری از نقاط جهان اندک و قابل چشم‌پوشی است و به همین دلیل می‌توان از این پایگاه

در کنار داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک یا حتی به‌عنوان یک داده‌ جای‌گزین در مناطق فاقد ایستگاه استفاده کرد (موراس، ۲۰۱۱). داده‌های بازتحلیل‌شده از ترکیب نتایج پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا با داده‌های مشاهداتی زمینی به‌دست می‌آید (ویترات، ۲۰۰۴). داده‌های پایگاه ECMWF از سال ۱۹۷۹ با تفکیک‌های مکانی ۰٫۱۲۵ تا ۳ درجه قوسی در مقیاس زمانی ساعتی، روزانه، و ماهانه در دسترس است. همان‌طور که گفته شد، در این تحقیق داده‌های سرعت باد نسخه ERA-Interim پایگاه ECMWF با تفکیک مکانی ۰٫۷۵×۰٫۷۵ درجه قوسی (نقاط قرمز در شکل ۱) از آدرس <https://apps.ecmwf.int> دانلود شد. سپس، داده‌ها در محیط ARCGIS رمزگشایی شد و مورد استفاده قرار گرفت.

برای درستی‌سنجی داده‌های بازتحلیل‌شده پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim از روش‌های ضریب تعیین (R^2) (رابطه ۱)، میانگین انحراف خطا (MBE) (رابطه ۲)، و میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۳) استفاده شد (رضیئی و ستوده، ۱۳۹۶).

$$R^2 \equiv \frac{\left| \sum_{i=1}^n x_i \bar{x} + Y_i \bar{Y} \right|^2}{\left| \sum_{i=1}^n x_i \bar{x} \right| \left| \sum_{i=1}^n Y_i \bar{Y} \right|^2} \quad (1)$$

$$MBE \equiv \frac{\sum_{i=1}^n x_i - n \bar{x}}{n} \quad (2)$$

$$RMSE \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3)$$

در این رابطه‌ها x_i و Y_i به‌ترتیب دامین داده‌ای ایستگاهی و بازتحلیل‌شده توسط پایگاه ECMWF، \bar{x} و \bar{Y} میانگین کل داده‌های x_i و Y_i در جامعه آماری، و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی است. روند سرعت باد در ایران مرکزی با آزمون ناپارامتریک من-کندال^۳ ارزیابی شد. این آزمون را ابتدا من^۴ (۱۹۴۵) ارائه کرد. سپس کندال^۵ (۱۹۷۵) آن را کامل کرد. در آزمون من-کندال^۳ از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$Z \equiv \begin{cases} \frac{S - 0.5}{\sqrt{V}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S + 0.5}{\sqrt{V}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

در این پژوهش نقطه تغییر سرعت باد با استفاده از آزمون Buishand (بوشند، ۱۹۸۲) بررسی شد. نقطه تغییر نقطه‌ای است که سری داده‌ها پیش از آن دارای یکی توزیع معین با میانگین ۰ و برای سال‌های بعد از آن دارای یک توزیع معین با میانگین ۱ است. کاربرد نقطه تغییر را در پژوهش‌های آب‌وهواشناسی تغییرپذیری دوره‌ای آب‌وهوایی،

1. Mean Bias Error (MBE)
2. Root Mean Square Error (RMSE)
3. Mann-Kendall
4. Mann
5. Kendall

وجود یا فقدان روند کاهشی و افزایشی، تغییر در ساختار گردش کلی جو، تغییر مکان ایستگاه، یا ابزار اندازه‌گیری بیان کرده‌اند (مفیدی و همکاران، ۱۳۹۲). آزمون Buishand طوری طراحی شده است که می‌تواند برای متغیرهایی استفاده شود که از هیچ توزیع آماری پیروی نمی‌کنند؛ اما این آزمون به‌طور ویژه برای حالت‌های نرمال پیش‌بینی شده است (بوشند، ۱۹۸۲).

نتایج و بحث

نتایج درستی‌سنجی بین پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim و ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک ایران مرکزی برای دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۷ در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که گفته شد، از روش‌های RMSE، MBE و R^2 برای درستی‌سنجی داده‌ها استفاده شد. شاخص RMSE در چهار ایستگاه شاهرود، یزد، کرمان، و بم کمتر از ۱ است که از عملکرد مناسبی برخوردار است. بیشترین مقدار RMSE در ایستگاه کاشان به مقدار ۲/۴۱۸ به‌دست آمده است. سمنان نیز با مقدار مربع خطا ۱/۸۳۵ بالاترین را بعد از ایستگاه کاشان نشان داده است. معیار ارزیابی MBE، علاوه بر دارابودن علامت مثبت (برآورد بیشتر پایگاه یا مدل) یا منفی (برآورد کمتر پایگاه یا مدل) مقدار انحراف از مقادیر مشاهده را نیز نشان می‌دهد که برآورد مدل خوب بوده و در آن انحراف کم و ناچیز است. معمولاً هر قدر مقدار این دو معیار و همچنین RMSE کمتر باشد صحت روش بیشتر است. براساس روش MBE، سرعت باد پایگاه ECMWF در دو ایستگاه یزد و کرمان انحراف کمتری را نسبت به ایستگاه‌های سینوپتیک شاهرود، سمنان، کاشان، اصفهان، و بم نشان داده‌اند. در همه ایستگاه‌های مورد بررسی شاخص MBE منفی است. R^2 نیز شاخص دیگری است که در این تحقیق از آن برای ارزیابی سرعت باد پایگاه ECMWF استفاده شد. ضریب تعیین بین ۰/۷۲ تا ۰/۹۵ برای ایستگاه‌های ایران مرکزی متغیر است. کمترین ضریب تعیین در ایستگاه اصفهان با ۰/۷۲۵ و بیشترین ضریب تعیین با ۰/۹۵۷ در ایستگاه شاهرود محاسبه شد. همچنین، دو ایستگاه یزد و کرمان نیز ضریب تعیین ۰/۸۹ را نشان دادند که با نتایج به‌دست‌آمده دو شاخص RMSE و MBE هم‌راستاست.

جدول ۱. مقادیر شاخص ریشه متوسط مربع خطا (RMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE)، و ضریب تعیین (R^2) بین پایگاه داده (ECMWF) نسخه ERA Interim و ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک ایران مرکزی برای دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۷

ایستگاه	RMSE	MBE	R^2
شاهرود	۰/۷۵۳	-۰/۷۳۳	۰/۹۵۷
سمنان	۱/۸۳۵	-۱/۷۹۸	۰/۸۳۳
کاشان	۲/۴۱۸	-۲/۳۹۲	۰/۷۸۴
اصفهان	۱/۰۵۳	-۰/۹۷۵	۰/۷۲۵
یزد	۰/۳۸۷	-۰/۳۵۱	۰/۸۹۲
کرمان	۰/۶۰۸	-۰/۳۳۱	۰/۸۹۵
بم	۰/۶۸۶	-۰/۶۰۸	۰/۷۳۸

