



The Assessment of Kermanshah Wind Potential

Somayeh Rafati^{1*}, Mostafa Karimi²

¹ Department of Geography, Faculty of Humanities, Sayyed Jamaledin Asadabadi University, Asadabad, Iran

² Department of Natural Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type: Research article

Article history:

Received 2 July 2020

Accepted 15 September 2020

Available online 22 September 2020

Keywords:

Wind Potential, Wind Power Density, Wind Atlas, Weibull Distribution, Kermanshah Province.

Citation: Rafati, S., Karimi, M. (2021). The Assessment of Kermanshah Wind Potential. *Geography and Environmental Sustainability*, 11 (1), 23-40. doi: [10.22126/GES.2020.5470.2262](https://doi.org/10.22126/GES.2020.5470.2262)

ABSTRACT

We gathered wind data (2009-2013), Digital Elevation Model and Land-use maps to assess wind potential. Topographic maps of the area with contour distances of 10 meters, surface roughness and obstacles in the stations were prepared to produce wind atlases. Then wind potential was calculated and evaluated using parameters including mean wind power density, most probable and maximum energy-carrying wind speed in 40 m AGL and 0.03 m surface roughness conditions. The comparison of wind properties in studied sites for 0.03m surface roughness and 40 m AGL conditions showed that mean wind speed is the highest in Gilanqarb and Tazehabad and the lowest in Kangavar and Sarpolzahab respectively. Besides, the investigation of shape reveals that wind speed is more uniform in Tazehabad, Somar and Gilanqarb, while it is less uniform in Kangavar and Ravansar. Most probable wind speed equals to 0 in Ravansar and Kangavar. Moreover, it is very low (less than 1 m/s) in Sapolzahab and Eslamabadqarb, while it is the highest in Tazehabad (5.72m/s), Gilanqarb (5.61 m/s), and Somar (4.91 m/s). Although there is no notable spatial pattern for wind speed in Kermanshah province due to topographical complexity, sites with high wind energy potential is more frequent in west of this province (such as Tazehabad, Gilanqarb and Somar) compared to the east of it. Thus, the west of this area has more potential to use wind energy in general.





ارزیابی پتانسیل بادخیزی در استان کرمانشاه

سمیه رفعتی^{۱*}، مصطفی کریمی^۲

^۱ گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه سیدجمال‌التین اسدآبادی، اسدآباد، ایران
^۲ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

به‌منظور ارزیابی پتانسیل بادخیزی در محدوده استان کرمانشاه داده‌های سرعت و جهت باد (دوره آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳)، مدل رقومی ارتفاع و کاربری زمین اخذ شد. نقشه‌های منحنی میزان منطقه با فاصله‌های ده متر، زبری سطح زمین و موانع موجود در ایستگاه‌ها برای تولید اطلس باد آماده شد. ویژگی‌های باد در ایستگاه‌های هواشناسی تولید و بررسی شدند؛ سپس پتانسیل باد با کمک پارامترهای میانگین چگالی توان باد، محتمل‌ترین سرعت باد و سرعت باد بیشینه تولید انرژی در شرایط مشابه برای محدوده ایستگاه‌ها (ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین و زبری سطح ۰/۰۳ متر) ارزیابی شد. مقایسه ویژگی‌های برآوردشده باد در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین برای زبری سطحی کلاس یک (۰/۰۳ = Z_0)، در محدوده ایستگاه‌های مورد بررسی نشان داد که میانگین سرعت باد به‌ترتیب در محدوده ایستگاه‌های گیلان غرب (جنوب غرب استان) و تازه‌آباد (شمال غرب استان) بیشترین و در محدوده ایستگاه‌های کنگاور (شرق استان) و سرپل‌دهاب (غرب استان)، کمترین مقدار را دارد؛ همچنین با توجه به پارامتر k ویبول مشخص شد که رژیم بادی در ایستگاه‌های تازه‌آباد، سومار (جنوب غرب استان) و گیلان غرب یکنواخت‌تر و در ایستگاه‌های کنگاور و روانسر (شمال استان) نامنظم‌تر از دیگر ایستگاه‌ها است. در ایستگاه‌های روانسر و کنگاور نبود وزش باد، محتمل‌ترین پیشامد است؛ همچنین در ایستگاه‌های سرپل‌دهاب و اسلام‌آباد غرب (جنوب استان) نیز محتمل‌ترین سرعت باد بسیار پایین و کمتر از یک متر بر ثانیه است. درحالی که محتمل‌ترین سرعت باد در ایستگاه‌های تازه‌آباد ($72/5$ m/s)، گیلان غرب ($61/5$ m/s) و سومار ($91/4$ m/s) به‌ترتیب بالاترین مقادیر را دارند؛ بنابراین باوجودی که ویژگی‌های سرعت باد نظم مکانی مشخصی نشان نمی‌دهد، به این صورت که گاه ایستگاه‌هایی با فواصل کم تفاوت‌های زیادی دارند که ناشی از اهمیت تأثیر عوامل محلی و ریزمقیاس و پیچیدگی‌های منطقه است؛ به‌طور کلی می‌توان گفت که نیمه غربی استان نسبت به نیمه شرقی پتانسیل بادخیزی بالاتری دارد.

مشخصات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۲ تیر ۱۳۹۹

پذیرش ۲۵ شهریور ۱۳۹۹

دسترسی آنلاین ۱ مهر ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

پتانسیل بادخیزی، چگالی توان باد، اطلس باد، توزیع ویبول، استان کرمانشاه.

استناد: رفعتی، سمیه؛ کریمی، مصطفی (۱۴۰۰). ارزیابی پتانسیل بادخیزی در استان کرمانشاه. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۱ (۱)، ۲۳-۴۰.
doi: 10.22126/GES.2020.5470.2262



مقدمه

تولید و تأمین انرژی از ملزومات مهم توسعه و پیشرفت جوامع است. افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش روزافزون نیاز به انرژی از یک سو و ذخایر محدود و مشکلات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی از دیگر سو، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران را به سرمایه‌گذاری برای تولید انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر به‌ویژه در کشورهای توسعه‌یافته تشویق کرده است. از ابتدای دهه ۱۹۸۰ بررسی جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر در جهان آغاز شده است. بهره‌برداری از این منابع انرژی به دلیل ضرورت‌های زیست‌محیطی در مقیاس‌های کوچک شروع شده و به‌طور روزافزون در حال گسترش است. تجدیدپذیری، عدم آلودگی، گسترش این منابع در تمام جهان و سادگی بهره‌برداری، از مزایای مهم مورد توجه انرژی‌های تجدیدپذیر پاک است.

انرژی بادی یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک است که به‌طور گسترده‌ای به آن توجه شده است (ویوسکا^۱ و همکاران، ۲۰۱۴؛ شاهید^۲ و همکاران، ۲۰۱۴؛ منتیس^۳ و همکاران، ۲۰۱۵؛ شامی^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). در اروپا بیشترین میزان تولید الکتریسیته در بین انرژی‌های نو در سال ۲۰۰۸، انرژی باد بوده است که معادل ۴۳٪ از انرژی مورد نیاز در این قاره از آن تولید شده است (انجمن جهانی انرژی باد^۵، ۲۰۱۰).

