

برآورد انرژی باد در دشت اردبیل براساس برونداد مدل‌های اقلیمی و سناریوی RCP در دهه‌های آینده

برومند صلاحی^{*}، محمود بهروزی^۲

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- گروه علوم محیطی، پژوهشکده انگور و کشمش، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۳/۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

چکیده

در این پژوهش پس از شبیه‌سازی داده‌های وقوع باد با برونادهای گردش جوی و سناریوی RCP_{4.5}، ویژگی‌های انرژی حاصل از باد در ایستگاه اردبیل با احتمالات آماری و توزیع ویبول برای سال‌های آینده برآورد شد. بدین منظور، داده‌های سمت و سرعت باد در دو دهه آینده (۲۰۲۱-۲۰۳۰ و ۲۰۳۱-۲۰۴۰ میلادی) شبیه‌سازی و گلبادهای سالانه به همراه میانگین سرعت باد برای دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل ترسیم و بررسی شد. سپس برای پیش‌بینی احتمالات وقوع باد از تابع ویبول استفاده شد و صحت این توزیع با آزمون خی دو محاسبه شد. با برآورد پارامترهای K و C از تابع ویبول، چگالی انرژی باد، سرعت نامی، محتمل‌ترین سرعت باد و سرعت راه‌انداز و توقف توربین‌های بادی برای ارتفاعات ۱۰ تا ۵۰ متری از سطح زمین برآورد گردید. نتایج این پژوهش نشان داد در دوره پایه و آینده دامنه میانگین سرعت باد بین ۳ تا ۵ متر در ثانیه است که در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۲)، میانگین آن ۳/۷۵ و در دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، میانگین آن ۴/۳۴ متر در ثانیه خواهد بود. چگالی توان باد طی دهه‌های آینده در ارتفاع ۱۰ متری حدود ۴۵۰ تا ۵۰۰ و در ارتفاع ۵۰ متری حدود ۱۰۰۰ وات در هر متر مربع محاسبه شد. همچنین سرعت نامی باد در ارتفاع ۱۰ متری و ۵۰ متری حدود ۱۱ و ۱۴ و محتمل‌ترین آن نیز ۶ و ۸ متر خواهد بود. حدود ۸۰ درصد ساعات موجودیت باد نیز بین سرعت راه‌انداز و توقف توربین بادی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: گرمایش جهانی، انرژی باد، توزیع ویبول، چگالی باد، دشت اردبیل.

مقدمه

درجه سلسیوس افزایش یافته است در اواخر قرن بیست و یکم به $1/4$ تا $5/8$ درجه سلسیوس برسد (IPCC, 2007). بالا آمدن سطح آب اقیانوس‌ها، تخریب مراتع و محیط‌زیست، بیابان‌زایی، افزایش پدیده‌های حدی مانند طوفان‌های تندری و گرد و غبار، امواج گرما، رگبار و طغیان رودخانه‌ها از عمده عوارض این پدیده است (IPCC, 2014)؛ از اینرو استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر که باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی می‌شوند، امری ضروری است. انرژی خورشیدی، زیستی و انرژی بادی که مطالعات گسترده‌ای نیز در آن زمینه‌ها انجام شده است (Hennings et al, 2013)، از روش‌های مناسب برای تولید انرژی پاک محسوب می‌شوند. انرژی باد یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک است که در اغلب کشور دنیا تولید شده و در تولید حدود ۴ درصد برق دنیا مشارکت دارد. استفاده از انرژی باد به دلیل کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی، اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت بر کاهش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی دارد (WWEA, 2014). چین و آمریکا با بیش از ۴۰ هزار مگاوات و آلمان و اسپانیا با بیش از ۲۰ هزار مگاوات تولید الکتریسیته در زمره‌ی بیشترین تولیدکنندگان برق از طریق توربین‌های بادی هستند (Mostafaeipour et al, 2011) و این در حالیست که در ایران، علی‌رغم اینکه ظرفیت تولید برق بادی حدود ۶۵۰۰ مگاوات است (Mostafaeipour et al, 2014) مقدار بسیار کمی برق از طریق توربین‌های بادی تولید می‌شود (Mirhosseini et al, 2011). پتانسیل تولید انرژی حاصل از باد در منطقه شمال‌غربی ایران بررسی شده است که نتایج آن‌ها بیانگر اقتصادی بودن نصب توربین‌های بادی و سرمایه‌گذاری در این

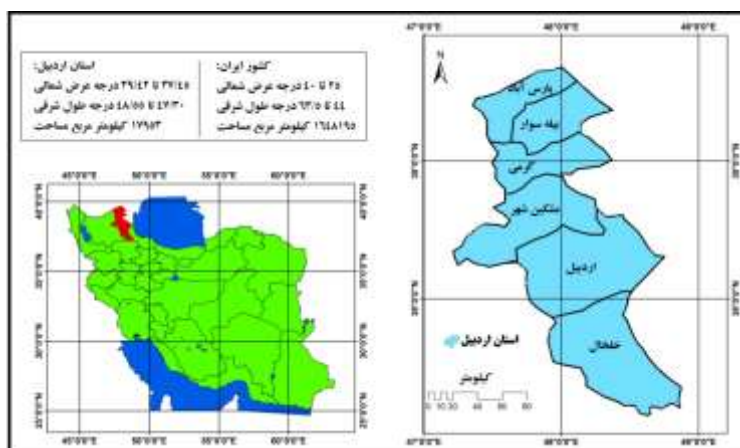
تغییر اقلیم منحصر به عصر حاضر نیست و براساس شواهد موجود، کره زمین در دوران مختلف زمین‌شناسی همواره با تغییرات اقلیمی مواجه بوده است. آنچه که تغییرات اقلیمی قرن حاضر را متمایز از گذشته نموده است، ماهیت و سرعت این تغییرات است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که علاوه بر نوسانات اقلیمی، متوسط عناصر آب و هوایی نیز تغییر کرده است (اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۳۹۲). نوسانات اقلیمی عمدتاً ناشی از کشش‌های جزر و مدی، تغییر در کمیت و کیفیت انرژی خورشیدی، ال‌نینو، فعالیت لکه‌های خورشیدی و چرخش زمین خود است؛ درحالی‌که فعالیت‌های انسانی در توسعه و صنایع، دلیل اصلی تغییر اقلیم بوده است. سوزاندن سوخت‌های فسیلی، تخریب جنگل‌ها و ایجاد مزارع و تولید مواد شیمیایی زمینه افزایش گازهای گلخانه‌ای را فراهم آورده است. گازهای گلخانه‌ای باعث ازدیاد دمای کره زمین و گرمایش جهانی و تسریع در تغییر اقلیم شده‌اند (عساکره، ۱۳۸۶). گازهای دی‌اکسیدکربن (CO_2)، متان (CH_4)، کلروفلوروکربن‌ها (CFC_s)، ازن (O_3) و اکسیدهای ازت (NO_x) از گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌روند که نقش مهمی در گرمایش جهانی و تغییر اقلیم دارند. مهم‌ترین این گازها دی‌اکسیدکربن است که در نتیجه سوزاندن سوخت‌های فسیلی و جنگل‌زدایی ایجاد می‌شود. عمده‌ی مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای انتشار (RCP_s) متفق‌القولند که دما در سطح جهان، تا پایان قرن ۲۱، نسبت به دوره ۱۹۰۰-۱۸۵۰، بیش از $1/5$ درجه سلسیوس و با دید بدبینانه‌تر به بیش از دو درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت (IPCC, 2014). انتظار می‌رود میانگین دما طی قرن بیستم که حدود $0/5$

ریزمقیاس نمایی آماری SDSM در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی حاصل از مدل‌های GCMs کاربرد فراوانی دارد و از آن برای پیش‌بینی بارش و دما استفاده گسترده‌ای شده است (دشت بزرگی و همکاران، ۱۳۹۴؛ González et al, 2012; Chen et al, 2012; al, 2018; Chaudhary et al, 2018). اما در این پژوهش با توجه به گرمایش جهانی و اثرات آن بر پتانسیل انرژی باد در نقاط مختلف جهان، سعی بر این است با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل CGCM1 تحت سناریو RCP4.5 و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM داده‌های رژیم باد و میانگین سرعت باد سالانه در ایستگاه اردبیل برای سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ شبیه‌سازی شده و پتانسیل انرژی حاصل از توربین‌های بادی برای سال‌های آینده بررسی شود.

منطقه مورد مطالعه

استان اردبیل در شمال غربی فلات ایران قرار دارد و یک درصد از مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد (طاووسی و دل‌آرا، ۱۳۸۹). شهرستان اردبیل با موقعیت جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی با ارتفاع ۱۳۳۲ متر از سطح دریا در استان اردبیل قرار دارد (شکل ۱). میانگین درجه حرارت سالانه این شهرستان ۹ درجه سلسیوس، بارش سالانه ۳۰۳/۴ میلی‌متر، میانگین حداقل دمای سالانه ۳ و حداکثر ۱۵/۱ درجه سلسیوس است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن و دمارتن، دشت اردبیل دارای اقلیم نیمه‌خشک است (طاووسی و دل‌آرا، ۱۳۸۹) (شکل ۱).