در جدول ۲ مشخصات آماری سرعت باد در ماه‌های مختلف براساس خروجی پایگاه ECMWF در ایران مرکزی ارائه شده است. در این جدول پارامترهای سرعت باد کمینه و بیشینه و میانگین ارائه شده است. در منطقه مورد مطالعه بیشینه سرعت باد در ماه‌های گرم در شمال منطقه است و در ماه‌های سرد به جنوب منطقه منتقل می‌شود. براساس

اطلاعات مندرج در جدول، کمینه سرعت باد فقط در نوامبر (۱/۹۸) و دسامبر (۱/۹۶) از دو متر کمتر است. در سایر ماه‌ها این مقدار بین ۲/۰۱ تا ۲/۵۹ متر در نوسان است. بیشینه سرعت باد نیز بین ۳/۴۳ تا ۵/۹۰ متر به ترتیب در نوامبر تا جولای به دست آمده است. در ماه‌های گرم سال (ژوئن، جولای، و آگوست) بیشینه سرعت باد از ۵ متر بیشتر است. میانگین سرعت باد نیز در همین جدول ارائه شد. براساس نتایج کمینه سرعت بلندمدت باد در ایران مرکزی با مقدار ۲/۸۳ متر در ژانویه و بیشینه آن با مقدار ۳/۹۵ متر در جولای محاسبه شد. بر این اساس، می‌توان گفت در دوره سرد سال در ایران مرکزی سرعت باد از شدت کمتری برخوردار است. در مقابل، هر چه به سمت ماه‌های گرم سال پیش برویم بر سرعت باد افزوده خواهد شد. متوسط سالانه سرعت باد نیز ۳/۱۹ متر محاسبه شد.

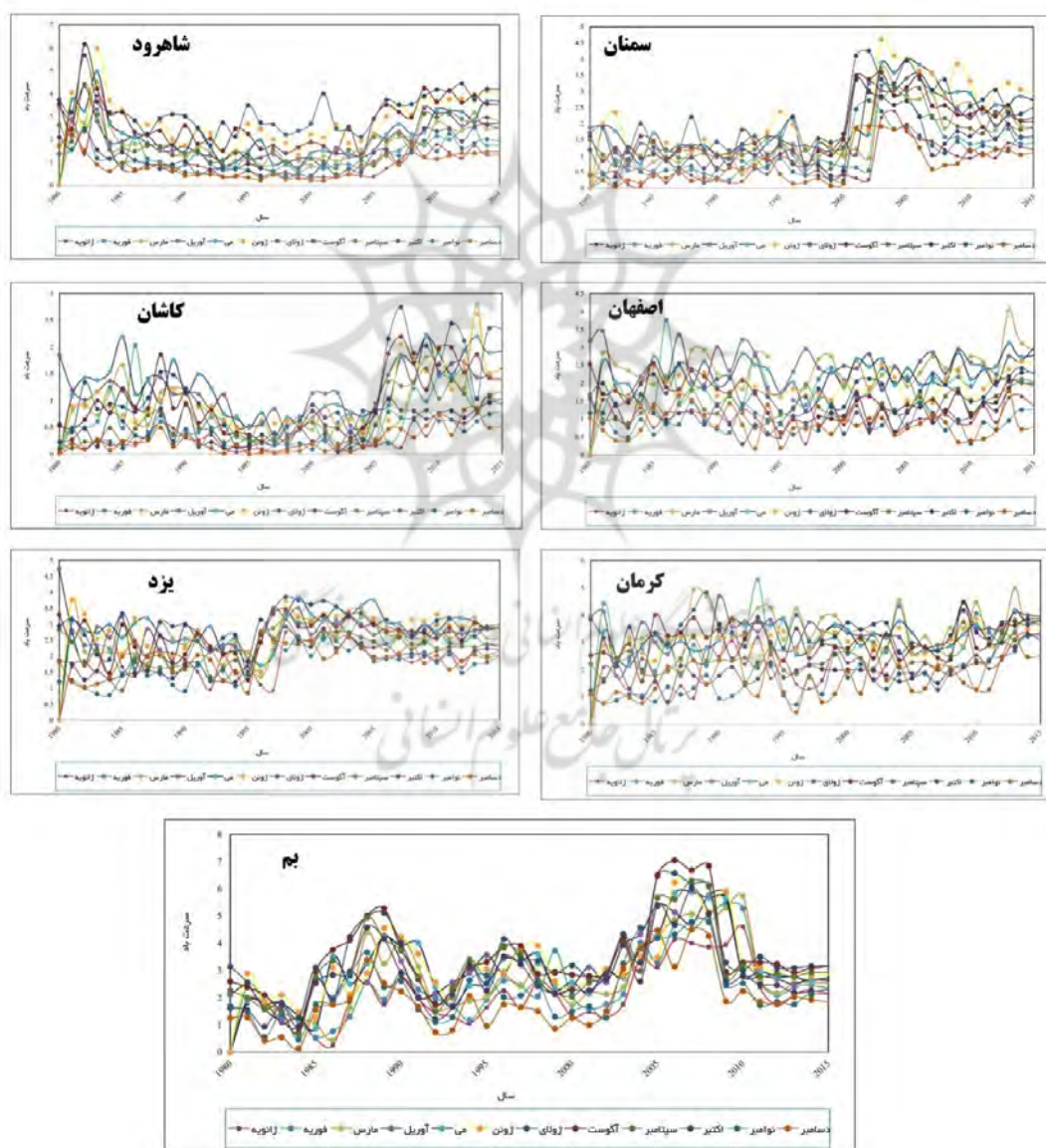
جدول ۲. مشخصات آماری سرعت باد با استفاده از پایگاه ECMWF در ایران مرکزی (۱۹۸۰-۲۰۱۷)

ماه	کمینه	بیشینه	میانگین	ماه	کمینه	بیشینه	میانگین
ژانویه	۲/۰۱	۴/۲۶	۲/۸۳	جولای	۲/۳۴	۵/۹۰	۳/۹۵
فوریه	۲/۲۱	۴/۶۶	۳/۲۲	آگوست	۲/۱۲	۵/۲۸	۳/۶۴
مارس	۲/۴۰	۴/۵۲	۳/۳۹	سپتامبر	۲/۲۰	۴/۲۷	۳/۰۵
آوریل	۲/۴۲	۳/۹۷	۳/۳۴	اکتبر	۲/۰۷	۳/۴۳	۲/۶۹
می	۲/۵۹	۴/۴۹	۳/۳۷	نوامبر	۱/۹۸	۳/۴۹	۲/۶۰
ژوئن	۲/۴۸	۵/۵۵	۳/۶۵	دسامبر	۱/۹۶	۳/۸۲	۲/۶۴