فهم کامل ویژگی‌های باد برای تمامی جنبه‌های بهره‌برداری انرژی باد ضروری است. گام مهم برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی و به‌کارگیری توربین‌های بادی بررسی پتانسیل انرژی بادی در منطقه است که می‌تواند به‌دلیل طبیعت منابع انرژی باد چالش‌انگیز باشد. ویژگی‌های انرژی باد از نظر سرعت و جهت، درجه بالایی از تغییرپذیری زمانی و مکانی را نشان می‌دهد. تغییرپذیری می‌تواند به عدم قطعیت احتمالی منجر شود و این عدم قطعیت ممکن است عملکرد سیستم را به‌طور مهمی تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین پیش‌بینی دقیق سرعت باد در یک مکان برای اندازه‌گیری کمی منابع انرژی باد منطقه‌ای مهم است. پتانسیل انرژی باد یک مکان و ویژگی‌هایش می‌تواند به‌وسیله تحلیل آماری مشاهدات هواشناسی با کاربرد تابع توزیع احتمال سرعت باد ارزیابی شود. کارتا^۶ و همکاران (۲۰۰۹) بررسی جامعی از انعطاف‌پذیری و مفیدبودن دوازده مدل توزیع چگالی احتمال متفاوت انجام دادند و بیان داشتند که مدل ویبول^۷ مزایای زیادی در مقایسه با مدل‌های توزیع دیگر نشان می‌دهد. توزیع ویبول به‌دلیل سادگی و دقتی که دارد، یکی از پرکاربردترین توابع توزیع احتمال برای تحلیل آماری ویژگی‌های باد و بررسی پتانسیل انرژی باد است (هنسی^۸، ۱۹۷۷؛ شو^۹ و همکاران، ۲۰۱۵).

از لحاظ بین‌المللی سرعت مطلوب باد برای راه‌اندازی نیروگاه بادی بالای ۶/۵ متر بر ثانیه است، اما پیشرفت‌های فناوری فرصت بهره‌برداری از سرعت‌های پایین‌تر باد را نیز امکان‌پذیر ساخته است (جعفری و همکاران، ۱۳۹۲). بسیاری از پژوهشگران حداقل میانگین سرعت باد سالیانه مناسب به‌منظور نصب نیروگاه بادی را ۴ تا ۵ متر بر ثانیه ذکر کرده‌اند (حقی‌فام و سلطانی، ۱۳۸۸). سازمان انرژی‌های نو مطرح نمود که استفاده از انرژی باد وقتی ممکن است که متوسط سرعت باد در محدوده ۵ تا ۲۵ متر بر ثانیه باشد (نشریه سازمان انرژی‌های نو، ۱۳۸۶). مزارع بادی منجیل و بینالود سایت‌های بادی عمده در ایران هستند. در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۳ در ایران

1- Waewsak

2- Shaahid

3- Mentis

4- Shami

5- World Wind Energy Association (WWEA)

6- Carta

7- Weibull distribution function

8- Hennessey

9- Shu

به ترتیب ۴۷، ۸۲، ۹۱ و ۱۰۰ مگاوات ساعت^۱ برق از انرژی بادی تولید شد. ظرفیت تولید برق با توربین‌های بادی در ایران ۱۵۰۰۰ مگاوات برآورد می‌شود. بررسی ده ساله وزش باد در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور نشان‌دهنده وجود توان تولید برق با استفاده از نیروی باد در بسیاری از نواحی کشور در فصل تابستان است (گندم‌کار، ۱۳۸۸).

براساس مطالعه امکان‌سنجی که نوراللهی و همکاران (۱۳۹۰) در منطقه برق باختر انجام دادند، با فرض استفاده از توربین Gamesa G58 می‌توان تا ۱۸۹۷ مگاوات برق با نیروی باد تولید کرد که این مقدار تأمین‌کننده ۲۶٪ برق منطقه‌ای در افق ۱۴۰۴ است. در ایران در چند سال گذشته پتانسیل انرژی باد در مناطق مختلفی مثل منجیل در گیلان (مصطفایی‌پور و ابرقویی^۲، ۲۰۰۸)، یزد (مصطفایی‌پور، ۲۰۱۰)، تهران (کیهانی^۳ و همکاران، ۲۰۱۰)، شهرهای شمال غرب (فاضل‌پور^۴ و همکاران، ۲۰۱۵)، شهر بابک در کرمان (مصطفایی‌پور و همکاران، ۲۰۱۱)، ایگودرز در لرستان (فاضل‌پور و همکاران، ۲۰۱۳)، زرینه در کردستان (محمدی و مصطفایی‌پور^۵، ۲۰۱۳)، بینالود در خراسان (مصطفایی‌پور و همکاران، ۲۰۱۳)، زاهدان در سیستان و بلوچستان (مصطفایی‌پور و همکاران، ۲۰۱۴)، مرکزی (نوراللهی^۶ و همکاران، ۲۰۱۶) و بوشهر (دباغیان^۷ و همکاران، ۲۰۱۶) بررسی شده است.

با توجه به اهمیت ارزیابی پتانسیل باد مناطق مختلف به‌منظور تأمین انرژی مورد نیاز از منابع تجدیدپذیر و پاک، هدف نوشتار پیش رو بررسی عوامل مؤثر بر ویژگی‌های توزیع مکانی و زمانی سرعت و پتانسیل باد در استان کرمانشاه و همچنین بررسی پارامترهای تعیین پتانسیل باد و ارزیابی آن‌ها به‌منظور به‌کارگیری برای مکان‌یابی تأسیس نیروگاه‌های بادی از اهداف دیگر پژوهش حاضر است.

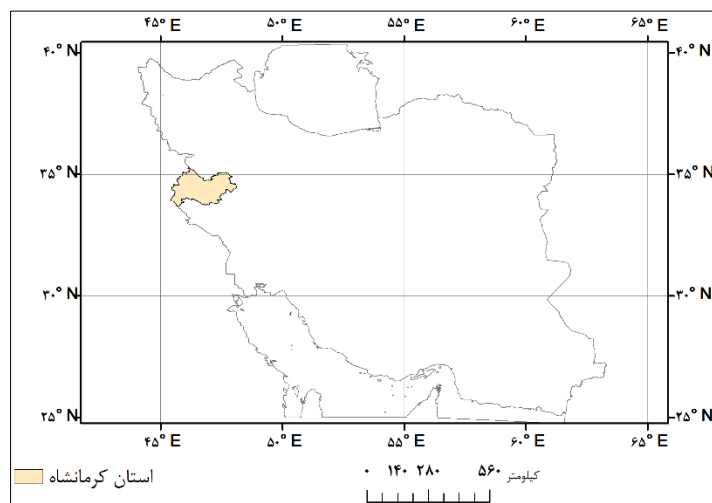
معرفی منطقه مورد بررسی

موقعیت جغرافیایی استان کرمانشاه روی کره زمین، بین عرض جغرافیایی $33^{\circ} 37' 08''$ تا $35^{\circ} 17' 08''$ درجه شمالی و طول جغرافیایی $45^{\circ} 20' 39''$ تا $48^{\circ} 01' 58''$ درجه شرقی است (شکل ۱). استان کرمانشاه از نظر توپوگرافی، ناحیه‌ای کوهستانی است که بین فلات ایران و جلگه بین‌النهرین قرار دارد و دشت‌های مرتفع کوهستانی در میان ارتفاعات آن شکل گرفته است. ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۲۰۰ متر است. در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان استان کرمانشاه را از نظر اقلیمی به دو بخش مجزای گرمسیری و معتدل کوهستانی تقسیم کرد. نوار مرزی عراق جزو بخش گرمسیری استان و بخش‌های مرکزی و شرقی استان که نواحی دشت‌های مرتفع و بخش‌های کوهستانی را نیز شامل می‌شود، جزو بخش معتدل استان هستند. با توجه به وضعیت ناهمواری‌های استان و قرارگیری ارتفاعات بلند در مجاورت دشت‌های پست، طبیعی است که تغییرات فشار در طی شبانه‌روز مشاهده شود؛ از این‌رو در طول سال وزش بادهای محلی در سطح استان رایج است.

مواد و روش‌ها

داده‌های سرعت و جهت باد پنج ایستگاه سینوپتیک و هشت ایستگاه سینوپتیک تکمیلی استان کرمانشاه در دوره آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ از سازمان هواشناسی اخذ شد. پیش‌پردازش داده‌های اقلیمی از جمله داده‌های سرعت باد شامل کنترل کیفی داده‌ها و بررسی همگنی است.