زمینه است که می‌تواند در تأمین برق منطقه مناسب باشد (صلاحی، ۱۳۸۳؛ رضایی بنگشه و همکاران، ۱۳۹۳؛ جعفری و همکاران، ۱۳۹۲؛ جهانبخش و همکاران، ۱۳۹۴؛ زاهدی و همکاران، ۱۳۸۴). به هر حال، گرمایش جهانی و تغییر اقلیم ممکن است بر الگوهای باد تأثیر بگذارد که کاهش سرعت باد و یا افزایش بادهای گاستی می‌تواند بر تداوم عرضه انرژی اثر منفی بگذارد؛ یا اینکه افزایش میانگین سرعت باد باعث افزایش تولید الکتریسیته از طریق توربین‌های بادی شود (Sailor et al, 2008). اثرات گازهای گلخانه‌ای بر گرمایش جهانی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی (GCMs) قابل شبیه‌سازی است. شبیه‌سازی اقلیم بلندمدت در آینده با مدل‌های جفت شده اقیانوسی- اتمسفری گردش عمومی جو با قابلیت آشکارسازی ۵۰ کیلومتر سطح افقی انجام می‌شود (Christensen et al, 2007). تغییرات سرعت باد تحت تأثیر تغییر اقلیم در نقاط مختلف، متفاوت خواهد بود؛ به طوری که در ایرلند میانگین سرعت باد در زمستان افزایش و در تابستان کاهش خواهد یافت (Nolan et al, 2012). در انگلستان سرعت باد در زمستان افزایش خواهد یافت که می‌تواند انرژی حاصل از توربین‌های بادی را نیز افزایش خواهد داد (Harrison et al, 2008). در اروپای شمالی نیز در زمستان پتانسیل انرژی بادی به دلیل افزایش میانگین سرعت باد، بالا خواهد رفت (Pryor and Barthelmie, 2008)؛ اما در ایالات متحده به دلیل کاهش میانگین سرعت باد، پتانسیل انرژی باد در ۱۰۰ سال آینده کاهش خواهد یافت (Breslow and Sailor, 2002). مدل



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی استان و شهرستان اردبیل

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور ارزیابی انرژی باد در سال‌های آینده ایستگاه اردبیل (به عنوان نماینده دشت اردبیل)، با استفاده از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو GCM و سناریوهای انتشار RCP رژیم باد سال‌های آینده در ایستگاه اردبیل آشکارسازی شده و با استفاده از مدل ریزمقیاس-نمایی آماری SDSM داده‌های باد برای منطقه مورد نظر ریزمقیاس شد.

الف) تولید سناریوهای اقلیمی برای دوره‌های آینده: در مدل‌های اجرا شده برای پنجمین گزارش ارزیابی IPCC (AR5²), سناریوهای RCP جایگزین سناریوهای SRES شدند (Vuuren et al, 2011). سناریوهای RCP نشان‌دهنده محرکه‌های تابشی هستند و در میان آن‌ها سناریوی RCP_{2.5} سناریوهای انتشار و محرکه‌های تابشی کم (تقریباً با سناریوهای B₁ و B₂ مطابقت دارند) و سناریوی RCP_{8.5} محرکه‌های تابشی و سناریوهای انتشار زیاد (تقریباً با سناریوهای A₁ و A₂) را نشان می‌دهند. همچنین سناریوهای RCP_{4.5-6} حالت متوسط دارند (Marengo et al, 2014). یکی از معیارهایی که در تهیه سناریوهای RCP مورد توجه است، توانایی آن‌ها در شبیه-

سازی کاربری اراضی از قبیل زمین‌های زراعی، مرتعی و پوشش گیاهی بوده که براساس آن‌ها، در RCP_{2.6} تا سال ۲۱۰۰ زمین‌های زراعی افزایش (همراه با مدیریت بهینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای) و در RCP_{4.5} کاهش خواهند یافت (همراه با حداقل مدیریت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای) و RCP_{6.0} مطابق با سناریوی وضعیت موجود خواهد بود. به همین دلیل، یکی از مهم-ترین ویژگی این سناریوها، توانایی ارزیابی اثرات تغییر اقلیم می‌باشد (Vuuren et al, 2011). سناریوی RCP_{4.5} توسط گروه مدل‌سازی MiniCAM و موسسه (Joint Global Change Research Institute) JGCRI در شمال غرب اقیانوس آرام طراحی شده است و در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات در مترمربع ثابت می‌ماند (مهرآذر و همکاران، ۱۳۹۷). در این پژوهش برای پیش‌بینی پارامترهای سمت و سرعت باد در ایستگاه اردبیل سناریوی RCP_{4.5} استفاده شد. خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو برای برآورد مدل‌های منطقه‌ای بزرگ‌مقیاس به کار می‌روند. دقت مکانی افقی مدل‌ها در سطح خشکی ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلومتر و قدرت تفکیک

۱۳۸۹) و با بهره‌گیری از پارامترهای به دست آمده از این رابطه و با به کارگیری متغیرهای بزرگ‌مقیاس حاصل از مدل‌های HadCM₃، CGCM₁ و سناریوهای مختلف در دوره آتی، سری زمانی سمت و سرعت باد منطقه تولید می‌شود. پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش سمت و سرعت باد روزانه است. همچنین از داده‌های NCEP (جدول ۱) و داده‌های مدل HadCM₃، CGCM₁ تحت سناریوی RCP_{4.5} استفاده شد. متغیرهای NCEP شامل ۲۶ متغیر جوی است که متغیرهای مستقل از بین آن‌ها انتخاب می‌شوند. متغیرهای پیش‌بینی کننده دارای روابطی مختلف با متغیرهای پیش‌بینی شونده هستند و آندسته از متغیرها مهم هستند که بیش‌ترین ضریب همبستگی و پایین‌ترین واریانس خطا را در این پژوهش برای انتخاب متغیرهای مستقل غالب از مدل SDSM استفاده شد. داده‌های بزرگ مقیاس از داده‌های شبیه‌سازی توسط مدل CGCM₁ برای دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ استخراج شدند. سپس با معرفی این داده‌ها به مدل SDSM، داده‌های باد تحت سناریو RCP_{4.5} برای منطقه مورد مطالعه کوچک مقیاس گردید. ابتدا به کمک پیش‌بینی کننده‌های منتخب متغیرهای مورد بررسی برای دوره پایه شبیه‌سازی شدند. سپس این متغیرها تحت سناریوی RCP_{4.5} برای دوره‌های آینده پیش‌بینی شد.

صحت‌سنجی مدل

به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی سناریوهای مدل و روش استفاده شده، از معیارهای میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد میانگین خطای مطلق (MAPE) و ضریب ناش-

عمودی آن‌ها برابر ۳۰۰ تا ۴۰۰ است؛ اما در مطالعه منطقه‌ای نیاز به داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر نیاز است. روش‌های مختلفی برای ایجاد سناریوهای منطقه‌ای ارائه شده که به این روش ریزمقیاس نمایی گفته می‌شود (Giorgi and Mearns, 1999). در این پژوهش برای ریزمقیاس کردن مکانی داده‌های باد از مدل SDSM که یکی از روش‌های ریزمقیاس نمای آماری به شمار می‌رود، استفاده شده است. مدل SDSM، متغیرهای پیش‌بینی شونده NCEP و GCM را کالیبره و آنالیز می‌کند. ریزگردان SDSM یک روش نمونه-برداری مجدد شرطی و دومرحله‌ای است (Wilby et al, 2002). این روش ابتدا متغیر پیش‌بینی کننده را با استفاده از روش‌های رگرسیونی ترکیبی و یک روش مولد هواشناسی تصادفی کوچک‌مقیاس کرده و در مرحله بعد فراسنج اقلیمی در محل ایستگاه مجدداً تولید می‌گردد. درواقع SDSM ترکیبی از روش مولد هواشناسی آماری و توابع تغییر شکل یافته است. نرم‌افزار SDSM کوچک مقیاس کردن آماری متغیرهای اقلیمی روزانه را تحت مراحل زیر انجام می‌دهد:

- ۱- کنترل کیفیت داده‌ها و تغییر شکل داده‌ها؛ ۲- انتخاب بهترین متغیر پیش‌بینی کننده؛ ۳- کالیبره کردن مدل؛ ۴- تولید مدل هواشناسی (با استفاده از پیش‌بینی کننده مشاهده‌ای)؛ ۵- آنالیز آماری؛ ۶- خروجی گرافیکی مدل؛ ۷- تولید سناریوی اقلیمی (با استفاده از پیش‌بینی کننده‌های اقلیمی مدل)؛ تمام مراحل بالا توسط گزینه‌های تعبیه شده در محیط نرم‌افزار SDSM انجام می‌گیرد (طائی سمیرمی و همکاران، ۱۳۹۳). در نرم‌افزار SDSM، با انتخاب پیش‌بینی کننده‌ها، بین سری مشاهداتی روزانه منطقه و متغیرهای بزرگ‌مقیاس مشاهداتی منطقه (NCEP) ضریب همبستگی حداکثری برقرار می‌شود (گل محمدی و همکاران،

این مطالعه در صدد ارزیابی انرژی باد دشت اردبیل در آینده می‌باشد لذا در این پژوهش سعی شد وضعیت انرژی باد آینده‌ی اردبیل از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ مورد مطالعه قرار گیرد. در ادامه برای تجزیه و تحلیل داده‌های بادسنجی از نرم‌افزار Wind rose Plot که برای انجام محاسبه‌های آماری باد و رسم گلباد طراحی شده، استفاده شد و گلباد سالانه برای دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۲) و آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) ترسیم شد.