جدول ۳ همگنی و نقطه تغییر سالانه سرعت باد را در ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره آماری بلندمدت ۱۹۸۰-۲۰۱۷ نشان می‌دهد. برای آزمون نقطه تغییر از روش بوشند و برای همگنی داده‌ها از آزمون SNHT استفاده شد (محاسبات مربوط به نقطه تغییر و همگنی برای همه ماه‌های مورد مطالعه محاسبه شد. بنابراین، به دلیل محدودیت نگارشی در تعداد صفحات مقاله فقط نتایج سالانه ارائه شد). همان‌طور که در جدول نیز نشان داده شد، داده‌های سرعت باد در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه همگن‌اند؛ از هفت ایستگاه مورد بررسی پنج ایستگاه مقدار p -value، $0/0001$ و دو ایستگاه بم و شاهرود به ترتیب p -value، $0/001$ و $0/002$ را نشان دادند که بر این اساس همگنی داده‌ها تأیید شد. در همه ایستگاه‌ها، سرعت سالانه باد در دوره پس از نقطه تغییر بیشتر از دوره پیش از نقطه تغییر است که نشان‌دهنده وجود روند افزایشی در سرعت باد سالانه در همه ایستگاه‌های مورد بررسی است که در تأیید نتایج به دست آمده آزمون من-کندال است و در ادامه به بررسی آن پرداخته شد. نقطه تغییر، که مبین جهش در سری زمانی است، نیز در جدول ۳ آمده است. بیشترین جهش در سری زمانی سرعت باد دهه ۲۰۰۰ اتفاق افتاده است و فقط ایستگاه یزد دارای نقطه تغییر در سال ۱۹۹۶ بوده است. دلیل اختلاف در سال وقوع نقطه تغییر در شهرهای مختلف می‌تواند با سطح توسعه این شهرها در سال‌های مختلف و تغییر مکان برخی از ایستگاه‌ها همچون سمنان در ارتباط باشد. همچنین، می‌تواند ناشی از موقعیت جغرافیایی متفاوت این ایستگاه‌ها و تأثیرپذیری‌شان از توده‌های هوای متفاوت باشد، زیرا سامانه‌های همدیدی که مناطق مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهند در طی زمان تحت تأثیر گرمایش زمین دچار تغییراتی می‌شوند (سعیدآبادی و همکاران، ۲۰۱۶؛ علیزاده چوبری و نجفی، ۱۳۹۶).

جدول ۳. آزمون همگنی و نقطه تغییر سالانه سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	آزمون همگنی SNHT		نقطه تغییر (جهش در سری زمانی)	آزمون نقطه تغییر Buishand's	
	alpha	p-value		میانگین قبل از نقطه تغییر	میانگین بعد از نقطه تغییر
بم	۰/۰۵	۰/۰۰۱۵	۲۰۰۲	۲/۳۵۵	۳/۵۹۹
اصفهان	۰/۰۵	۰/۰۰۰۱	۲۰۱۱	۱/۵۹۵	۲/۰۹۰
کاشان	۰/۰۵	۰/۰۰۰۱	۲۰۰۵	۰/۵۶۳	۱/۳۴۶
کرمان	۰/۰۵	۰/۰۰۰۱	۲۰۰۸	۲/۶۱۱	۳/۴۳۲
سمنان	۰/۰۵	۰/۰۰۰۱	۲۰۰۰	۰/۹۵۹	۲/۲۸۵
شاهرود	۰/۰۵	۰/۰۰۰۲	۲۰۰۵	۱/۵۹۶	۲/۵۷۰
یزد	۰/۰۵	۰/۰۰۰۱	۱۹۹۶	۲/۰۵۳	۲/۶۷۵



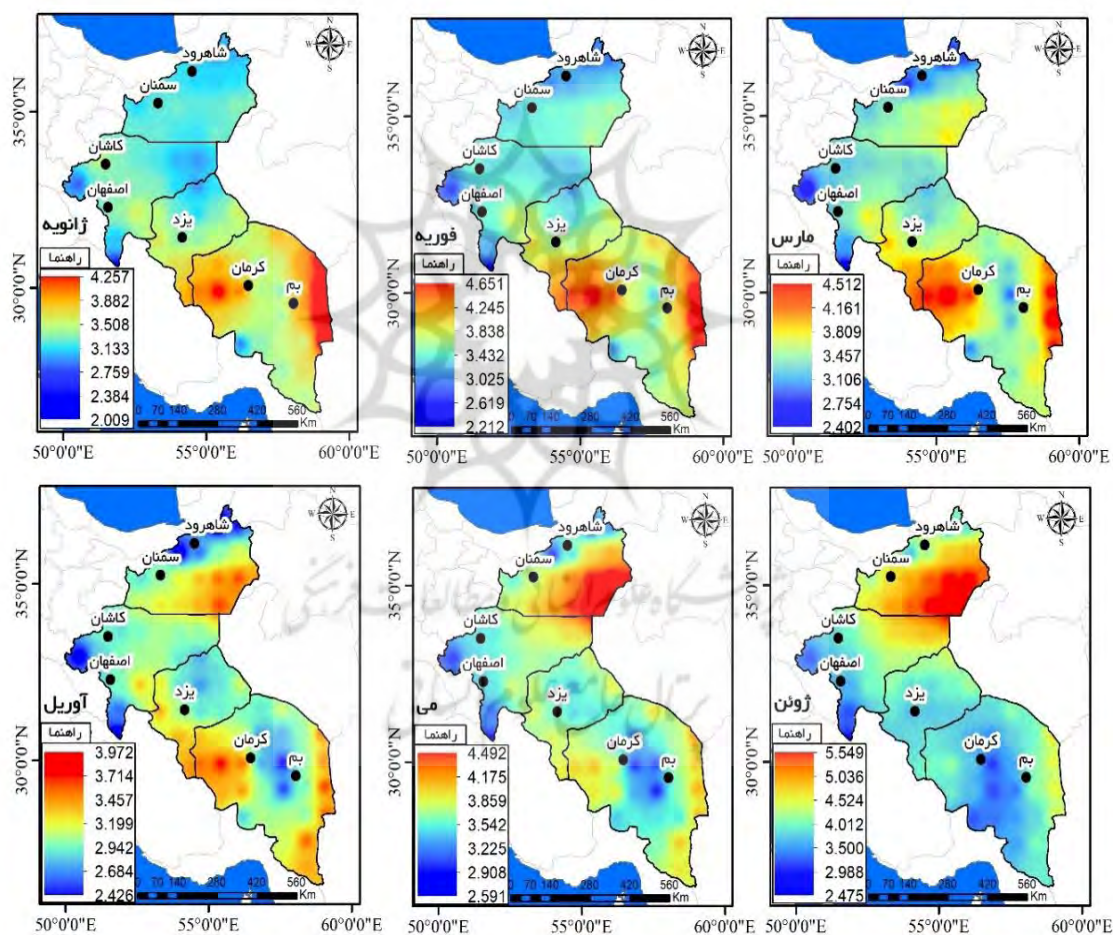
شکل ۲. سری زمانی بلندمدت ماهانه سرعت باد در ایستگاه‌های منتخب ایران مرکزی

شکل ۲ سری زمانی بلندمدت هفت ایستگاه سینوپتیک شاهرود، سمنان، کاشان، اصفهان، یزد، کرمان، و بم را برای دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۷ نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر در خصوص این نمودارها بحث شد، بیشترین جهش تغییرات سرعت باد در سه ایستگاه سمنان، کاشان، و بم طی دوره ۲۰۰۵-۲۰۱۰ اتفاق افتاده است و این تغییرات برای ایستگاه بم قابل توجه‌تر است. به عبارت دیگر، در ایستگاه‌های کویری سرعت باد جهش و روند بیشتری را نسبت به سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه تجربه کرده است. سرعت باد در هفت ایستگاه منتخب افت‌وخیز زیادی نشان داده است. نکته قابل توجه برای ایستگاه یزد است؛ به طوری که از سال ۱۹۹۵ در همه ماه‌های سال سرعت باد ۱ متر بر ثانیه افزایش یافته است. این افزایش سرعت باد به خصوص برای مناطق خشک داخلی ایران می‌تواند نتیجه افزایش دما و اختلاف دمایی این مناطق با مناطق مرتفع اطراف خود و افزایش اختلاف فشار باشد. در تأیید این مدعا آب خرابات و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی نقش باد ۱۲۰ روزه سیستان در وزش دمایی شرق و جنوب شرق ایران طی دوره ۱۹۸۳-۲۰۱۲ به این نتیجه رسیدند که الگوهایی با وزش باد شرقی هسته‌ای از وزش دمایی منفی در شرق و مرکز ایران ایجاد می‌کنند و وزش دمایی مثبت در مناطق مرکزی‌تر فلات ایران شکل می‌گیرد.