- 1- Mega Watt hour (MWh)
- 2- Abarghoeei
- 3- Keyhani
- 4- Fazelpour
- 5- Mohammadi & Mostafaeipour
- 6- Noorollahi
- 7- Dabbaghiyan



شکل ۱. موقعیت استان کرمانشاه

عمده‌ترین مشکلات داده‌های باد مورد بررسی عبارت بودند از: وجود داده پرت و ثبت داده در ساعات غیر دیده‌بانی ایستگاه‌های سینوپتیک تکمیلی، ناهمگنی داده‌ها و عدم اندازه‌گیری داده‌های جهت و سرعت باد در طول شب در ایستگاه‌های سینوپتیک تکمیلی؛ بنابراین در گام نخست داده‌های مورد استفاده به‌لحاظ کیفی بررسی و در صورت لزوم اصلاح شدند؛ سپس ویژگی‌های باد اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها محاسبه و بررسی شدند. در گام بعد با کاربرد مدل رقومی ارتفاع، کاربری زمین و موانع موجود در ایستگاه‌ها اطلس باد آماده شد و ویژگی‌های باد برای شرایط مشخص (ارتفاع چهل متری از سطح زمین و زبری سطحی کلاس یک ($z/0 = 0.1/0.3$))، برآورد و پتانسیل باد با کمک پارامترهای میانگین چگالی توان باد، محتمل‌ترین سرعت باد و سرعت باد بیشینه تولید انرژی، ارزیابی شد.

کنترل کیفی و اصلاح داده‌های باد

برای برنامه‌ریزی به‌منظور به‌کارگیری انرژی بادی، دسترسی به داده‌های با کیفیت باد برای برآورد صحیح منابع باد بسیار مهم است. بدین‌منظور نخستین گام برای آنالیز آماری این مشاهدات، بررسی کیفیت و صحت داده‌های ثبت‌شده و در صورت لزوم، اصلاح و آماده‌سازی آن‌ها است. بررسی چشمی سری زمانی داده‌های سرعت و جهت باد گام مهمی در پردازش داده‌ها است. با این بررسی مشکلات داده‌ها همچون وجود داده‌های پرت (سرعت باد نابهنجار بالا) یا ثبت داده در ساعات غیر دیده‌بانی در ایستگاه‌های سینوپتیک تکمیلی قابل مشاهده است؛ بنابراین باوجودی که پس از ثبت داده‌های جوی، کنترل کیفی داده‌ها به‌وسیله سازمان هواشناسی صورت می‌پذیرد، برای اطمینان بیشتر نسبت به صحت ویژگی‌های ثبت‌شده، داده‌ها دوباره بررسی شدند و در صورت مشاهده داده مشکوک (که در مورد ایستگاه سرارود مشاهده شد)، آن داده حذف شد. به‌منظور شناسایی داده‌های فرین غیر قابل قبول، سری زمانی داده‌های سرعت و جهت باد و کمترین و بیشترین مقادیر در هر سری زمانی بررسی شد. چنان‌چه داده‌هایی با مقادیر سرعت بالا در زمان‌های دیده‌بانی قبل و بعد خود و همچنین در ایستگاه‌های مجاور با مقادیر سرعت خیلی پایین همراه می‌بود، آن مشاهده نیز به‌عنوان داده مشکوک در نظر گرفته می‌شد (پترسون^۱، ۲۰۱۳)؛ همچنین در صورت ثبت مشاهده در ساعات صفر، ۱۸ و ۲۱ در ایستگاه‌های سینوپتیک تکمیلی (که در مورد ایستگاه هرسین مشاهده شد)، از سری زمانی حذف شدند.

در نوشتار پیش رو برای آزمون همگنی سری‌های زمانی سرعت باد الگوریتم اصلاح‌شده، آزمون F بیشینه^۱ تعدیل‌شده^۱ یعنی الگوریتم PMFred به کار گرفته شد (ونگ، ۲۰۰۸). کد مربوط به آن را ونگ و فنگ^۲ (۲۰۱۳) تولید و توزیع کرده‌اند و همچنین برای اجرای این الگوریتم، از نرم‌افزار R i386 3.3.1 استفاده شد. براساس توصیه^۱ ونگ و فنگ (۲۰۱۳) این آزمون برای سری‌های ماهانه به کار رفت، چون این سری‌ها اختلالات کمتری دارند؛ بنابراین شناسایی نقاط تغییر و ناهمگنی در آن راحت‌تر و سریع‌تر صورت می‌گیرد. آزمون همگنی در این بررسی در سطح اطمینان ۹۹٪ انجام شد. براساس نتایج الگوریتم PMFred داده‌های سرعت باد در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، روانسر، سرارود و سرپل، ناهمگن تشخیص داده شدند (رفعتی، ۱۳۹۵). ناهمگنی موجود در سری زمانی داده‌های سرعت باد، با کاربرد ضریب تصحیح (حاصل تقسیم میانگین داده‌های سرعت باد در دوره^۱ پس از نقطه^۱ تغییر بر میانگین داده‌های سرعت باد در دوره^۱ پیش از نقطه^۱ تغییر) از بین رفت، به این ترتیب که ضریب به‌دست‌آمده برای تمامی داده‌های پیش از زمان نقطه^۱ تغییر اعمال شد (پترسون^۳ و همکاران، ۱۹۹۸).

از آنجاکه داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک تکمیلی فاقد اندازه‌گیری در طول شب (ساعت صفر، ۱۸ و ۲۱ به وقت جهانی) هستند، کاربرد مستقیم این داده‌ها به انحراف میانگین به سمت مقادیر بیشتر سرعت باد می‌انجامد؛ به این دلیل که در بیشتر مناطق حداقل میانگین چرخه^۱ دوره‌ای سرعت باد در شب رخ می‌دهد؛ بنابراین سعی شد میزان تأثیر نبود اندازه‌گیری شبانه برای ایستگاه‌های سینوپتیک تکمیلی با استفاده از برآورد این تأثیر در ایستگاهی با بیشترین ضریب همبستگی و دارای میانگین رژیم سرعت باد روزانه مشابه مشخص و ضرایب به‌دست‌آمده در نتایج حاصل از ایستگاه‌های سینوپتیک تکمیلی اعمال شود.

محاسبه پتانسیل باد در ارتفاع و شرایط محیطی مورد نظر

داده‌های باد می‌توانند به مجموعه داده‌های اطلس باد یا اقلیم باد عمومی تبدیل شوند. در مجموعه داده‌های اطلس باد اثرات مربوط به شرایط ویژه مکان از مشاهدات باد حذف می‌شود؛ بنابراین مجموعه داده‌های اطلس باد مستقل از مکان هستند. با کاربرد اطلس باد محاسبه شده می‌توان اقلیم باد را در هر نقطه و ارتفاع ویژه با اجرای محاسبات معکوس و با تعیین ویژگی‌های زمین در اطراف مکان مورد پیش‌بینی تخمین زد. در پژوهش حاضر برای محاسبه^۱ پتانسیل باد در شرایط مکانی مشخص (ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین و زبری سطح ۰/۳ متر) نرم‌افزار WASP به کار گرفته شد. این نرم‌افزار برای محاسبه^۱ اثرات توپوگرافی بر باد در مکانی مشخص به توصیف نظام‌مند ویژگی‌های محیطی نیاز دارد. برای موقعیتی مشخص، سه اثر عمده از توپوگرافی بر باد وجود دارد: اثرات زبری، اروگرافی (ارتفاعات) و موانع. اطلاعات مربوط به زبری سطح از نقشه^۱ کاربری زمین گرفته شده از سازمان جهاد کشاورزی استخراج شد. نقشه^۱ اروگرافی به کاررفته حاصل استخراج منحنی‌های میزان با فاصله‌های ده متر از مدل رقومی ارتفاع^۴ با رزولوشن سی متر اخذ شده از سایت SRTM NASA است. برای تولید نقشه^۱ موانع در اطراف هر ایستگاه سینوپتیک موقعیت دقیق هر ایستگاه در گوگل ارث^۵ مشخص و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای موقعیت و ویژگی موانع مؤثر در کاهش سرعت باد تعیین و اطلاعات آن وارد نرم‌افزار WASP شد (رفعتی و همکاران، ۱۳۹۷).