ب) تابع ویبول: برای تعیین پتانسیل انرژی باد در توربین‌های بادی جهت تولید برق و تخمین انرژی خروجی از آن در اقلیم آینده ایستگاه اردبیل، از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول که انطباق خوبی با داده‌های سرعت باد به‌خصوص در محدوده سرعت توربین‌های بادی نشان می‌دهد (Chang, 2011) استفاده شد و استحصال انرژی بادی برای هر دهه به‌طور جداگانه محاسبه و بررسی شد. توابع توزیع چگالی احتمال که در انرژی باد تأیید شده و کاربرد زیادی دارند، توابع توزیع احتمال ویبول و رایله^۲ می‌باشند (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۴). تابع ویبول حالت خاصی از توزیع گاماست^۳. این تابع نسبت به توابع دیگر نظیر رایله از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار بوده و به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

رابطه ۶)

$$P(V) = [K/C] [V/C]^{K-1} \exp[-(V/C)^K]$$

در این رابطه، (K) یک پارامتر بدون بعد مربوط به «فاکتور شکل^۴» است و (C) پارامتری به‌عنوان «فاکتور مقیاس^۵» است که به واحد متر در ثانیه محاسبه می‌شود. روش‌های مختلفی جهت محاسبه پارامترهای مقیاس و شکل تابع ویبول وجود دارد که یکی از این روش‌ها روش برازش حداقل مربعات^۶ است که به کمک تابع احتمال تجمعی به دست می‌آید (صلاحی، ۱۳۸۳). لازم

ساتنکلیف^۱ (NS) استفاده شد. این معیارها را می‌توان به صورت روابط ۱ تا ۵ نشان داد.

رابطه ۱)

$$MAE = \sum_{i=1}^n |p_i - o_i| / n$$

رابطه ۲)

$$MSE = \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 / n$$

رابطه ۳)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 / n}$$

رابطه ۴)

$$MAPE = \sum_{i=1}^n |p_i - o_i| / o_i / n \times 100$$

رابطه ۵)

$$NS = 1 - (\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 / \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{o}_i)^2)$$

در روابط فوق، p_i و o_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده و مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{o}_i میانگین مقادیر مشاهده شده و n تعداد داده‌ها می‌باشد. معیارهای مذکور که هر دو ویژگی انحراف (اریبی) و دقت برآورد را در دارند، برای مقایسه دقت عامل‌های مختلف استفاده می‌شوند (رضائی و همکاران، ۱۳۹۳). پس از تولید و شبیه‌سازی سرعت باد آینده در ایستگاه اردبیل، شرایط برای ارزیابی انرژی حاصل از آن در این منطقه میسر شد. بدین‌صورت که داده‌های باد آینده به دو دهه شامل: دهه اول (۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰) و دهه دوم (۲۰۳۱ تا ۲۰۴۰) تقسیم شد و پتانسیل انرژی باد در هر دهه بررسی شد. تقسیم دوره آینده به دو دهه به این دلیل بود که بتوان نشان داد که در طول ۱۰ سال اول آینده و ۱۰ سال دوم آینده، سرعت باد و انرژی حاصل از آن چه تغییراتی خواهد کرد. همچنین وضعیت داده‌های بادسنجی و انرژی باد ایستگاه اردبیل در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۲) نیز در این پژوهش بررسی شد. از آنجائی- که وضعیت انرژی باد اردبیل تا سال‌های حاضر به- وسیله پژوهشگرانی نظیر (صلاحی، ۱۳۸۳؛ زاهدی و همکاران، ۱۳۸۴؛ رضایی‌بنفشه و همکاران، ۱۳۹۳) بررسی شده است و نیز با عنایت به اینکه

است که با استفاده از معادله رگرسیون رابطه ۷،
رابطه خطی مقادیر سرعت باد و احتمال وقوع آن
مشخص شود:

رابطه ۷)

$$Y = ax + b$$

در این معادله، a به عنوان ضریب زاویه خط و b
عرض تقاطع با محور Y است. رابطه خطی بین X_i
و Y_i برای تعیین مقادیر a و b به صورت رابطه ۸
محاسبه می‌شود:

رابطه ۸)

$$Y = \text{Ln} \{-\text{Ln} [1 - P(v)]\} \quad X = \text{Ln}(v_i)$$

در رابطه ۳، V_i میانه طبقات سرعت باد و $P(v)$
درصد فراوانی تجمعی سرعت‌های باد هر طبقه
است. با مشخص شدن مقادیر X و Y ، مقادیر a و
 b از رابطه رگرسیون قابل محاسبه هستند
(صلاحی، ۱۳۸۳). با مشخص شدن a و b ، مقادیر
 K و C از رابطه ۹ قابل محاسبه هستند:

رابطه ۹)

$$C = \text{Exp}(-B/A) \quad K = A$$

پس از محاسبه مقادیر X_i و Y_i ، می‌توان خط
 $Y = ax + b$ را که در واقع خطی است با نزدیک‌ترین
فاصله نسبت به نقاط X_i و Y_i به منظور تعیین
مقادیر a و b ترسیم کرد. پس از محاسبه
پارامترهای a و b ، پارامترهای (K) و (C) قابل
محاسبه می‌باشند. پس از کسب این فراسنج‌ها،
مقادیر تابع احتمال ویبول محاسبه شد. مقادیر
محاسبه شده برای وقوع سرعت‌های باد آینده
ایستگاه اردبیل از طریق تابع پیوسته ویبول و
احتمال مشاهده شده (واقعی) رخداد سرعت‌های
باد به منظور نیکوئی برازش مجموعه داده‌ها به
توزیع داده شده، با آزمون «کی دو» سنجیده شد.
صحت این جایگزینی با آماره آزمون در آزمون
«کی دو» به صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود
(عبدالله زاده و عبدالله زاده، ۱۳۷۹):

رابطه ۱۰)

$$X^2 = \sum (O_i - E_i)^2 / E_i$$

که در آن، O_i فراوانی مشاهده شده و E_i فراوانی
مورد انتظار است. پس از محاسبه مقادیر
فراسنج‌های شکل و مقیاس تابع ویبول، وضعیت
آینده ایستگاه اردبیل از نظر پتانسیل انرژی باد
ارزیابی شد. یکی از مهم‌ترین محاسبات که در
رابطه با ارزیابی پتانسیل انرژی باد باید صورت
گیرد، محاسبه چگالی انرژی باد است. میانگین
چگالی انرژی باد در یک مکان براساس تابع
چگالی احتمال را می‌توان از طریق رابطه ۱۱ به
دست آورد (امیدوار و دهقان، ۱۳۹۱).

رابطه ۱۱)

$$P_n / S = \frac{1}{2} \rho C^3 \Gamma(1 + 3/K)$$

که در آن، Γ تابع معروف گاما، C و K پارامترهای
تابع ویبول و ρ چگالی هواست. مقدار چگالی هوا
در شرایط متعارف دما و فشار، برابر ۱/۲۲۵
کیلوگرم در مترمکعب است. یکی از روش‌های
محاسبه چگالی هوا به صورت رابطه ۱۲ قابل
محاسبه است (جهانگیری و همکاران، ۱۳۸۴).

رابطه ۱۲)

$$\rho = 1/225 - (1.194 \times 10^{-4}) \times Z$$

که در آن، Z ارتفاع ایستگاه در سطح تراز دریا
برحسب متر است. ارتفاع محور اغلب توربین‌های
بادی حدود ۳۰ تا ۸۰ متر از سطح زمین است و
با افزایش ارتفاع و کاهش اثر زبری سطحی،
سرعت باد و قدرت باد افزوده می‌شود (جهانگیری
و همکاران، ۱۳۸۴). برای برآورد سرعت باد از
مدل توان یک‌هفتم نیرو استفاده شد که از رابطه
۱۳ به دست می‌آید:

رابطه ۱۳)

$$C_2 / C_1 = (Z_2 / Z_1)^{1/7}$$

در این رابطه، C_1 و C_2 فراسنج‌های مقیاس تابع
ویبول، به ترتیب در ارتفاع‌های Z_1 و Z_2 هستند.
حتی اگر فراسنج شکل (K) تابع ویبول با ارتفاع

رابطه ۱۷)

$$P(V > V^*) = \text{EXP}[-(V_1 / C)^K] - \text{EXP}[-(V_2 / C)^K]$$

به دلیل اینکه قدرت باد متناسب با توان سوم سرعت آن است، لذا سرعت باد جزو مهم‌ترین عوامل در طراحی توربین بادی است (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۴). جهت نیل به این مقصود، ترسیم منحنی سرعت-تداوم باد ضروری است. این منحنی نشان‌دهنده محدوده سرعت باد در محور است. در نهایت پس از ارزیابی انرژی حاصل از باد در دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل، مقایسه‌ای بین دهه‌ها نیز انجام شد و اختلاف آن‌ها بررسی شد.