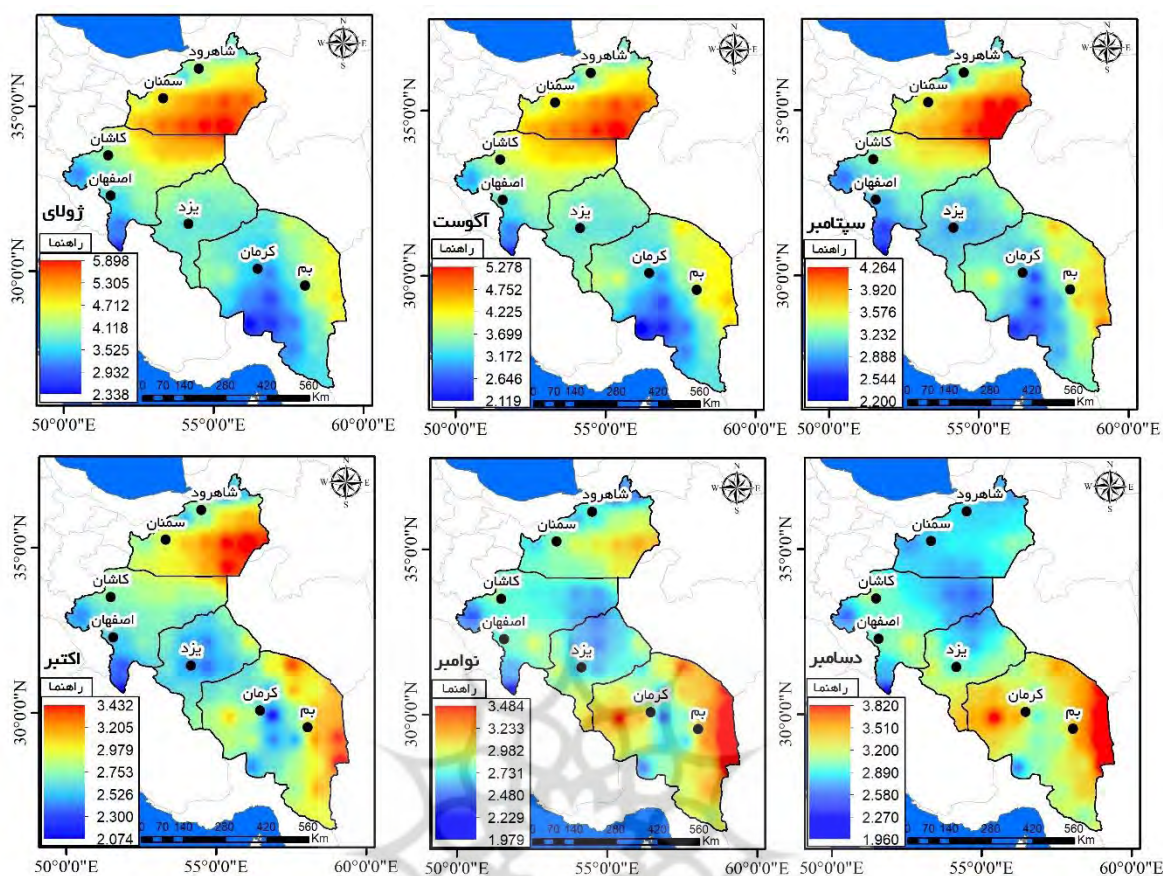
در شکل ۳ توزیع زمانی- مکانی سرعت باد در منطقه مورد مطالعه با استفاده از پایگاه ECMWF ارائه شده است. در فصل زمستان سرعت باد بین ۲ تا ۴/۶۵ متر بر ثانیه در نوسان است. بیشینه سرعت باد در ماه فوریه در مناطق جنوب غربی استان یزد و استان کرمان است. کمینه سرعت باد نیز در مناطق شمالی استان سمنان و مناطق غربی استان اصفهان قرار دارد. در فصل بهار کمینه سرعت باد نسبت به فصل زمستان افزایش داشته است. همچنین، بیشینه سرعت باد نیز در ماه ژوئن با ۵/۵۴ متر بر ثانیه به دست آمده است. در فصل بهار مناطق خشک استان‌های یزد، کرمان، و سمنان بیشینه سرعت باد را نشان داده‌اند؛ به طوری که با گرم‌تر شدن هوا سرعت باد در مناطق خشک از شدت بیشتری برخوردار شد. ماه‌های می و ژوئن کانون بیشینه سرعت باد در دشت کویر در استان سمنان قرار دارد و برعکس فصل زمستان که مناطق جنوبی ایران مرکزی بیشینه سرعت باد را داشته‌اند، در این فصل جابه‌جایی مکانی به سمت شمال برای سرعت بیشینه باد دیده می‌شود. از میان ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه نیز در پهنه مورد مطالعه در فصل زمستان کرمان در کانون بیشینه سرعت باد قرار گرفته است و در فصل بهار نیز ایستگاه سمنان قرار دارد. تغییرات سرعت باد در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند بر شدت طوفان‌های گردوغبار، افزایش یا کاهش شدت آلودگی هوا، شدت تبخیر و تعرق، و همچنین بر نیاز آبی گیاهان در مناطق نام‌برده اثرهای قابل توجهی داشته باشد. متوسط سرعت باد در ایران مرکزی ارتباط مستقیم با دمای هوا و فصل دارد؛ به طوری که بیشینه متوسط سرعت باد در فصل زمستان در ماه مارس (۳/۳۹ متر بر ثانیه) و در فصل بهار در ماه ژوئن (۳/۶۵ متر بر ثانیه) محاسبه شد. سرعت باد طی فصل بهار از جنوب به شمال در ایران مرکزی افزایشی است که به دلیل قرارگیری مناطق خشک همچون دشت کویر در شمال منطقه مورد مطالعه است.