پارامترهای تعیین پتانسیل باد

پتانسیل انرژی بادی و ویژگی‌های آن می‌تواند با کاربرد آنالیز آماری مشاهدات بلندمدت هواشناسی ارزیابی شود.

1- Penalized maximal F

2- Wang & Feng

3- Peterson

4- Digital Elevation Model (DEM)

5- Google Earth

مهم‌ترین گام در تعیین پتانسیل توان باد یک مکان، تخمین تابع توزیع احتمال سرعت باد است. در میان توابع توزیع احتمال، تابع توزیع ویبول (رابطه ۱) به دلیل سادگی و دقت آن، بیشتر استفاده می‌شود (دباغیان و همکاران، ۲۰۱۶).

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad \text{رابطه ۱}$$

$p(U)$: احتمال سرعت باد برای سرعت U ; K : پارامتر شکل (بدون بعد); c : فاکتور مقیاس (m/s).
برای برآورد نیم‌رخ باد قانون لوگ ورتمن (رابطه ۲) به کار می‌رود (دباغیان و همکاران، ۲۰۱۶):

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad \text{رابطه ۲}$$

$U(z)$: سرعت باد در ارتفاع دلخواه؛ $U(z_r)$: سرعت باد مرجع در ارتفاع مرجع؛ z_0 : زبری سطح زمین.
محتمل‌ترین سرعت باد، فراوان‌ترین سرعت باد را در هر منطقه نشان می‌دهد و با رابطه ۳ به دست می‌آید (بودای و گوئری، ۲۰۱۵):

$$U_{mp} = c \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{1/k} \quad \text{رابطه ۳}$$

سرعت بادی که بیشینه انرژی در سال را تولید می‌کند و با رابطه ۴ به دست می‌آید (بودای و گوئری، ۲۰۱۵):

$$U_{me} = c \left(1 + \frac{2}{k}\right)^{1/k} \quad \text{رابطه ۴}$$

یکی از مفیدترین معیارها برای برآورد پتانسیل انرژی باد، چگالی توان باد است که مقدار انرژی موجود در یک مکان برای تولید الکتریسیته یک توربین بادی را نشان می‌دهد. براساس تابع توزیع احتمال ویبول چگالی تراکم باد به صورت رابطه ۵ بیان می‌شود (دباغیان و همکاران، ۲۰۱۶):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} U^3 p(U) dU = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad \text{رابطه ۵}$$

ρ : چگالی باد $225/1 \text{ kg/m}^3$ در شرایط استاندارد؛ به عبارت دیگر فشار جوی میانگین در سطح دریا و دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد؛ A : مساحت عمود بر بردار سرعت باد؛ U : سرعت باد؛ Γ : پارامتر گاما.
همچنین براساس داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی میانگین چگالی توان باد \bar{P}/A توسط رابطه ۶ تعیین می‌شود:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^N \frac{U_i^3}{N} \quad \text{رابطه ۶}$$

پتانسیل برای تولید انرژی بادی برای نقاطی با میانگین چگالی توان باد کمتر از ۱۰۰ وات بر متر مربع ضعیف، برای نقاطی با میانگین چگالی توان باد حدود ۴۰۰ وات بر متر مربع خوب و برای نقاطی با میانگین چگالی توان باد بیشتر از ۷۰۰ عالی است (فاضل‌پور و همکاران، ۲۰۱۵).

به‌طور ساده چگالی انرژی باد برای یک دوره زمانی مدت $N\Delta t$ با رابطه ۷ برآورد می‌شود:

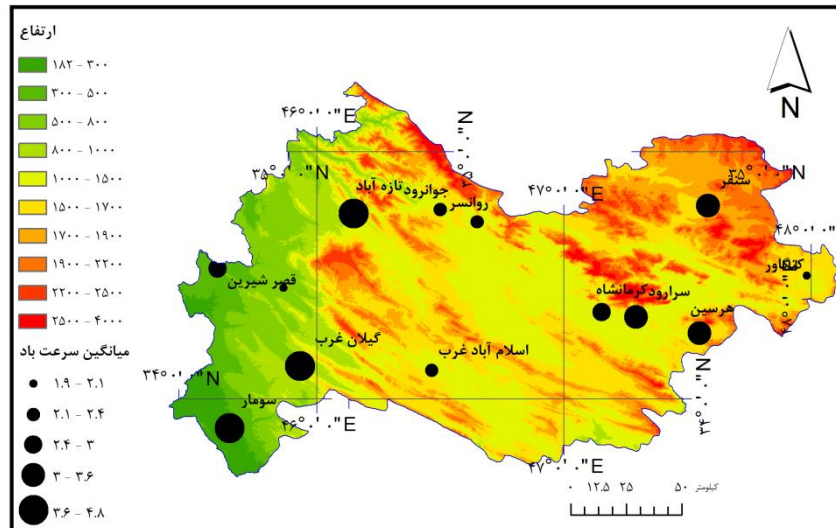
$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho \Delta t \sum_{i=1}^N U_i^3 = \left(\frac{\bar{P}}{A} \right) (N \Delta t)$$

رابطه ۷

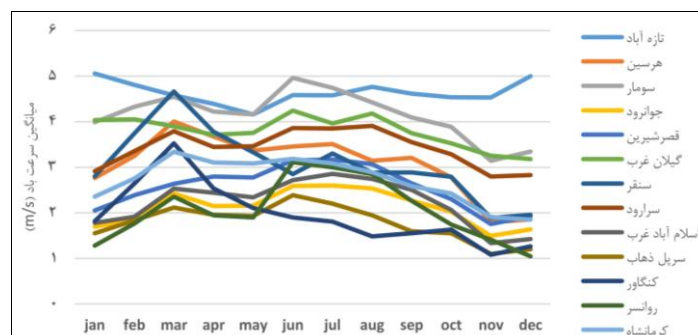
N: تعداد دوره‌های اندازه‌گیری Δt

نتایج

مقایسه میانگین سرعت باد ایستگاه‌های منطقه با توجه به موقعیت مکانی آن‌ها نشان می‌دهد که میانگین سرعت باد نظم مکانی مشخصی ندارد. به این صورت که گاه ایستگاه‌هایی با فواصل کم، تفاوت‌های زیادی در مقدار میانگین سرعت باد دارند (شکل ۲). به‌طور کلی در تمامی ایستگاه‌های منطقه به‌استثنای ایستگاه تازه‌آباد، میانگین سرعت باد در ماه‌های گرم‌تر سال بیشتر از ماه‌های سردتر سال بوده است (شکل ۳)؛ البته این بدان معنی نیست که در تمامی ایستگاه‌ها مقدار بیشینه میانگین سرعت ماهانه در گرم‌ترین ماه سال و کمینه آن در سردترین ماه سال رخ داده است؛ بلکه بدین منظور است که میانگین سرعت باد در ماه‌های گرم نسبت به ماه‌های سرد بیشتر بوده است. هرچند این روند در مورد ایستگاه تازه‌آباد مصداق ندارد. در این ایستگاه تغییرات ماهانه میانگین سرعت باد کم بوده و بیشینه آن در ماه ژانویه (۵/۶ m/s) و کمینه آن در ماه می (۴/۱۶ m/s) رخ داده است. بیشینه میانگین ماهانه سرعت باد در ایستگاه‌های کرمانشاه، کنگاور، هرسین و سنقر در ماه مارس و در دیگر ایستگاه‌ها در ماه‌های جون تا آگوست گزارش شده است. کمینه میانگین ماهانه سرعت باد نیز در تمام ایستگاه‌های منطقه به‌استثنای ایستگاه تازه‌آباد، در ماه‌های نوامبر، دسامبر یا ژانویه رخ داده است.