نتایج

نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی آماری با استفاده از نرم‌افزار SDSM نشان داد با توجه به میزان همبستگی متغیر سرعت باد با داده‌های NCEP متغیرهای پیش‌بینی کننده از بین ۲۶ متغیر انتخاب شدند که متغیر سرعت باد با داده‌های فشار سطح متوسط دریا (Pmsl)، سرعت نصف-النهاری سطحی (Mvu)، جهت باد در تراز فشاری ۵۰۰ هکتوپاسکال (Wd5)، سرعت نصف‌النهاری در تراز فشاری ۵۰۰ هکتوپاسکال (Mv5)، سرعت نصف‌النهاری در تراز فشاری ۸۵۰ هکتوپاسکال (Mv8)، سرعت مداری در تراز فشاری ۵۰۰ هکتوپاسکال (P5u)، سرعت مداری در تراز فشاری ۸۵۰ هکتوپاسکال (P8u) و سرعت مداری سطحی (Pu) بیشترین همبستگی را داشت. همچنین نتایج غربالگری متغیر سرعت باد با توجه به سطح اعتماد ۱۰ درصد و مقادیر P-value که در جدول ۲ ذکر شده است، انتخاب گردید (جدول ۱).

تغییر کند، این تغییر جزئی بوده و در تجزیه و تحلیل پتانسیل انرژی باد، فرانسج K مستقل از ارتفاع پنداشته می‌شود (امیدوار و دهقان، ۱۳۹۱). محتمل‌ترین سرعت باد، یا سرعت بیش‌ترین احتمال وقوع باد که با علامت V_{MP} نشان داده می‌شود، از رابطه ۱۴ قابل محاسبه است.

رابطه ۱۴)

$$V_{MP} = C [K-1 / K]^{1/K}$$

سرعت نامی باد، یا سرعت بادی که حداکثر انرژی الکتریکی را در خروجی ایجاد می‌کند، در واقع سرعتی است که بیش‌ترین انرژی را تولید می‌کند. این سرعت که با علامت V_{mec} نشان داده می‌شود، یکی از فرانسج‌های مهم در طراحی توربین‌های بادی است که از رابطه ۱۵ به دست می‌آید (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۴).

رابطه ۱۵)

$$V_{MAXE} = C [1+2 / k]^{1/K}$$

جهت تصمیم‌گیری در طراحی و نصب توربین‌های بادی، توجه به این که توربین‌های بادی در یک سرعت مشخص راه‌اندازی شده و شروع به بازدهی نیرو می‌کند و در یک سرعت خاص توربین برای جلوگیری از آسیب، پره‌های خود را موازی با باد قرار داده و از حرکت باز می‌ایستند مهم است. از این‌رو، احتمال وقوع سرعت‌های باد بالاتر از V^* را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۶ تعیین نمود.

رابطه ۱۶)

$$P(V > V^*) = \text{EXP}[-(V^* / C)^K]$$

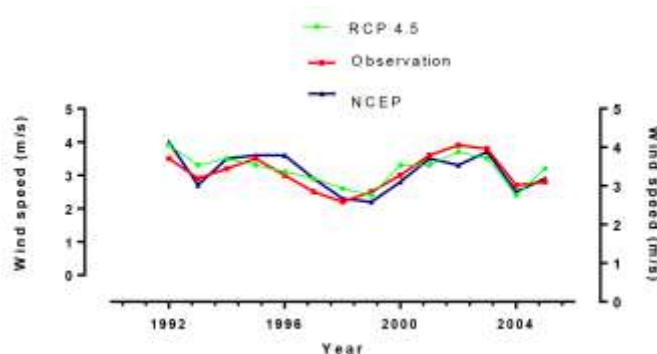
با توجه به اینکه سرعت راه‌انداز و سرعت توقف اکثر توربین‌های بادی به ترتیب ۴ و ۲۵ متر در ثانیه است، لذا احتمال وقوع سرعت‌های باد بین مقادیر مذکور را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۲ و به صورت رابطه ۱۷ به دست آورد. لذا چنانچه ۴ برابر با V_1 و ۲۵ برابر با V_2 در نظر گرفته شود، آنگاه:

جدول ۱: نتایج غربالگری متغیر سرعت باد با متغیرهای پیش‌بینی کننده NCEP (ایستگاه اردبیل)

ردیف	متغیر	پیش‌بینی کننده	P-value
۱	سرعت باد	فشار سطح متوسط دریا	۰/۰۳۱
۲	سرعت باد	سرعت نصف‌النهاری سطحی	۰/۰۲۲
۳	سرعت باد	جهت باد در تراز فشاری ۵۰۰ هکتوپاسکال	۰/۰۰۳
۴	سرعت باد	سرعت نصف‌النهاری در تراز فشاری ۵۰۰ هکتوپاسکال	۰/۰۰۷
۵	سرعت باد	سرعت نصف‌النهاری در تراز فشاری ۸۵۰ هکتوپاسکال	۰/۰۱۹
۶	سرعت باد	سرعت مداری در تراز فشاری ۵۰۰ هکتوپاسکال	۰/۰۰۷
۷	سرعت باد	سرعت مداری در تراز فشاری ۸۵۰ هکتوپاسکال	۰/۰۰۵۱
۸	سرعت باد	سرعت مداری سطحی	۰/۰۲۴

در پژوهش حاضر بعد از انجام واسنجی و ارزیابی مدل، پارامتر سرعت باد توسط مدل SDSM برای دوره زمانی (۱۹۹۲-۲۰۰۵) توسط داده‌های NCEP و همچنین سناریوی RCP_{4.5} مدل

در پژوهش حاضر بعد از انجام واسنجی و ارزیابی مدل، پارامتر سرعت باد توسط مدل SDSM برای دوره زمانی (۱۹۹۲-۲۰۰۵) توسط داده‌های NCEP و همچنین سناریوی RCP_{4.5} مدل



شکل ۲: مقایسه پارامتر سرعت باد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دوره پایه ایستگاه اردبیل

بالایی هستند. این مقادیر خطا در جدول ۲ نشان داد که پارامتر سرعت باد در ایستگاه اردبیل، اختلاف معنی‌داری با داده‌های مشاهداتی ندارد و برآورد مدل در این منطقه به واقعیت نزدیک‌تر است.

هرچه مقادیر خطاها (MAE, MSE, RMSE, MAPE) کمتر و میزان ضریب ناش-ساتکلیف بیشتر باشد، مدل از کارایی بالاتری برخوردار است. طبق مقادیر جدول ۱، NCEP و سناریوی RCP_{4.5} در برآورد میزان سرعت باد دارای کارایی و دقت

جدول ۲: محاسبه معیارهای آماری ارزیابی و صحت‌سنجی مدل در برآورد سرعت باد ایستگاه اردبیل

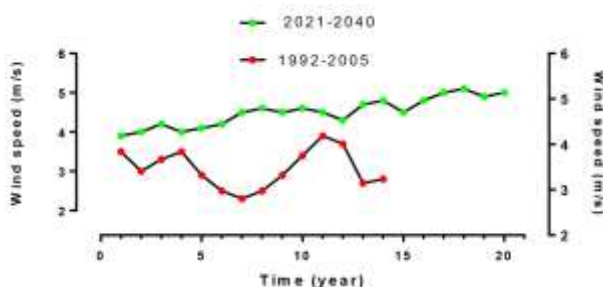
RCP _{4.5}					NCEP					متغیر	ایستگاه
NS	MAPE	RMSE	MSE	MAE	NS	MAPE	RMSE	MSE	MAE		
۰/۹۲۲	۷/۸۲	۰/۲۲	۰/۰۷۱	۰/۲۱	۰/۹۲۵	۶/۶۲	۰/۲۴	۰/۰۶۷	۰/۲۱	سرعت باد	اردبیل

در دهه‌های آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در منطقه مورد مطالعه تحلیل شد. بررسی وضعیت تغییر اقلیم در اردبیل نشان می‌دهد سرعت باد دارای روند

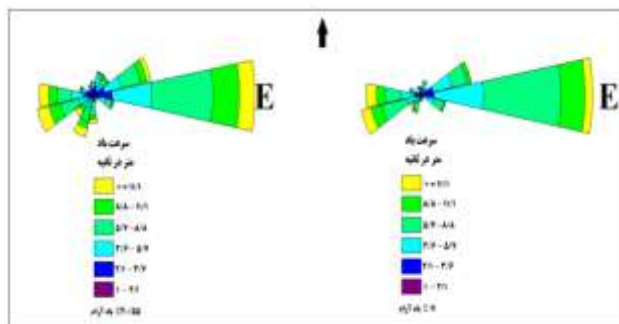
در بررسی نتایج، ابتدا اثر تغییر اقلیم بر روند سرعت باد در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه اردبیل مشخص شد و سپس ویژگی‌های انرژی باد

ثانیه است، در دوره پایه ۴۰/۵۵٪ و در آینده ۲۱ درصد از بادها را شامل می‌شود. گلباد در ایستگاه جهت و طبقات سرعت باد را به صورت محور به تصویر کشیده و در طراحی و نصب توربین‌های بادی به دلیل نشان دادن باد غالب در منطقه به عنوان پارامتر مهم شناخته می‌شود. در دوره پایه سرعت باد ۷-۱۱ متر در ثانیه بیشترین فراوانی را دارد، اما در دهه‌های آینده سرعت ۱۱-۱۷ متر در ثانیه بیشترین فراوانی را خواهد داشت که خود دلیلی بر افزایش سرعت باد در دوره‌های آینده اردبیل است.