شکل ۴ الگوی تغییرات مکانی سرعت باد را در ایران مرکزی برای فصل تابستان و پاییز نشان می‌دهد. الگوی کلی تغییرات سرعت باد مطابق با فصل بهار است؛ به طوری که یک گرادیان قوی جنوب به شمال برای سرعت باد دیده می‌شود. مناطق جنوبی استان سمنان و بخش‌های شمالی و شمال شرقی استان اصفهان (منطقه خور بیابانک) بیشینه سرعت باد را نشان داده‌اند. بیشینه سرعت باد با مقدار ۵/۸۹ متر بر ثانیه در ماه جولای در مناطق جنوبی استان سمنان به دست آمده است و همان‌طور که گفته شد، ارتباط مستقیم با دمای هوا دارد. در فصل تابستان هر چه به سمت فصل پاییز پیش برویم از مقدار سرعت باد کاسته می‌شود. در آگوست سرعت باد بیشینه سرعت باد نسبت به جولای ۰/۶۲ متر بر ثانیه و کمینه آن ۰/۲۱۹ متر بر ثانیه کاهش را نشان داده است. همچنین، در ماه سپتامبر این روند نزولی ادامه دارد. در

ماه سپتامبر به نسبت ماه اگوست بیشینه سرعت باد $1/014$ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. در فصل پاییز الگوی دوگانه از سرعت باد را برای ایران مرکزی نشان داده است. الگوی مکانی سرعت باد در ماه اکتبر مشابه با فصل تابستان است. در این ماه مناطق خشک استان سمنان، کرمان، و شمال استان اصفهان بیشینه سرعت باد را نشان داده‌اند. همچنین، بیشینه سرعت باد در ماه اکتبر به نسبت سایر ماه‌های فصل پاییز کمترین مقدار را نشان داده است. در دو ماه نوامبر و دسامبر تغییرات مکانی سرعت باد در ایران مرکزی الگوی زمستانه به خود گرفته‌اند. در ماه نوامبر بیشینه سرعت باد در مناطق شرقی و جنوبی استان کرمان (مناطق واقع در دشت لوت)، جنوب غربی استان یزد، و دشت کویر واقع در استان سمنان قرار دارد. در ماه دسامبر تغییرات مکانی سرعت باد به نسبت ماه‌های پیشین فصول پاییز و تابستان کاملاً برعکس می‌شود. در این ماه بیشینه سرعت باد درست در دشت لوت در استان کرمان با مقدار $3/820$ متر بر ثانیه قرار دارد. در این ماه کرمان و بم بیشینه سرعت باد و سمنان و شاهرود کمینه سرعت باد را دارا می‌باشند.



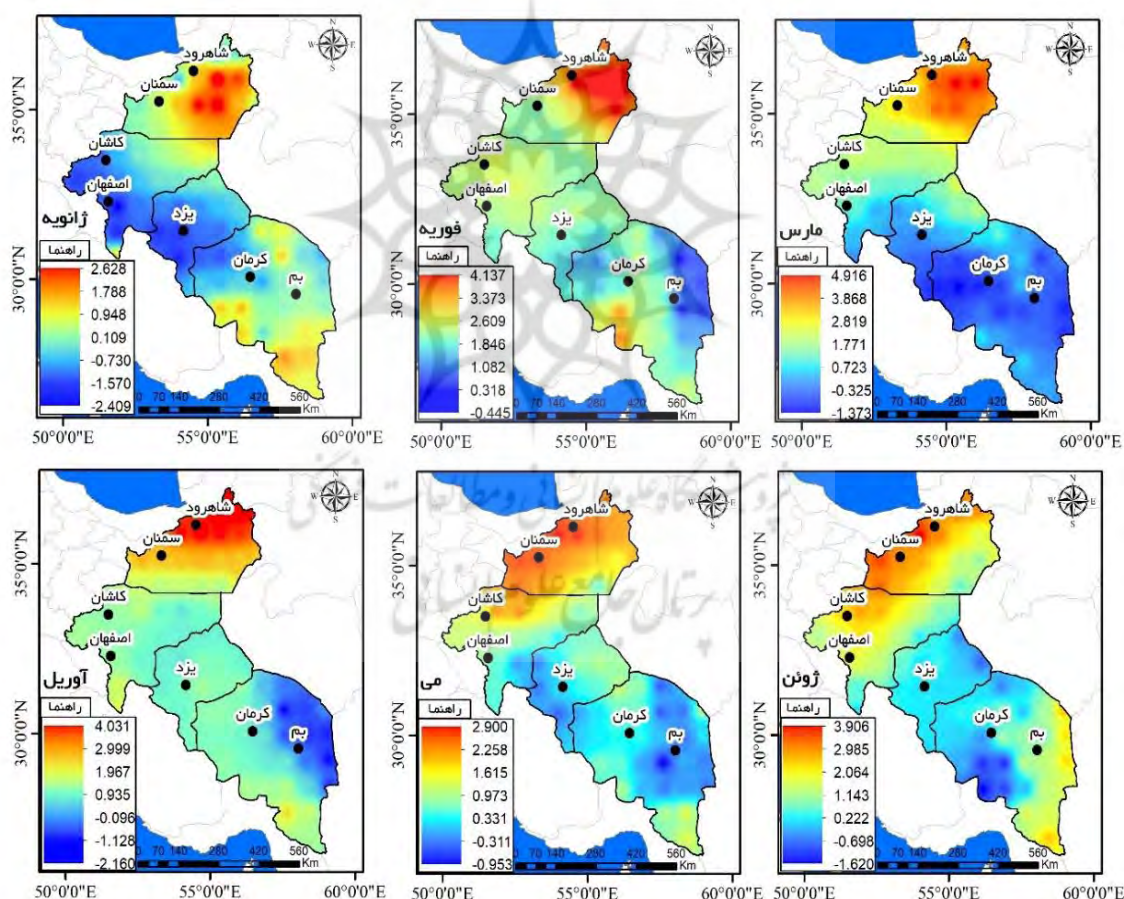
شکل ۳. پراکنش مکانی باد (m/s) در ایران مرکزی براساس پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim



شکل ۴. پراکنش مکانی باد (m/s) در ایران مرکزی براساس پایگاه داده‌های نسخه ERA-Interim

شکل‌های ۵ و ۶ و جدول ۴ روند سرعت باد را در ایران مرکزی با استفاده از پایگاه داده‌های ECMWF نشان می‌دهند. شکل ۱ سری زمانی بلندمدت ماهانه هفت ایستگاه سینوپتیک را در ایران مرکزی نشان می‌دهد. در بین فصول و ماه‌های مورد مطالعه، فصل زمستان بیشینه شدت روند افزایشی سرعت باد (نمره Z آزمون من - کندال ۴/۹۱۶ در ماه مارس) را نشان می‌دهد که این روند افزایشی در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است. کانون بیشینه روند افزایشی سرعت باد در استان سمنان (شکل ۵) قرار دارد و هر چه از ژانویه به سمت مارس پیش برویم بر شدت و پهنه‌های روند افزایشی افزوده می‌شود. در بین ماه‌های سال فوریه بیشترین درصد پهنه‌های روند افزایشی را داراست؛ به طوری که در این ماه در ۹۲/۲۰ درصد ایران مرکزی روند افزایشی سرعت باد دیده می‌شود. در ماه مارس، برخلاف فوریه، پهنه‌های روند افزایشی مقدار کاهشی را نشان می‌دهند (۶۴/۹۳ درصد دارای روند افزایشی)، اما بر شدت روند افزوده شده است. بیشینه روند کاهشی در ماه ژانویه در یزد، اصفهان، و کرمان (سری زمانی ماهانه هر ایستگاه در شکل ۱ آمده است) قرار گرفته و بیشینه روند کاهشی در فوریه در مناطق غربی استان کرمان در دشت لوت قرار گرفته است. در ماه مارس مناطقی با روند کاهشی در بخش‌های جنوبی استان اصفهان و یزد و کرمان قرار گرفته‌اند. روند کاهشی فقط در ماه ژانویه در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است و در دو ماه فوریه و مارس، به‌رغم کاهشی بودن روند، این مقدار از نظر آماری معنی‌دار نیست. ماه ژانویه با ۶۷/۵۴ درصد پهنه‌های هم‌روند کاهشی بیشینه مناطقی با روند کاهشی را داراست و ماه فوریه با ۷/۸۰ درصد پهنه‌های هم‌روند کاهشی کمینه روند کاهشی را در میان ماه‌های مختلف سال داراست. در فصل بهار (شکل ۵) بر گستره پهنه‌های روند افزایشی در ایران مرکزی افزوده