شکل ۲. مقایسه میانگین سرعت باد در ایستگاه‌های منطقه

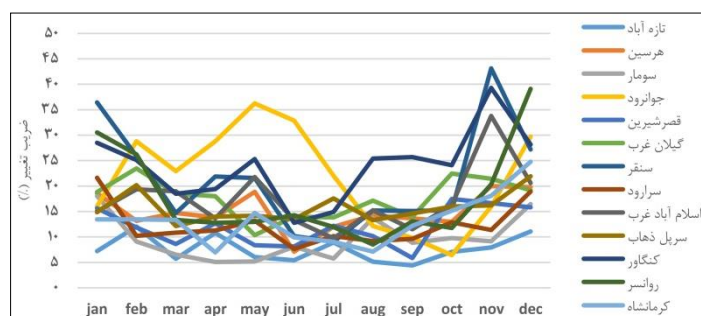


شکل ۳. مقایسه میانگین ماهانه سرعت باد (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳) در ایستگاه‌های منطقه

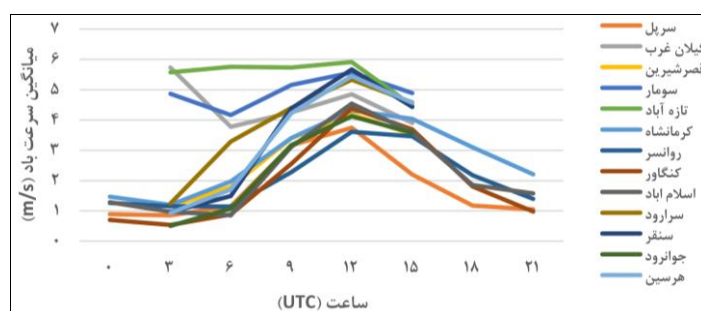
در تمامی ایستگاه‌ها ضریب تغییرات میانگین ماهانه سرعت باد در ماه‌های نوامبر، دسامبر، ژانویه یا فوریه بیشترین مقدار را داشته و ضریب تغییرات در ماه‌های گرم‌تر فصل بهار و تابستان کمتر بوده است، به‌استثنای ایستگاه جوانرود که ضریب تغییرات در ماه‌های می و جون افزون بر ماه دسامبر مقدار بالایی داشته است (شکل ۴)؛ همچنین به‌طور کلی بیشترین نوسانات میانگین ماهانه سرعت باد در ایستگاه‌های جوانرود، کنگاور و سنقر (در برخی ماه‌ها در حدود ۴۰٪) و کمترین مقدار آن در ایستگاه‌های تازه‌آباد، سومار، سرارود و قصرشیرین مشاهده شده است.

بررسی میانگین شرایط رژیم روزانه سرعت باد نشان می‌دهد (شکل ۵) که در ایستگاه‌های سینوپتیک که اندازه‌گیری‌های شبانه دارند، سرعت باد به‌طور میانگین از رژیم گرمایش روزانه پیروی می‌کند، به این ترتیب که کمینه سرعت باد به‌طور میانگین اغلب پیش طلوع آفتاب (ساعت ۳ به‌وقت جهانی و ۶:۳۰ به‌وقت محلی) رخ می‌دهد و به‌طور کلی در ساعت‌های دیدبانی صفر، ۳، ۶، ۲۱ به‌وقت جهانی (به‌ترتیب ۳:۳۰، ۶:۳۰، ۹:۳۰ و ۰:۳۰ به وقت محلی) میانگین سرعت باد کمتر است؛ اما شرایط در سه ایستگاه گیلان غرب، سومار و تازه‌آباد تا حدود زیادی متفاوت بوده است. به این صورت که در این سه ایستگاه، در ساعت ۳ به‌وقت جهانی، میانگین سرعت باد بالا بوده به‌طوری که در ایستگاه گیلان غرب در تمام ماه‌ها و در ایستگاه سومار در ماه نوامبر، بیشینه میانگین سرعت باد در این ساعت (۶:۳۰ محلی) گزارش شده است. در دو ایستگاه سومار و تازه‌آباد بیشینه سرعت در بیشتر ماه‌ها در ساعت ۱۲ به‌وقت جهانی و گاه حتی در ساعت ۶ به‌وقت جهانی (در فصل زمستان و پاییز در ایستگاه تازه‌آباد) ثبت شده است. از آنجا که در این زمان دیدبانی به‌طور عمده جهت بادها از سمت ارتفاعات منطقه (شمال شرق، شرقی یا جنوب شرقی) بوده است؛ بنابراین احتمالاً تکوین نسیم کوه که پیش از طلوع آفتاب به بیشینه شدت خود می‌رسد، باعث افزایش فراوانی رخداد و افزایش میانگین سرعت باد شده است.

نکته جالب دیگر در مورد دو ایستگاه تازه‌آباد و سومار این است که دامنه نوسان رژیم روزانه میانگین سرعت باد به‌طور کلی در این دو ایستگاه کم بوده است؛ همچنین در ایستگاه تازه‌آباد برخلاف ایستگاه‌های دیگر منطقه، این دامنه در فصل بهار و تابستان کمتر از فصل‌های پاییز و زمستان بوده است؛ به‌عبارت دیگر در فصل بهار و تابستان میانگین ساعتی سرعت باد طی تمام ساعت‌های دیدبانی بالا بوده است.

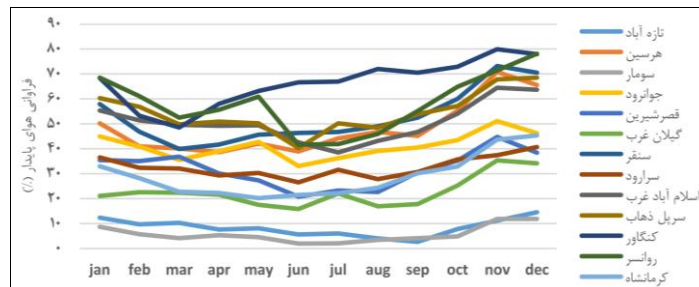


شکل ۴. مقایسه ضریب تغییرات میانگین ماهانه سرعت باد (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳) در ایستگاه‌های منطقه

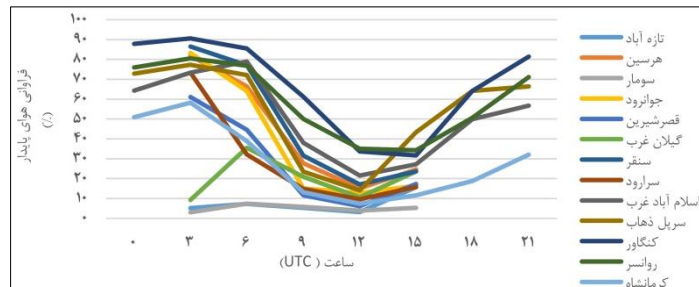


شکل ۵. مقایسه میانگین سرعت باد در زمان‌های دیدبانی در ایستگاه‌های منطقه (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳)

بررسی فراوانی عدم رخداد باد در منطقه مورد مطالعه نشان داد (شکل ۶) به‌طور کلی در تمامی ایستگاه‌ها ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه بیشترین و مارس تا سپتامبر کمترین فراوانی رخداد شرایط هوای پایدار را داشته‌اند. درمیان زمان‌های دیدبانی نیز در بیشتر ایستگاه‌ها کمترین فراوانی رخداد شرایط هوای پایدار مربوط به ساعت ۱۲ و گاهی ۱۵ به‌وقت جهانی (۱۵:۳۰ و ۱۸:۳۰ به‌وقت محلی) و بیشترین آن مربوط به ساعت صفر، ۳، ۶ و ۲۱ به‌وقت جهانی (به‌ترتیب ۳:۳۰، ۶:۳۰، ۹:۳۰ و ۰:۳۰ به‌وقت محلی) بوده است (شکل ۷). در ایستگاه‌های گیلان‌غرب، سومار و تازه‌آباد شرایط با دیگر ایستگاه‌های منطقه متفاوت بوده، به این صورت که در ساعت ۳ به‌وقت جهانی (۰۶:۳۰ به‌وقت محلی) فراوانی رخداد هوای پایدار یا کمترین مقدار را داشته (ایستگاه گیلان‌غرب و سومار) یا با کمی تفاوت پس از ساعت ۱۲ به‌وقت جهانی، کمترین مقدار را داشته است (ایستگاه تازه‌آباد)؛ به‌طور کلی در بین ایستگاه‌های منطقه، کنگاور و روانسر بیشترین درصد فراوانی و سومار و تازه‌آباد کمترین درصد فراوانی هوای پایدار را داشته‌اند (جدول ۱).