افزایشی است (شکل ۳). در دوره پایه و آینده دامنه میانگین سرعت باد بین ۲ تا ۵ متر در ثانیه است که در دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۰۵) میانگین ۳/۶۹ و در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) ۴/۳۴ متر در ثانیه خواهد بود که انتظار می‌رود ۰/۶۵ متر در ثانیه بر سرعت باد در آینده افزوده شود. سرعت باد دوره پایه با شیب ۰/۰۶ و در آینده با ۰/۱۶ متر در ثانیه افزایش خواهد یافت. گلباد ایستگاه اردبیل برای دوره پایه و آینده ترسیم شد (شکل ۴) که در دوره پایه و آینده باد غالب شرقی (E) است و باد آرام که سرعت باد کمتر از یک متر در



شکل ۳: نمودار سری زمانی میانگین سرعت باد سالانه ایستگاه اردبیل در دوره پایه و آینده

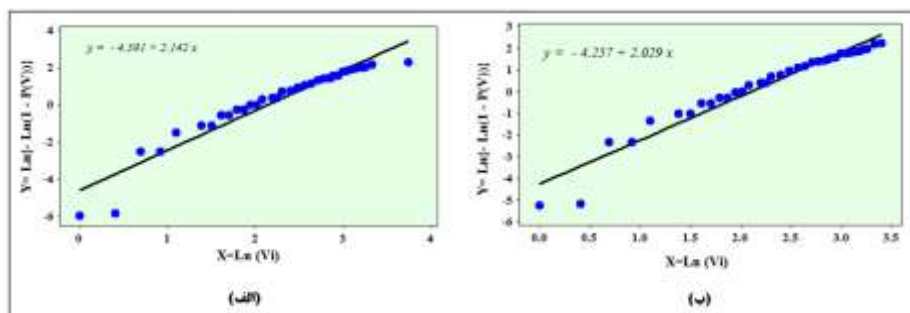


شکل ۴: گلباد سالانه ایستگاه اردبیل در دوره پایه (چپ) و آینده (راست)

برازش داده‌های باد بر تابع توزیع ویبول، ابتدا پارامترهای شکل (K) و مقیاس (C) برحسب متر در ثانیه از روش برازش حداقل مربعات و تابع احتمال تجمعی به کمک رگرسیون خطی ($y = ax+b$) بین داده‌های سرعت و احتمال وقوع باد محاسبه شد (شکل ۵).

نتایج توزیع ویبول

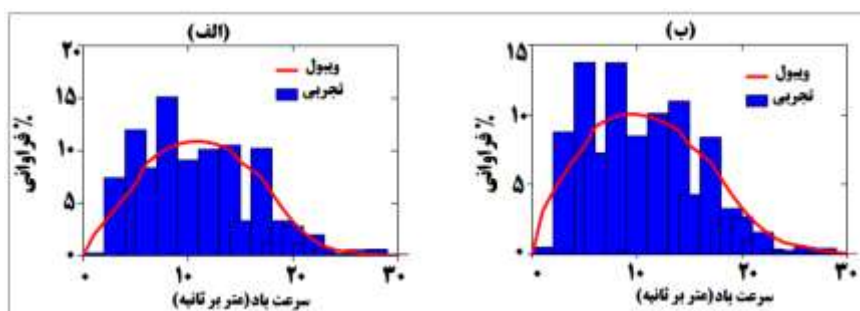
به منظور بررسی داده‌های باد ایستگاه اردبیل و محاسبه انرژی حاصل از آن در سال‌های آینده، داده‌های سرعت باد به دو دهه آینده (۲۰۳۰-۲۰۲۱) و (۲۰۴۰-۲۰۳۱) تقسیم و توزیع ویبول بر روی داده‌های باد در هر دهه برازش شد. برای



شکل ۵: الف) رابطه خطی y_i و x_i برای تعیین مقادیر a و b در ایستگاه اردبیل در دهه اول و دهه دوم آینده

حاصل از آزمون بیانگر صحت توزیع ویبول بر داده‌های مشاهداتی سرعت باد در ایستگاه اردبیل برای دهه‌های آینده است و برای محاسبه چگالی توان باد و استحصال انرژی از نصب توربین‌های بادی می‌توان از نتایج این توزیع بهره جست (جدول ۳).

پس از محاسبه شیب خط (a) و عرض از مبدأ (b) پارامترهای K برای دهه اول و دهه دوم آینده ایستگاه اردبیل به ترتیب ۲/۲۱ و ۱/۹۳ و برای پارامتر C به ترتیب ۸/۴۱ و ۸/۳۵ حاصل شد که با داشتن این پارامترها، تابع توزیع ویبول محاسبه و بر داده‌های واقعی باد برازش شد (شکل ۶) و صحت این سنجش با آزمون کی‌دو ارزیابی شد که نتایج



شکل ۶: برازش مقادیر تجربی سرعت باد و توزیع ویبول در ایستگاه اردبیل در دهه اول (الف) و دهه دوم (ب) آینده

جدول ۳: آماره کی دو با مقادیر بحرانی کی دو در سطح معناداری ۰/۰۵ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۸)

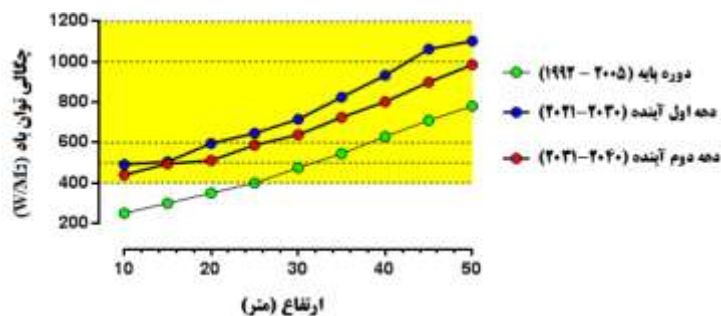
سطح معنی‌داری	تست کی دو	درجه آزادی	دهه‌های آینده
۰/۰۰۰ **	۱۱۶	۴۹	دهه اول
۰/۰۰۰ **	۲۰۴	۸۵	دهه دوم

متری از سطح زمین، چگالی توان باد در دهه اول و دهه دوم آینده به ترتیب ۴۴۰/۳ و ۴۹۲/۸ وات در مترمربع خواهد بود. با توجه به این که ارتفاع محور بیشتر توربین‌های بادی تجاری، حدود ۳۰ تا ۸۰ متر از سطح زمین است، در این پژوهش، چگالی توان باد در دوره پایه و دهه‌های آینده تا ارتفاع

بهترین راه برای ارزیابی منبع باد موجود در یک منطقه، محاسبه مقادیر چگالی توان باد است که نشان می‌دهد چه مقدار انرژی در آن منطقه برای تبدیل به الکتریسیته توسط توربین بادی وجود دارد. نتایج حاصل از روابط مربوط به محاسبه پارامترهای انرژی باد نشان داد که در ارتفاع ۱۰

خواهد بود که می‌تواند انرژی بیشتری در مقایسه با دوره پایه تولید کند. در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین، براساس داده‌های سرعت باد در دوره پایه حدود ۸۰۰ وات در مترمربع، اما در آینده بیش از ۱۰۰۰ وات در مترمربع چگالی توان باد خواهد بود.

۵۰ متری از سطح زمین محاسبه شد (شکل ۷). مقایسه دوره پایه با دوره‌های آینده بیانگر افزایش چگالی توان باد در سال‌های آینده است. در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین، چگالی توان باد در دوره پایه ۵۰۰ وات در مترمربع محاسبه شد، اما در دوره‌های آینده بیش از ۶۰۰ وات در مترمربع



شکل ۷: چگالی توان باد در دوره‌های پایه و آینده ایستگاه اردبیل در ارتفاعات مختلف سطح زمین براساس توزیع ویبول

نشان می‌دهد در دهه‌های آینده طبقه سرعت ۱۱ تا ۱۷ متر در ثانیه بیشترین فراوانی سرعت باد را خواهد داشت که این شرایط بیانگر تولید بیشترین انرژی باد در سرعت‌هایی که بیشترین فراوانی را خواهد داشت.