می‌شود و در هیچ ماهی از این فصل پهنه‌هایی با روند کاهشی سرعت باد به ۵۰ درصد نمی‌رسد؛ به طوری که بیشینه روند کاهشی سرعت باد مربوط به ماه آوریل ۴۰/۲۶ درصد است. بیشینه شدت روند افزایشی بیشینه در ماه آوریل با نمره Z آزمون من-کندال ۴/۰۳۱ به دست آمده است که در سطح آماری ۹۹ درصد معنی‌دار است. همچنین، ژوئن با ۸۰/۵۲ درصد پهنه‌های هم‌روند افزایشی بعد از مارس بیشینه مناطق با روند افزایشی سرعت باد را در فصل بهار به خود اختصاص داده است. در مقابل پهنه‌هایی با روند کاهشی در ژوئن، که آخرین ماه فصل بهار است، پهنه‌هایی با روند کاهشی به ۱۹/۴۸ درصد می‌رسد. فصل بهار همانند فصل زمستان کانون اصلی روند افزایشی سرعت باد در شمال منطقه مورد مطالعه در استان سمنان است. در دو ماه می و ژوئن مناطقی با روند افزایشی به استان اصفهان (سری زمانی ماهانه اصفهان در شکل ۱) نیز کشیده می‌شود. در ماه می مناطقی با روند افزایشی سرعت باد تا کاشان و در ماه ژوئن تا اصفهان نیز ادامه دارد. مناطقی با روند کاهشی سرعت باد نیز فقط در ماه آوریل با مقدار نمره Z ۲/۱۶۰ (معنی‌دار سطح ۹۵ درصد) در استان غرب استان کرمان دیده می‌شود. در ماه‌های می و ژوئن نیز جنوب استان اصفهان، بخش‌های قابل توجهی از استان یزد، و کرمان نیز روند کاهشی سرعت باد را دارند که جزئیات آن در جدول ۴ آمده است.

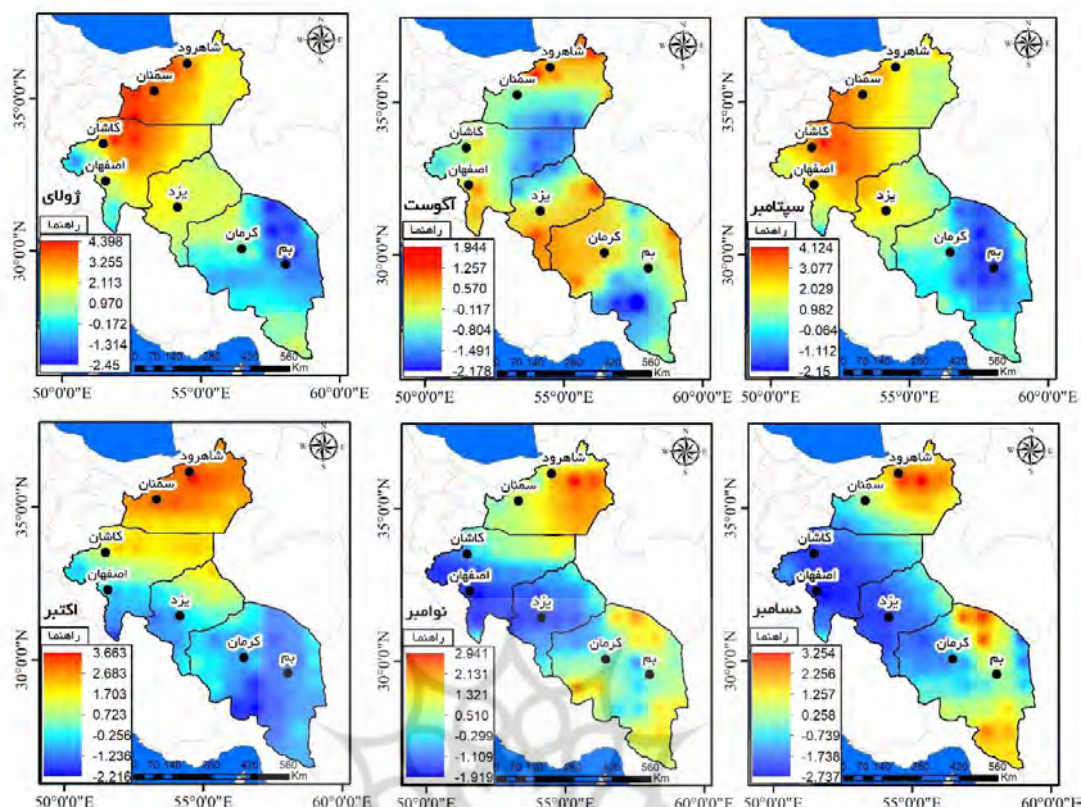


شکل ۵. روند تغییر سرعت باد در ایران مرکزی با استفاده از آزمون من-کندال براساس پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim

جدول ۴. درصد پهنه‌های روند افزایشی و کاهششی با استفاده از آزمون من-کندال

ماه	روند افزایشی	روند کاهششی	ماه	روند افزایشی	روند کاهششی
ژانویه	۳۲٫۴۶	۶۷٫۵۴	جولای	۷۰٫۱۲	۲۹٫۸۸
فوریه	۹۲٫۲۰	۷٫۸۰	اگوست	۶۲٫۳۴	۳۷٫۶۶
مارس	۶۴٫۹۳	۳۵٫۰۷	سپتامبر	۷۶٫۶۲	۲۳٫۳۸
آوریل	۵۹٫۷۴	۴۰٫۲۶	اکتبر	۴۹٫۳۶	۵۰٫۶۴
می	۷۷٫۹۲	۲۲٫۰۸	نوامبر	۵۵٫۸۴	۴۴٫۱۶
ژوئن	۸۰٫۵۲	۱۹٫۴۸	دسامبر	۳۶٫۳۶	۶۳٫۶۴