شکل ۶. مقایسه فراوانی رخداد ماهانه هوای پایدار (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳) در ایستگاه‌های منطقه



شکل ۷. مقایسه فراوانی رخداد هوای پایدار در زمان‌های دیدبانی در ایستگاه‌های منطقه (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳)

جدول ۱. کمینه و بیشینه میانگین سالانه و ماهانه سرعت باد و فراوانی رخداد هوای پایدار در ایستگاه‌های مورد بررسی (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳)

ایستگاه	کمینه میانگین سالانه سرعت باد (m/s)	بیشینه میانگین سالانه سرعت باد (m/s)	کمینه میانگین ماهانه سرعت باد (m/s)	کمینه میانگین ماهانه سرعت باد (m/s)	فراوانی رخداد هوای پایدار (%)
کرمانشاه	۲/۵۱	۲/۹۶	۱/۸۵	۳/۳۴	۲۹
روانسر	۱/۸۹	۲/۲۵	۱/۰۵	۳/۱۱	۶۰
اسلام‌آباد	۲/۰۴	۲/۳۸	۱/۳۳	۲/۸۵	۵۲
کنگاور	۱/۸۰	۲/۰۸	۱/۰۸	۳/۵	۶۷
سرپل‌ذهاب	۱/۶۰	۱/۸۷	۱/۱	۲/۴	۵۴
هرسین	۲/۸۵	۳/۳۵	۱/۸۰	۴	۴۸
قصرشیرین	۲/۴۷	۲/۷۶	۱/۷۶	۳/۱۷	۳۱
سنقر	۲/۹۶	۳/۳۶	۱/۸۹	۴/۶۶	۵۳
جوانرود	۲/۰۵	۲/۲۵	۱/۴۹	۲/۵۹	۴۱
سرارود	۳/۲۸	۳/۶۵	۲/۸۰	۳/۹۱	۳۳
گیلان‌غرب	۳/۲۳	۴/۲۷	۳/۱۸	۴/۱۸	۲۳
سومار	۴/۰۱	۴/۴۶	۳/۱۴	۴/۹۶	۶
تازه‌آباد	۴/۵۳	۴/۸۴	۴/۱۶	۵/۰۶	۸

ارزیابی گلباد ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که کمابیش در تمامی ایستگاه‌ها، بادهای غربی به‌لحاظ فراوانی در رتبهٔ اول (ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرارود، هرسین، قصرشیرین و جوانرود) یا دوم (روانسر، کنگاور، سرپل‌ذهاب، سنقر، گیلان‌غرب و تازه‌آباد) بادهای منطقه بوده‌اند. تنها در ایستگاه سومار باد غربی پس از بادهای شمال شرقی و شمال غربی به‌لحاظ فراوانی در رتبهٔ سوم بوده است. در ایستگاه‌های کنگاور و سنقر باد جنوب غربی، در ایستگاه‌های روانسر و سومار باد شمال غربی، در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب و تازه‌آباد باد جنوب شرقی و در ایستگاه گیلان‌غرب باد شرقی، باد غالب بوده است (جدول ۲).

در ایستگاه‌های کرمانشاه و کنگاور، بیشینهٔ میانگین سرعت باد در جهت جنوب غربی و کمینهٔ آن در جهت شمال شرقی گزارش شده است. در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب، اسلام‌آباد غرب، هرسین، سنقر و قصرشیرین بیشینه در جهت جنوبی و کمینه در جهت شمالی، شمال شرقی یا شمال غربی مشاهده شده است. عکس آن در ایستگاه روانسر رخ داده؛ یعنی بادهای شمال شرقی بیشترین و بادهای جنوبی کمترین میانگین سرعت را داشته‌اند. در ایستگاه‌های سرارود و گیلان‌غرب جهت شرقی بیشترین میانگین سرعت باد را داشته است. جهت کمینهٔ میانگین سرعت در ایستگاه سرارود جنوب شرقی و جنوبی و در ایستگاه گیلان‌غرب جنوب غربی و غربی بوده است. در ایستگاه جوانرود بیشینه در جهت غربی و کمینهٔ میانگین سرعت باد در جهت‌های شمالی، جنوب شرقی و جنوبی ثبت شده است. جهت بیشینهٔ میانگین سرعت باد در ایستگاه سومار و تازه‌آباد جنوب شرقی و جهت کمینهٔ آن به‌ترتیب جنوب غربی و شمالی بوده است (جدول ۲).

برای ایجاد امکان مقایسهٔ صدک‌های پنجاهم، هفتادوپنجم و نودم داده‌های سرعت باد در ایستگاه‌های مختلف برای تمام ایستگاه‌ها مقدار این صدک‌ها براساس داده‌های ساعات دیدبانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ محاسبه شد؛ به‌عبارت دیگر، داده‌های شبانه از ایستگاه‌های سینوپتیک حذف و نتایج حاصل مقایسه شدند.

ایستگاه‌ها به‌ترتیب مقدار صدک پنجاهم عبارت‌اند از: روانسر ($m/s0$)، کنگاور ($m/s0$)، سرپل‌ذهاب ($m/s2$)، جوانرود ($m/s3/2$)، کرمانشاه ($m/s5/2$)، اسلام‌آباد غرب ($m/s5/2$)، قصرشیرین ($m/s5/2$)، سنقر ($m/s7/2$)، هرسین ($m/s2/3$)، سرارود ($m/s5/3$)، سومار ($m/s5/4$)، گیلان‌غرب ($m/s5$)، تازه‌آباد ($m/s5$).

جدول ۲. جهت باد غالب و جهت بیشینه و کمینهٔ میانگین سرعت باد در ایستگاه‌های مورد بررسی

ایستگاه	جهت باد غالب اول	جهت باد غالب دوم	جهت بیشینهٔ میانگین سرعت باد	جهت کمینهٔ میانگین سرعت باد
کرمانشاه	غربی	جنوب شرقی و شمال غربی	جنوب غربی	شمال شرقی
روانسر	شمال غربی	غربی	شمال شرقی	جنوبی
اسلام‌آباد غرب	غربی	شمال غربی	جنوبی	شمالی
کنگاور	جنوب غربی	غربی	جنوب غربی	شمال شرقی
سرپل‌ذهاب	جنوب شرقی	غربی	جنوبی	شمال شرقی
هرسین	غربی	جنوب غربی	جنوبی	شمال غربی
قصرشیرین	غربی	شمالی	جنوبی	شمالی
سنقر	جنوب غربی	غربی	جنوبی	شمالی و شمال غربی
جوانرود	غربی	جنوب شرقی	غربی	شمالی، جنوب شرقی و جنوبی
سرارود	غربی	شرقی	شرقی	جنوب شرقی و جنوبی
گیلان‌غرب	شرقی	غربی	شرقی	جنوب غربی و غربی
سومار	شمال غربی	شمال شرقی	جنوب شرقی	جنوب غربی
تازه‌آباد	جنوب شرقی	غربی	جنوب شرقی	شمالی

ایستگاه‌ها به ترتیب مقدار صدک هفتادوپنجم عبارت‌اند از: سرپل‌ذهاب ($m/s7/3$)، قصرشیرین ($m/s4$)، جوانرود ($m/s4$)، کرمانشاه ($m/s5/4$)، اسلام‌آباد غرب ($m/s5/4$)، روانسر ($m/s8/4$)، کنگاور ($m/s8/4$)، هرسین ($m/s5/5$)، گیلان‌غرب ($m/s6$)، سنقر ($m/s2/6$)، سومار ($m/s5/6$)، سرارود ($m/s8/6$)، تازه‌آباد ($m/s7$).