نتایج حاصل از بررسی سرعت نامی باد بیانگر این است که بیشترین چگالی باد ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در دهه اول و دوم آینده به ترتیب در سرعت ۱۱/۲۶ و ۱۲ متر در ثانیه حاصل می‌شود (شکل ۸ الف) و در ارتفاعات بالاتر در سرعت‌های بیش از ۱۲ متر در ثانیه به دست می‌آید. جدول ۴

جدول ۴: محاسبه درصد فراوانی طبقات سرعت باد برای دوره پایه و دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل

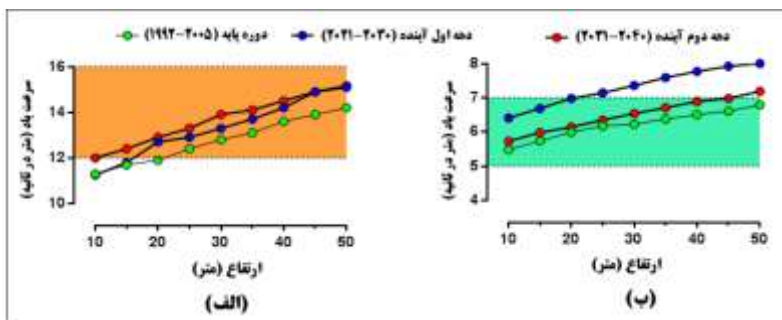
سرعت باد طبقات (m/s)	دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۰۵) (%)	دهه اول آینده (۲۰۲۱-۲۰۳۰) (%)	دهه دوم آینده (۲۰۳۱-۲۰۴۰) (%)
۰	۴۱/۱	۱۷/۷	۳۰/۵
۲-۴	۶/۹	۴/۶	۷/۴
۴-۷	۱۹/۱	۱۱/۷	۱۰
۷-۱۱	۱۷/۷	۱۸/۲	۱۴
۱۱-۱۷	۱۰/۵	۲۱/۵	۱/۲
۱۷-۲۱	۲/۷	۱۳	۱۰/۶

بیش از ۶ متر در ثانیه می‌رسد (شکل ۸ ب). مقایسه دوره گذشته (پایه) با دوره‌های آینده بیانگر این است که سرعت نامی و محتمل‌ترین سرعت باد در سال‌های آینده افزایش خواهد یافت.

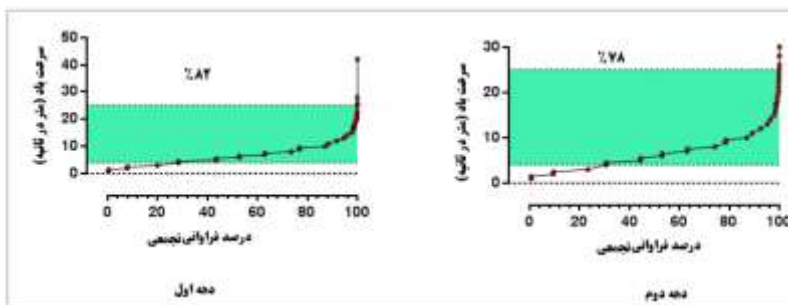
سرعتی که بیش‌ترین احتمال وقوع در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در ایستگاه اردبیل دارد، در دهه اول سرعت ۶/۴۱ و در دهه دوم سرعت ۵/۷۳ متر در ثانیه خواهد بود و در ارتفاعات بالاتر به

موجودیت باد در حیطة تولید انرژی هستند که این ویژگی‌های مناسب می‌تواند بیشترین زمان را در اختیار توربین‌های بادی جهت استحصال انرژی بگذارد (شکل ۹).

نتایج حاصل از سرعت‌های راه‌انداز و توقف توربین‌های بادی جهت تولید الکتریسیته نشان داد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در دهه اول ۸۲ درصد و در دهه دوم ۷۸ درصد از ساعات



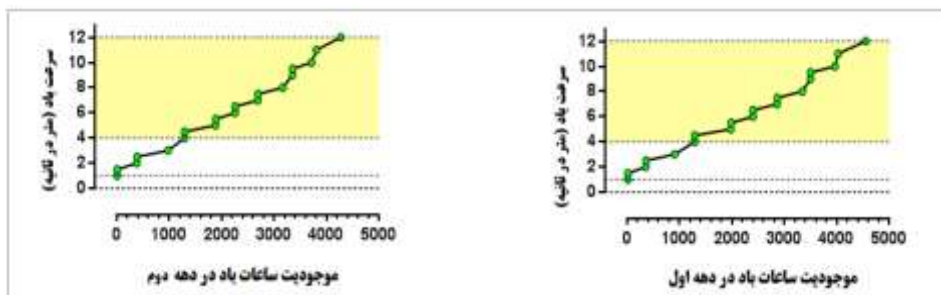
شکل ۸: سرعت نامی باد (الف) و محتمل‌ترین سرعت باد (ب) ایستگاه اردبیل در دوره گذشته (پایه) و دهه‌های آینده



شکل ۹: سرعت‌های راه‌انداز و توقف توربین بادی در دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل

۳۰۰۰ ساعت از سال سرعت باد بیش از ۴ متر در ثانیه خواهد بود که سرعت راه‌انداز توربین بادی است و در این ۳۰۰۰ ساعت در سال، توربین در حال چرخش و تولید انرژی خواهد بود (شکل ۱۰).

منحنی سرعت-تداوم باد براساس ساعات موجودیت باد و توزیع طبقات سرعت باد ترسیم شد که نشان می‌دهد موجودیت ساعات باد در سال در دهه اول و دوم آینده به ترتیب ۴۵۵۳ و ۴۲۷۳ ساعت خواهد بود که بیش از ۵۰ درصد از سال، باد در ایستگاه اردبیل موجود است و بیش از



شکل ۱۰: منحنی سرعت-تداوم باد در دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی پارامترهای آب و هوایی همچون دما در اردبیل با سیستم‌های استنتاج فازی-عصبی بیانگر تغییرات آب و هوایی در اردبیل است (سبحانی و گل‌دوست، ۱۳۹۵) و اقلیم این منطقه از کشور ایران تحت‌تأثیر گرمایش جهانی در حال دگرگونی بوده و تغییر در میزان دما می‌تواند بر بارش، طوفان‌های تندری و سرعت باد تأثیر بگذارد. سرعت باد یکی از پارامترهای مهم در برآورد انرژی حاصل از توربین‌های بادی است که صلاحی (۱۳۸۳)، جعفری و همکاران (۱۳۹۲) و رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند سرعت و موجودیت باد در اردبیل به‌گونه‌ای است که می‌توان حداکثر انرژی را از توربین‌های بادی در این منطقه به‌دست آورد؛ اما سرعت باد نیز همچون دیگر فراسنج‌های آب و هوایی تحت‌تأثیر گرمایش جهانی بوده که نتایج این پژوهش بیانگر افزایش میانگین سرعت باد سالانه در آینده است که امکان استفاده از توربین‌های بادی جهت استحصال انرژی را تقویت می‌کند. سرعت باد در مناطقی از آمریکای شمالی و اروپا در دوره آماری ۲۰۱۶-۱۹۷۹ کاهش یافته و پتانسیل انرژی حاصل از آن نیز حدود ۳۰ درصد کاهش یافته است (Tian et al, 2019). گرمایش جهانی منجر به تغییر الگوهای همدیدی گردش اتمسفری شده و در روسیه با افزایش چرخندهای تراز میانی جو به ۲۰ الی ۳۰ مورد، باعث تزریق هوای گرم و مرطوب به جو روسیه شده و منجر به ذوب شدن یخ‌های قطبی و در نهایت افزایش سرعت باد می‌شود که می‌توان از این تندی باد برای تولید انرژی تجدیدپذیر استفاده کرد که با پسخور منفی می‌تواند با کاهش سوزاندن سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی، به جلوگیری از گرمایش جهانی

کمک کند (Soldatenko and Karlin, 2014). نتایج مدل‌سازی سرعت باد در آینده حاصل از مدل RCA ECHAM تحت سناریوهای A و B در ایرلند بیانگر افزایش سرعت باد در زمستان و کاهش آن در تابستان است که انرژی باد نیز موازی با آن در زمستان افزایش خواهد یافت (Nolan et al, 2012). نتایج حاصل از مدل‌سازی پارامترهای اقلیمی برای آینده در ایستگاه اردبیل بیانگر صحت و اعتبار سناریو RCP4.5 و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM در تولید داده‌های اقلیمی است که با نتایج (دشت بزرگی و همکاران، ۱۳۹۴؛ بابایی فینی و همکاران، ۱۳۹۳) مبنی بر اعتبار سناریو و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM در پیش‌بینی، همسان بود؛ بنابراین خروجی مدل‌های گردش اتمسفری GCM می‌تواند در پیش‌بینی فراسنج‌های اقلیمی استفاده شود. در ایستگاه اردبیل در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین که حدود ۴۴۷۴ ساعت در سال با چگالی توان باد ۷۰۶/۱۴ وات در مترمربع است و نیز با توجه به وجود ۲۷۰۹ ساعت وزش بادهای با سرعت ۷ الی ۲۵ متر در ثانیه، استفاده از انرژی باد در این ایستگاه امکان‌پذیر است (صلاحی، ۱۳۸۳). نتایج این پژوهش نیز بیانگر چگالی توان ۱۰۰۰ وات در مترمربع و نزدیک به ۵۰۰۰ ساعت موجودیت باد در سال و حدود ۸۰ درصد از ساعات باد در سرعت‌های چرخش توربین در دهه‌های آینده است که برای تولید انرژی مناسب خواهد بود. انرژی باد طی سال‌های گذشته در ایران و دیگر نقاط جهان بررسی شده است؛ به‌طوری که در ایران شرق کشور بادخیزترین منطقه ایران بوده (گندمکار، ۱۳۸۸)، در کنار جلگه خوزستان (خسروی و همکاران، ۱۳۹۵)، سواحل خلیج فارس و دریای عمان به همراه نقاط پراکنده همچون دره