روند سرعت باد در دو فصل تابستان و پاییز با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال در ایران مرکزی در شکل ۶ نشان داده شد. الگوی غالب روند همانند فصول پیشین است؛ به طوری که مناطقی با بیشینه روند کاهششی سرعت باد در مناطق جنوبی و مناطقی با روند افزایشی در مناطق شمالی ایران مرکزی دیده می‌شود. اما آنچه روند سرعت باد را در دو فصل تابستان و پاییز نسبت به زمستان و بهار متمایز می‌کند از بین روندهای یکنواختی پهنه‌های روند است. در فصل تابستان در همه ماه‌ها مناطقی با روند افزایشی (شکل ۶) در هیچ ماهی کمتر از ۶۲ درصد نمی‌شود. بیشینه روند افزایشی در سپتامبر با ۷۶٫۶۲ درصد و بیشینه روند کاهششی در اگوست با ۳۷٫۶۶ درصد دیده می‌شود. بیشینه شدت روند افزایشی و کاهششی در ماه جولای با مقدار Z ۴/۳۹۸ و $-۲/۴۵$ دیده می‌شود. اگوست تنها ماهی از سال است که، به‌رغم روند افزایشی، مقدار معنی‌داری از نظر آماری ندارد (بیشینه روند افزایشی در این ماه ۱۹۴۴ است که از نظر آماری معنی‌دار نیست). مناطق با روند کاهششی در فصل تابستان در همه ماه‌ها معنی‌دار (در سطح ۹۵ درصد) است. پهنه‌هایی با روند کاهششی در دو ماه جولای و سپتامبر در استان کرمان (ایستگاه‌های منتخب کرمان و بم در شکل ۱) و بخش‌های کوچکی از جنوب و جنوب غرب و غرب استان اصفهان قرار دارد. اما در اگوست این نظم مکانی به هم خورده و مناطقی با روند کاهششی در جنوب استان کرمان و سمنان، شمال شرق استان اصفهان، و شمال استان یزد قرار دارد. با شروع فصل پاییز از پهنه‌هایی با روند افزایشی سرعت باد کاسته می‌شود و تنها نوامبر با ۵۵٫۸۴ درصد بیشینه پهنه‌هایی با روند افزایشی سرعت باد را داراست. بیشینه شدت روند افزایشی در فصل پاییز با نمره Z ۳٫۶۶ در ماه اکتبر و بیشینه شدت روند کاهششی با $-۲/۷۳$ در ماه دسامبر محاسبه شد. مناطقی با روند افزایشی معنی‌دار در فصل پاییز همانند سایر فصول در مناطق شمالی ایران مرکزی و در استان سمنان (شکل ۶) قرار دارند. در ماه نوامبر و دسامبر نیز در شمال و جنوب استان کرمان مناطقی با روند افزایشی معنی‌دار دیده می‌شود. همچنین، مناطقی با روند کاهششی بیشینه و معنی‌دار در ماه اکتبر در مناطق غربی و جنوبی دو استان اصفهان و یزد و استان کرمان (ایستگاه‌های منتخب شکل ۱) قرار دارند و در دو ماه نوامبر و دسامبر این مناطق در استان‌های یزد، اصفهان، و بخش‌های شمالی و غربی کرمان دیده می‌شود.



شکل ۶. روند تغییر سرعت باد در ایران مرکزی با استفاده از آزمون من-کندال براساس پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با هدف بررسی تغییرات سرعت باد در ایران مرکزی از پارامتر سرعت باد پایگاه ECMWF نسخه ERA-Interim با تفکیک مکانی 0.75×0.75 درجه قوسی استفاده شد؛ نتایج نشان داد پایگاه ECMWF با استفاده از آماره‌های R^2 ، MBE، و RMSE با استفاده از داده‌های هفت ایستگاه بهم، کرمان، یزد، اصفهان، کاشان، شاهرود، و سمنان طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۷ از دقت مناسبی برای ارزیابی سرعت باد برخوردار است. ایستگاه‌های شاهرود، یزد، و کرمان بیشترین ضریب تعیین (R^2) و کمترین خطا را نشان دادند. همچنین، یزد و کرمان انحراف کمتری را نسبت به ایستگاه‌های سینوپتیک نشان دادند. بنابراین، می‌توان اذعان کرد نتایج این پایگاه در سطح بالایی قابل اطمینان است.

کمینه سرعت باد در نوامبر و دسامبر و بیشینه سرعت باد در جولای و ژوئن محاسبه شد. متوسط سرعت باد براساس نتایج پایگاه ECMWF ۳/۱۹ متر بر ثانیه محاسبه شد. متوسط سرعت باد در منطقه مورد مطالعه ارتباط مستقیم با دمای هوا و فصل دارد. به‌طور کلی، در دوره سرد سال سرعت باد از جنوب به شمال و در دوره گرم سال از شمال به جنوب منطقه مورد مطالعه روند افزایشی دارد که به دلیل قرارگیری مناطق خشک همچون دشت کویر در شمال و دشت لوت در جنوب منطقه مورد مطالعه است. روند سرعت باد در ایران مرکزی نشان داد به‌ترتیب بیشترین شدت روند افزایشی و کاهش سرعت روند سرعت باد در ماه‌های مارس (نمره Z، ۴/۹۱) و دسامبر (نمره Z، -۲/۷۳) بوده است که در سطح آماری ۰/۰۱ معنی‌دار است. روند افزایشی سرعت باد در ۱۰ ماه از سال بیش از ۵۰ درصد ایران مرکزی را دربر گرفته است. در صورتی که در دو ماه اکتبر و فوریه روند کاهش در بیش از ۵۰ درصد منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. حمیدیان‌پور و همکاران (۱۳۹۵)

با تحلیل ماهیت و ساختار باد ۱۲۰ روزه سیستان به این نتیجه رسیدند که در دوره گرم سال مراکز فشار شرق و جنوب شرق ایران ویژگی‌های غالب گردش تریپوسفر زیرین محسوب می‌شوند و بخش عمده‌ای از آن‌ها دارای منشأ گرمایی‌اند و نتیجه متأثر از عوامل محلی و جغرافیایی منطقه است. بر این اساس، می‌توان عوامل محلی، به تبع آن، تفاوت‌های گرمایی بین مناطق پست و مرتفع را عامل بسیار مهمی در ایجاد اختلاف فشار شدید بین مناطق دانست که در نهایت باعث وزش باد یا افزایش شدت آن در منطقه می‌شود. بنابراین، عامل اساسی در تغییرات سرعت باد در منطقه مورد مطالعه را می‌توان به تغییرات انرژی تابشی رسیده به سطح زمین و افزایش دما و به تبع آن تغییرات در الگوهای فشار گرمایی منطقه نسبت داد.