ایستگاه‌ها به ترتیب مقدار صدک نودم عبارت‌اند از: سرپل‌ذهاب ($m/s4/5$)، قصرشیرین ($m/s8/5$)، جوانرود ($m/s6$)، کرمانشاه ($m/s3/6$)، اسلام‌آباد غرب ($m/s6/6$)، روانسر ($m/s7$)، کنگاور ($m/s5/7$)، گیلان‌غرب ($m/s8/7$)، هرسین ($m/s8$)، سرارود ($m/s8$)، سومار ($m/s2/8$)، سنقر ($m/s5/8$)، تازه‌آباد ($m/s5/8$).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ترتیب ایستگاه‌ها براساس مقدار این صدک‌ها با یکدیگر و همچنین با نتایج حاصل از میانگین داده‌های سرعت باد ایستگاه‌ها متفاوت است. ترتیب ایستگاه‌ها از نظر مقدار میانگین و صدک پنجاهم (میان) بیشترین شباهت را به هم دارند و همچنین صدک هفتادوپنجم و نودم نیز شباهت زیادی به یکدیگر دارند (جدول ۳). مقایسه صدک‌های پنجاهم، هفتادوپنجم و نودم داده‌های سرعت باد در ایستگاه‌های مختلف نشان‌دهنده توزیع متفاوت داده‌های سرعت باد در ایستگاه‌های مورد بررسی است.

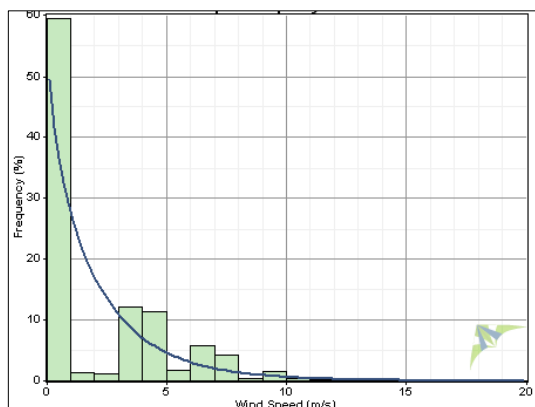
بررسی توزیع فراوانی سرعت باد نشان می‌دهد، فراوان‌ترین بادها در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب (0.14)، کرمانشاه، قصرشیرین و جوانرود (0.21)، سرعتی در حدود $m/s2$ ، در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب (0.15) و سرارود (0.17)، سرعتی در حدود $m/s3$ ، در ایستگاه‌های کنگاور (0.7)، روانسر (0.12) و سومار (0.17)، سرعتی در حدود $m/s3$ و 4 ، در ایستگاه‌های سنقر (0.9)، و هرسین (0.12)، سرعتی در حدود $m/s4$ و 5 ، و در ایستگاه‌های گیلان‌غرب (0.19) و تازه‌آباد (0.22)، سرعتی در حدود $m/s5$ داشته‌اند (شکل ۸).

برازش مدل توزیع ویبول به هیستوگرام داده‌های سرعت باد در ایستگاه‌های روانسر و کنگاور به دلیل رخداد بسیار زیاد شرایط هوای پایدار نتایج ضعیفی داشته و در ایستگاه‌های سومار، گیلان‌غرب و تازه‌آباد که رخداد شرایط هوای پایدار در آن‌ها کم بوده، نتایج بسیار خوبی داشته است (شکل ۸).

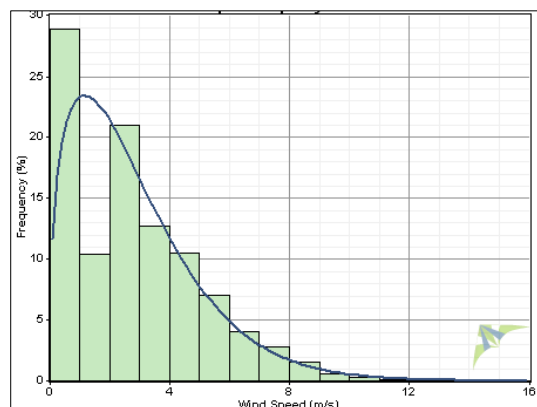
ویژگی‌های باد برآوردشده شامل میانگین سرعت باد، پارامترهای توزیع ویبول، میانگین چگالی توان باد، محتمل‌ترین سرعت باد و سرعت باد بیشینه تولید انرژی در ارتفاع 40 متری از سطح زمین برای زبری سطح کلاس یک ($z_0=0.3$)، در محدوده ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۴ مقایسه شده است.

جدول ۳. صدک‌های پنجاهم، هفتادوپنجم و نودم سرعت باد در ایستگاه‌های مورد بررسی

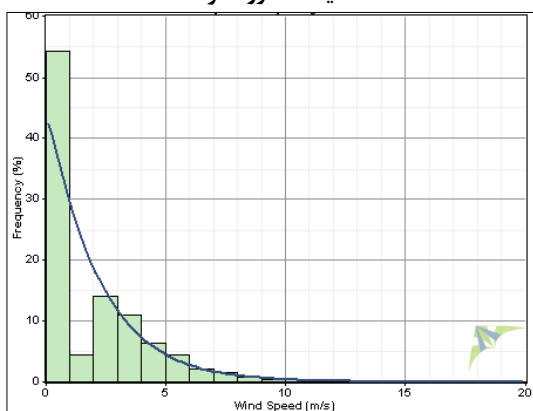
ایستگاه	صدک پنجاهم (m/s)	صدک هفتادوپنجم (m/s)	صدک نودم (m/s)
کرمانشاه	۲/۵	۴/۵	۶/۳
روانسر	۰	۴/۸	۷
اسلام‌آباد غرب	۲/۵	۴/۵	۶/۶
کنگاور	۰	۴/۸	۷/۵
سرپل‌ذهاب	۲	۳/۷	۵/۴
هرسین	۳/۲	۵/۵	۸
قصرشیرین	۲/۵	۴	۵/۸
سنقر	۲/۷	۶/۲	۸/۵
جوانرود	۲/۳	۴	۶
سرارود	۳/۵	۶/۸	۸
گیلان‌غرب	۵	۶	۷/۸
سومار	۴/۵	۶/۵	۸/۲
تازه‌آباد	۵	۷	۸/۵