۶۰۰ وات در هر مترمربع در نیمی از ساعات سال را جهت استحصال انرژی باد مناسب می‌داند؛ بنابراین مقدار انرژی استحصال در دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل در مقایسه با این رقم قابل توجه بوده و مستعد استحصال انرژی خواهد بود. سرعت نامی باد یعنی سرعتی که بیشترین انرژی را در طول سال ایجاد می‌کند و نتایج این پژوهش نشان داد در دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل این سرعت در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین حدود ۱۱ و در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین حدود ۱۵ متر در ثانیه خواهد بود. محتمل‌ترین سرعت باد نیز در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین حدود ۶ و در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین حدود ۸ متر در ثانیه خواهد بود. براساس این نتایج، سرعت نامی باد و محتمل‌ترین سرعت باد در دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل در محدوده سرعت راه‌اندازی و توقف توربین‌های بادی خواهد بود که مقدار این پارامترها نشان می‌دهد استفاده از انرژی باد در دهه‌های آینده در اردبیل مقرون به صرفه خواهد بود. صلاحی (۱۳۸۳) نیز نشان داد سرعت نامی و محتمل‌ترین سرعت باد در سال‌های بین ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۱ در ایستگاه اردبیل جهت استفاده از انرژی بادی مناسب است؛ بنابراین با تلفیق نتایج پژوهش حاضر با نتایج صلاحی (۱۳۸۳) می‌توان گفت دشت اردبیل به منظور استحصال انرژی باد مناسب است. جعفری و همکاران (۱۳۹۲) و رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۳) نیز پس از محاسبات احتمالات پارامترهای مربوط به انرژی باد نشان دادند دشت اردبیل مکانی مناسب جهت نصب توربین‌های بادی جهت تولید انرژی است. نتایج نشان داد مطابق با دو معیار اصلی توان‌سنجی باد یعنی ساعات موجودیت باد بین سرعت‌های راه‌اندازی و توقف توربین و انرژی قابل استحصال در سال، در دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل شرایط

منجیل، اردبیل (صلاحی، ۱۳۸۳) (رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۳) و نقاطی در غرب ایران، برای تأمین انرژی حاصل از توربین‌های بادی مناسب هستند. در کشور سنگال در قاره آفریقا سرعت باد سالانه ۳/۸ متر در ثانیه است که برآزش داده‌های سرعت باد بر توزیع ویبول بیانگر تأمین ۱۵۸ کیلووات ساعت در مترمربع انرژی تولید خواهد شد (Youm et al, 2005). نتایج حاصل از برآزش توزیع ویبول بر داده‌های وقوع باد آینده نشان داد این توزیع در محدوده سرعت‌های کمتر از ۲ متر در ثانیه دقت کمتری دارد؛ اما برای داده‌های بلندمدت باد و مشاهدات و اندازه‌گیری‌های سرعت، توزیع احتمال پیوسته ویبول نتایج مناسبی ارائه نمود، ولی بادهای آرام و کم سرعت را توجیه نمی‌کند. نتایج آذری و همکاران (۱۳۹۵) نیز بیانگر همین موضوع است؛ البته در کنار توزیع ویبول، از دیگر توزیع‌های آماری برای برآزش داده‌های وقوع باد استفاده کردند. در پژوهش حاضر، با توجه به رابطه انرژی باد در واحد سطح، مقدار چگالی انرژی باد در دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل بیش از ۴۴۰ وات در مترمربع در زمان موجودیت باد محاسبه شد و مقادیر چگالی محاسبه شده مربوط به اطلاعات ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین است. بررسی منابع نشان داد که ارتفاع محور اغلب توربین‌های بادی تجاری حدود ۳۰ الی ۸۰ متر از سطح زمین است (بافکار و همکاران، ۱۳۹۱؛ جمیل، ۱۳۸۰). در پژوهش حاضر علاوه بر ارتفاع ۱۰ متری، انرژی باد تا ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین برای دهه‌های آینده ایستگاه اردبیل محاسبه شد و نتایج به‌گونه‌ای بود که چگالی توان باد در این ارتفاع برای دهه‌های آینده به بیش از ۹۸۰ تا ۱۰۰۰ وات در هر مترمربع محاسبه شد. آمبوینا و همکاران (Amboina et al, 1992) چگالی توان بیش از

بادهای آرام و کم سرعت را توجیه نمی‌کند. نتایج آذری و همکاران (۱۳۹۵) نیز بیانگر همین موضوع است، البته وی در کنار توزیع ویبول، از دیگر توزیع‌های آماری برای برازش داده‌های وقوع باد استفاده نمود. انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از نیروگاه‌های حرارتی به‌منظور تأمین انرژی طی چهل سال گذشته روند افزایشی داشته و منجر به گرمایش جهانی شده که به‌نوبه خود باعث تغییر در الگوهای گردشی و پارامترهای جوی همچون روند بارش، میزان رطوبت و سرعت باد در نقاط مختلف شده است. سرعت باد در ایستگاه اردبیل ناشی از گرمایش جهانی طی سال‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱ حدود ۱۴ درصد افزایش خواهد یافت که این شرایط برای تأمین انرژی حاصل از چرخش توربین‌های بادی مناسب است، چون بیشترین توان تولیدی برق در سرعت‌های بالا به‌دست می‌آید و از طرف دیگر، افزایش سرعت باد منجر به بیشتر شدن چگالی انرژی بادی و افزایش ساعات موجودیت باد و کاهش بادهای آرام در منطقه می‌شود؛ بنابراین افزایش سرعت باد و موجودیت ساعات باد در آینده ایستگاه اردبیل در افزایش انرژی بادی نقش مهمی خواهد داشت. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد توان باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین به بیش از ۱۰۰۰ وات در مترمربع خواهد رسید که کسب انرژی از آن مقرون به صرفه خواهد بود. استفاده از این انرژی تجدیدپذیر می‌تواند در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌طور مستقیم نقش داشته باشد.

مناسبی برای استحصال انرژی باد جهت تولید برق وجود دارد. در حالی‌که بافکار و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی انرژی باد در ایستگاه‌های مختلف استان کرمانشاه به این نتیجه رسیدند که تنها در یک ایستگاه شرایط برای بهره‌برداری از انرژی باد مناسب است. میانگین سرعت باد در ایستگاه اردبیل حدود ۳/۸ متر در ثانیه است (همتی و همکاران، ۱۳۹۱) که نتایج حاصل از سناریوهای اقلیمی و برونداد مدل‌های ریزمقیاس نمایی در این پژوهش، بیانگر افزایش سرعت باد در دهه‌های آینده از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ است که بین ۴ تا ۴/۵ متر در ثانیه خواهد بود و با نتایج بلوم و همکاران (Bloom and et al, 2008) مطابقت دارد که نشان داد سرعت باد در مناطق خشکی شرق دریای مدیترانه طی سال‌های آینده افزایش خواهد یافت؛ اما سرعت بادهای سطح دریا کاهش خواهد یافت. همچنین داوی و همکاران (Davy et al, 2017) نیز موافق با افزایش سرعت باد و سهولت در استحصال انرژی بادی در اروپاست که نتایج وی حاصل از برونداد اقلیمی تحت سناریوی RCP بیانگر افزایش سرعت باد به‌ویژه در زمستان است که کشورهای همسایه دریای سیاه می‌توانند از این پتانسیل بهره کافی جهت تأمین برق را ببرند. نتایج حاصل از برازش توزیع ویبول بر داده‌های وقوع باد مشاهده آینده نشان داد این توزیع در محدوده سرعت‌های کمتر از ۴ نات در ثانیه دقت کمتری دارد؛ اما برای داده‌های بلندمدت باد و مشاهدات و اندازه‌گیری‌های سرعت، توزیع احتمال پیوسته ویبول نتایج مناسبی ارائه نمود، ولی