منابع

- آب‌خرابات، ش.؛ کریمی، م.؛ فتح‌نیا، ا. و شام بیاتی، م.ح. (۱۳۹۶). بررسی نقش باد ۱۲۰ روزه سیستان در وزش دمایی شرق و جنوب شرق ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۹(۳): ۴۷۷-۴۸۹.
- حمیدیان‌پور، م.؛ مفیدی، ع. و سلیقه، م. (۱۳۹۵). تحلیل ماهیت و ساختار باد سیستان، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۰(۲): ۸۳-۱۰۹.
- رحیم‌زاده، ف.؛ پدرام، م.؛ صداقت‌کردار، ع. و کمالی، غ. (۱۳۸۸). برآورد انرژی باد در ایستگاه‌های همدیدی استان اصفهان، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۳۵(۳): ۱۵۵-۱۷۲.
- رضایی بنفشه، م.؛ خدیجه، ج. و زینالی، ب. (۱۳۹۰). بررسی روند تغییرات سرعت باد در شمال غرب ایران، جغرافیای طبیعی، ۴(۱۳): ۲۷-۳۶.
- رضیعی، ط. و ستوده، ف. (۱۳۹۶). بررسی دقت مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی (ECMWF) در پیش‌بینی بارش مناطق گوناگون اقلیمی ایران، فیزیک زمین و فضا، ۴۳(۱): ۱۳۳-۱۴۷.
- علیزاده چوبری، ا. و نجفی، م. س. (۱۳۹۶). روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران، فیزیک زمین و فضا، ۴۳(۳): ۵۶۹-۵۸۴.
- قاسمی، ا. و سیدی، ف. (۱۳۹۴). شبیه‌سازی تغییرات و پیش‌بینی سرعت باد در ایران با استفاده از داده‌های آماری پنجاه‌ساله (۱۹۶۱-۲۰۱۰)، فصل‌نامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۴(۹۴): ۹۵-۱۰۵.
- قهرمان، ن. و قره‌خانی، ا. (۱۳۸۹). بررسی روند تغییرات زمانی سرعت باد در گستره اقلیمی ایران، مجله آبیاری و زهکشی، ایران، ۱(۴): ۳۱-۴۳.
- مفیدی، ع.؛ حمیدیان‌پور، م.؛ سلیقه، م. و علیجانی، ب. (۱۳۹۲). تعیین زمان آغاز، خاتمه، و طول مدت وزش باد سیستان با بهره‌گیری از روش‌های تخمین نقطه تغییر، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲(۸): ۶۵-۸۶.
- میرعباسی نجف‌آبادی، ر. و دین‌پژوه، ی. (۱۳۹۴). بررسی روند تغییرات سرعت باد در ایستگاه‌های منتخب ایران، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۹(۵۲): ۲۷۷-۳۰۱.
- Abkharabat, S.; Karimi, M.; Fathnia, A. and Shambaiati, M. (2017). The Role of Sistan 120 Days Wind in Thermal Advection of East and Southeast Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(3): 477-489. (In Persian).
- Alizadeh-Choobari, O. and Najafi, M. (2017). Trends and changes in air temperature and precipitation over different regions of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(3): 569-584. (In Persian).
- Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records, *Journal of hydrology*, 58(1-2): 11-27.
- Cannon, D. J.; Brayshaw, D. J.; Methven, J.; Coker, P. J. and Lenaghan, D. (2015). Using reanalysis data to quantify extreme wind power generation statistics: A 33 year case study in Great Britain. *Renewable Energy*, 75: 767-778.
- Dee, D. P.; Uppala, S. M.; Simmons, A. J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S. ... and Bechtold, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656): 553-597.
- Fant, C.; Gunturu, B. and Schlosser, A. (2016). Characterizing wind power resource reliability in southern Africa. *Applied energy*, 161: 565-573.

- Hamidian Pour, M.; Mofidi, A. and Salighe, M. (2016). Analysis of the nature and structure of Sistan wind. *Iranian Journal of Geophysics*, 10(2): 83-109. (In Persian).
- Hande, L. B.; Siems, S. T. and Manton, M. J. (2012). Observed trends in wind speed over the Southern Ocean. *Geophysical Research Letters*, 39(11).
- Hero, n. And Qarakhani, A. (2010). Investigating the trend of temporal changes in wind speed in the climatic range of Iran, *Journal of Irrigation and Drainage, Iran*, 1 (4): 31-43. (In Persian).
- Kendall, M. (1975). *Multivariate analysis*, Charles Griffin.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrical: Journal of the Econometric Society*, 245-259.
- Marcos, R.; González-Reviriego, N.; Torralba, V.; Soret, A. and Doblas-Reyes, F. J. (2019). Characterization of the near surface wind speed distribution at global scale: ERA-Interim reanalysis and ECMWF seasonal forecasting system 4. *Climate Dynamics*, 52(5-6): 3307-3319.
- Meurers, B. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656): 553-597.
- Mir Abbasi Najafabadi, R. and theologian, Y. (2015). Investigating the trend of wind speed changes in selected stations of Iran, *Journal of Geography and Planning*, 19(52): 277-301. (In Persian).
- Polinder, H.; Ferreira, J. A.; Jensen, B. B.; Abrahamsen, A. B.; Atallah, K. and McMahon, R. A. (2013). Trends in wind turbine generator systems. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, 1(3): 174-185.
- Pryor, S. C.; Barthelmie, R. J.; Young, D. T.; Takle, E. S.; Arritt, R. W.; Flory, D. ...and Roads, J. (2009). Wind speed trends over the contiguous United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D14).
- Qasemi, A. and Sidi, F. (2019). Simulation of changes and wind speed forecasting in Iran using fifty-year statistical data (1961-2010), *Sepehr Geographical Information Quarterly*, 24(94): 95-105. (In Persian).
- Rahimzadeh, F.; Pedram, M.; Sedaghatkar, P. and Kamali, Gh. (2009). Estimation of wind energy in synoptic stations of Isfahan province, *Journal of Geography and Environmental Planning*, 35 (3): 155-172. (In Persian).
- Raziei, T. and Sotoudeh, F. (2017). Investigation of the accuracy of the European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) in forecasting observed precipitation in different climates of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(1): 133-147. (In Persian).
- Rezaei Banafsheh, M.; Khadijeh, J. and Zeinali, B. (2011). Investigation of the trend of wind speed changes in northwestern Iran, *Natural Geography*, 4(13): 27-36. (In Persian).
- Rose, S. and Apt, J. (2015). What can reanalysis data tell us about wind power?. *Renewable Energy*, 83: 963-969.
- Saeidabadi, R.; Najafi, M. S.; Roshan, G.; Fitchett, J. M. and Abkharabat, S. (2016). Modelling spatial, altitudinal and temporal variability of annual precipitation in mountainous regions: The case of the Middle Zagros, Iran. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 52(5): 437-449.
- Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Averyt, K.; Marquis, M. and Tignor, M. M. (Eds.). (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4)*. Cambridge university press.
- Torralba, V.; Doblas-Reyes, F. J. and Gonzalez-Reviriego, N. (2017). Uncertainty in recent near-surface wind speed trends: a global reanalysis intercomparison. *Environmental Research Letters*, 12(11): 114019.

- Useful, A.; Hamidianpour, M.; Saligeh, M. and Alijani, B. (2013). Determining the time of beginning, end, and duration of Sistan wind using the methods of estimating the point of change, *Geography and environmental hazards*, 2(8): 65-86. (In Persian).
- Vautard, R.; Cattiaux, J.; Yiou, P.; Thépaut, J. N. and Ciais, P. (2010). Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nature geoscience*, 3(11): 756.
- Vitart, F. (2004). Monthly forecasting at ECMWF. *Monthly Weather Review*, 132(12): 2761-2779.
- Williams, P. D.; Alexander, M. J.; Barnes, E. A.; Butler, A. H.; Davies, H. C.; Garfinkel, C. I. ... and Maue, R. N. (2017). A census of atmospheric variability from seconds to decades. *Geophysical Research Letters*, 44(21): 11-201.