پانویس

1-Nash-Sutcliffe

2-Rayleigh

3-Gamma distribution

4-Form factor

5-Scale factor

6-Least-square

منابع

- استان آذربایجان شرقی، نشریه جغرافیا و برنامه- ریزی محیطی، سال بیست و شش، پیاپی ۵۹، شماره ۳، ص ۶۱-۸۰.
- جهانگیری، ز.، رحیم زاده، ف. و کمالی، غ.، ۱۳۸۴. محاسبه انرژی باد با استفاده از توزیع ویبال دو پارامتره، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۲۰، پیاپی ۷۶، شماره ۱، ص ۱۵۱-۱۷۰.
- خسروی، م.، ابراهیمی، م. و بهروزی، م.، ۱۳۹۵. بررسی وضعیت انرژی باد در استان خوزستان به منظور استفاده از توربین‌های بادی، نشریه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره ۶، شماره ۲۲، ص ۲۹-۴۲.
- دشت بزرگی، ا.، علیجانی، ب.، جعفرپور، ز. و شکیبای، ع.، ۱۳۹۴. شبیه‌سازی شاخص‌های حدی دمای استان خوزستان براساس سناریوهای RCP، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱۶، ص ۱۰۵-۱۲۳.
- رضایی بنفشه، م.، جهانبخش، س.، دین‌پژوه، ی. و اسمعیل پور، م.، ۱۳۹۳. امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان‌های اردبیل و زنجان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال چهل و شش، شماره ۳، ص ۲۶۱-۲۷۴.
- رضائی، م.، نهتانی، م.، آبکار، ع.، رضائی، م. و میرکازهی ریگی، م.، ۱۳۹۳. بررسی کارائی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) در پیش‌بینی پارامترهای دمایی در دو اقلیم خشک و فراخشک (مطالعه موردی: کرمان و بم)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، سال ۵، ص ۱۱۷-۱۳۱.
- زاهدی، م.، صلاحی، ب. و جمیل، م.، ۱۳۸۴. محاسبه چگالی و توان باد به‌منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل، پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۷، شماره ۵۳، ص ۴۱-۵۵.
- سبحانی، ب. و گل‌دوست، ا.، ۱۳۹۵. بررسی تغییر دما و ارزیابی امکان پیش‌بینی آن در استان
- اسفندیاری درآباد، ف.، عالی جهان، م.، رحیمی، م. و مهرورز، ا.، ۱۳۹۲. آشکارسازی آماری تأثیر پدیده گرمایش جهانی بر ناهنجاری‌های دبی حوضه رودخانه ارس، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۴، ص ۴۳-۶۰.
- امیدوار، ک. و دهقان طزرجانی، م.، ۱۳۹۱. پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۲۷، شماره ۱۰۵، ص ۱۵۰-۱۷۰.
- آذری، ا.، زارعی، ز. و حاجی بابایی، ز.، ۱۳۹۵. توان‌سنجی باد برای توسعه پایدار انرژی در استان همدان، نشریه جغرافیا و پایداری محیط، دوره ۶، شماره ۱۹، ص ۹۹-۱۱۶.
- بابایی فینی، ا.، قاسمی، ا. و فتاحی، ا.، ۱۳۹۳. بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند نمایه‌های حدی بارش ایران زمین، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال اول، شماره ۳، ص ۸۵-۱۰۳.
- بافکار، ع.، آذری، ا. و احمدی، م.، ۱۳۹۱. برآورد انرژی باد و کاربرد آن در مکان‌یابی نیروگاه بادی در استان کرمانشاه، مجله نیوار، دوره ۳۶، شماره ۷۸-۷۹، ص ۱۱-۲۴.
- جعفری، ح.، عزیزی، ع.، نصیری، ح. و عابدی، س.، ۱۳۹۲. تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل با استفاده از مدل AHP و SAW در محیط GIS، نشریه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، دوره ۱۵، شماره ۲، ص ۲۴-۴۱.
- جمیل، م.، ۱۳۸۴. چگالی انرژی باد، مجله نیوار، شماره ۴۲-۴۳، ص ۲۷-۵۰.
- جهانبخش، س.، دین‌پژوه، ی.، رضایی بنفشه، م. و اسمعیل پور، م.، ۱۳۹۴. مقایسه روش‌های برآورد پارامترهای توزیع ویبول جهت تولید انرژی باد در

- عساکره، ح.، ۱۳۸۶. تغییر اقلیم، انتشارات دانشگاه زنجان، چاپ اول، زنجان، ۳۷۶ ص.
- گل محمدی، م. و مساح بوانی، ع.، ۱۳۸۹. بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره‌سو در دوره‌های آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم، نشریه آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۲، ص ۳۱۵-۳۲۶.
- گندمکار، ا.، ۱۳۸۸. ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۰، شماره ۴، ص ۸۵-۱۰۰.
- مهرآذر، آ.، مساح بوانی، ع.ر.، مشعل، م. و رحیمی خوب، ح.، ۱۳۹۷. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی دشت هشتگرد با تأکید بر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM گزارش ارزیابی پنجم IPCC، مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۴۱، شماره ۳، ص ۴۵-۵۹.
- همتی، ر.، هژبرپور، ق.، نصیری فر، ع.، دولتی مهر، ع.، شهبازی، م. و آقائی، س.غ.، ۱۳۹۱. مطالعات طرح آمایش استان اردبیل، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اردبیل.
- Breslow, P.B. and Sailor, D.J., 2002. Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States, *Renewable Energy*, v. 27, p. 585-98.
- Chang, P.T., 2011. Performance Comparison of six Numerical Methods in Estimating Weibull Parameters for Wind Energy Application, *Applied Energy*, v. 88(1), p. 272-282.
- Chaudhary, D., Kumar, D., Jaiswal, R.K. and Nema, A.K., 2018. A Statistical Downscaling Technique for Assessment of Meteorological Parameters under Climate Change
- Ambrosini, G., Benato, B., Garavaso, C., Botta, G., Cenerini, M., Comand, D. and Stork, C., 1992. Wind energy potential in Emilia Romagna, Italy, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 39(1-3), p. 211-220.
- Bloom, A., Kotroni, V. and Lagouvardos, K., 2008. Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 8(6), p. 1249-1257.

- Condition Using SDSM-DC Model in Raipur District, *International Journal of Bio-Resource & Stress Management*, v. 9(4), p. 176-192.
- Chen, H., Xu, C.Y. and Guo, S., 2012. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff, *Journal of hydrology*, v. 434, p. 36-45.
- Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M. and Amanatidis, G., 2007. Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project, *Climatic Change*, v. 81, p. 1-6.
- Davy, R., Gnatiuk, N., Pettersson, L. and Bobylev, L., 2017. Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81(2), p. 1652-1659.
- Giorgi, F. and Mearns, L.O., 1999. Introduction to Special Section: Regional Climate Modeling Revisited, *Journal of Geophysical Research*, v. 104, p. 6335-6352.
- González-Rojí, S.J., Wilby, R., Sáenz, J. and Ibarra-Berastegi, G., 2018. Harmonized evaluation of daily precipitation downscaled using SDSM and WRF+WRFDA models over the Iberian Peninsula, *Climate Dynamics*, ISSN: 0930-7575.
- Harrison, G.P., Cradden, L.C. and Chick, J.P., 2008. Preliminary assessment of climate change impacts on the UK onshore wind energy resource, *Energy Sources*, v. 30(14-15), p. 1286-1299.
- Hennings, W., Mischinger, S. and Linssen, J., 2013. Utilization of excess wind power in electric vehicles, *Energy Policy*, v. 62, p. 139-144.
- IPCC, 2007. *Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1032 p.
- IPCC, 2014. *The Physical Science Basis*, Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1522 p.
- Marengo, J.A., Chou, S.C., Torres, R.R., Giarolla, A., Alves, L.M. and Lyra, A., 2014. Climate change in central and South America: recent trends, future projections and impacts on regional agriculture, *Technical Report*.
- Mirhosseini, M., Sharifi, F. and Sedaghat, A., 2011. Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran, *Renew Sustain Energy Rev*, v. 15(1), p. 449-59.
- Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A.A. and Kalantar, V., 2011. Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran, *Renew Sustain Energy Rev*, v. 15(6), p. 2545-56.
- Mostafaeipour, A., Jadidi, M., Mohammadi, K. and Sedaghat, A., 2014. An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 30, p. 641-650.
- Nolan, P., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T. and Wang, S., 2012. Simulating climate change and its effects on the wind energy resource of Ireland, *Wind Energy*, v. 15(4), p. 593-608.
- Pryor, S.C. and Barthelmie, R.J., 2010. Climate change impacts on wind energy: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14(1), p. 430-437.
- Sailor, D.J., Smith, M. and Hart, M., 2008. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States, *Renewable Energy* 2008, v. 33(11), p. 2393-2406.

- Soldatenko, S. and Karlin, L., 2014. The climate change impact on Russia' wind energy resource: current areas of research, *Energy and Power Engineering*, v. 6(11), p. 371-385.
- Tian, Q., Huang, G., Hu, K. and Niyogi, D., 2019. Observed and global climate model based changes in wind power potential over the Northern Hemisphere during 1979–2016, *Energy*, v. 167(15), p. 1224-1235.
- Vuuren, D.V., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K. and Weyant, J., 2011. A special issue on the RCPs, *Climate Change*, v. 109, p. 1-4.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow, E.M., 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Environmental Modelling & Software*, v. 17(2), p. 145-157.
- WWEA, 2014. Key Statistics of World Wind Energy Report 2013, WWEA, Shanghai, 7 April 2013, 13 p.
- Youm, I., Sarr, J., Sall, M., Ndiaye, A. and Kane, M.M., 2005. Analysis of wind data and wind energy potential along the northern coast of Senegal, *Rev. Energy. Ren*, v. 8, p. 95-108.