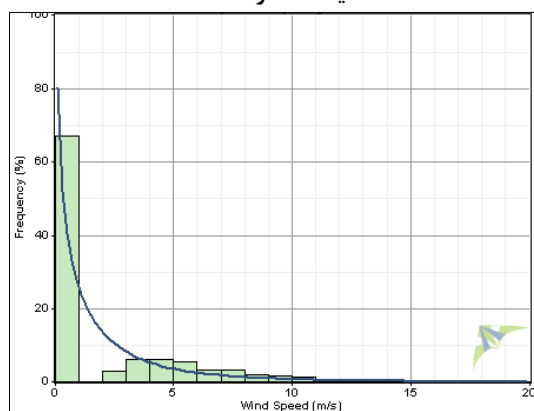
ایستگاه روانسر



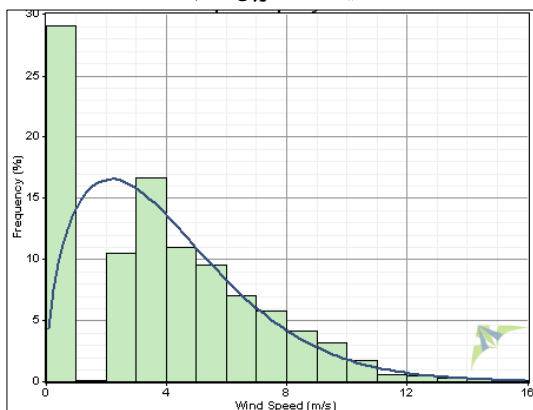
ایستگاه کرمانشاه



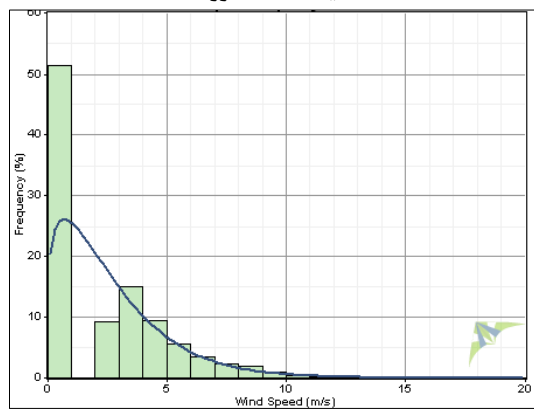
ایستگاه سرپل ذهاب



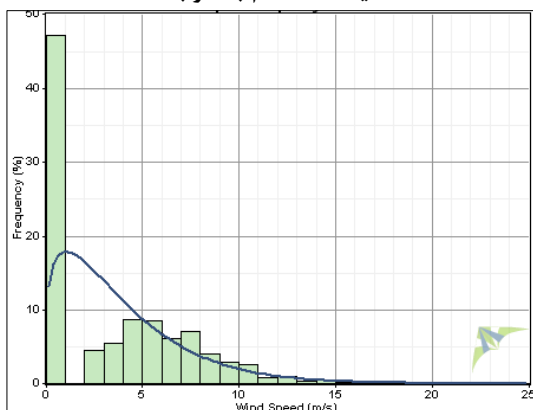
ایستگاه کنگاور



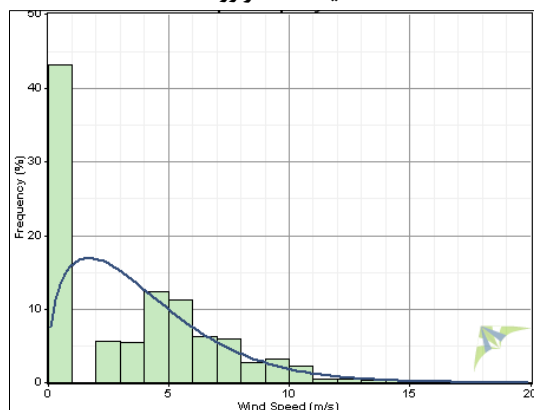
ایستگاه اسلام آباد غرب



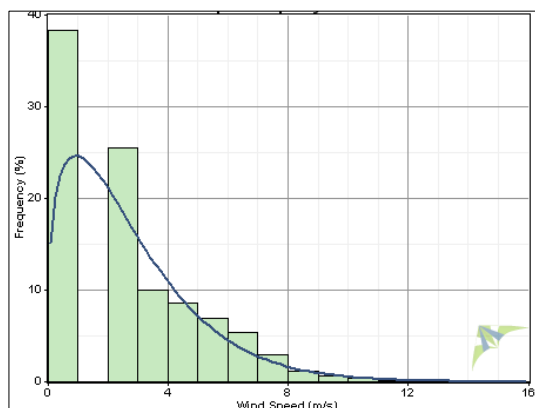
ایستگاه سرارود



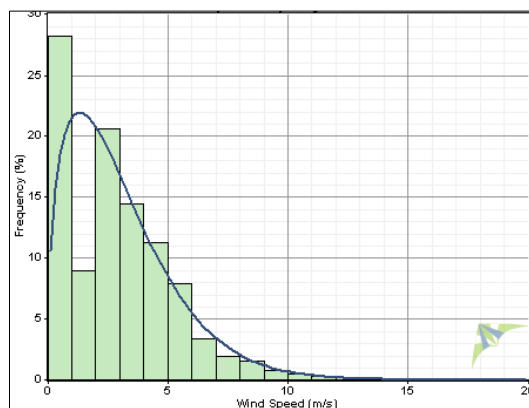
ایستگاه سنقر



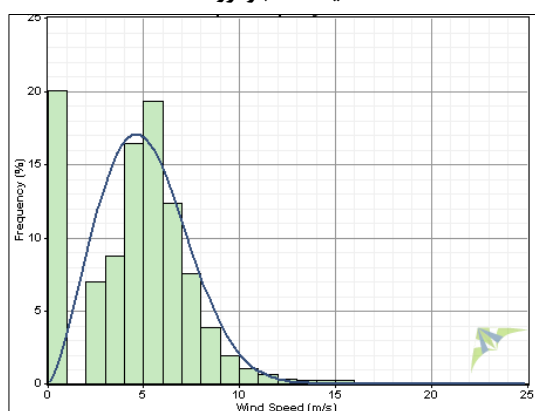
ایستگاه هرسین



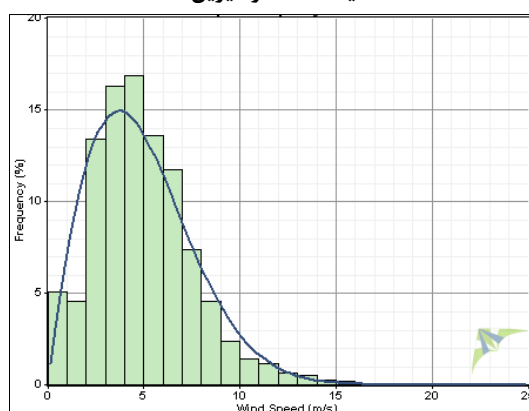
ایستگاه جوانرود



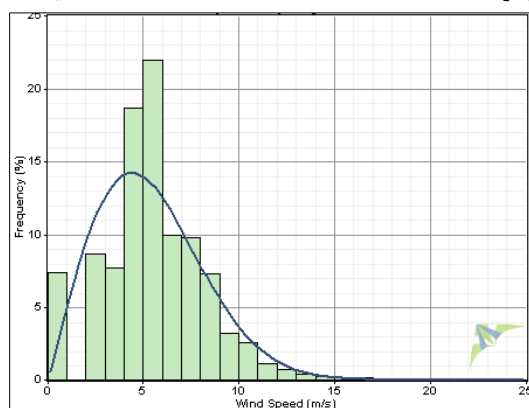
ایستگاه قصرشیرین



ایستگاه گیلان غرب



ایستگاه سومار



ایستگاه تازهآباد

شکل ۸. مقایسه توزیع فراوانی داده‌های سرعت باد و تابع ویبول برازش داده‌شده به آن در ایستگاه‌های منطقه (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین سرعت باد به ترتیب در ایستگاه‌های گیلان غرب و تازه‌آباد بیشترین و در ایستگاه‌های کنگاور و سرپل ذهاب کمترین مقدار را دارد؛ همچنین با توجه به پارامتر k ویبول مشخص است که رژیم بادی در ایستگاه‌های تازه‌آباد، سومار و گیلان غرب یکنواخت‌تر و در ایستگاه‌های کنگاور و روانسر نامنظم‌تر از دیگر ایستگاه‌ها است. میانگین چگالی توان باد (وات بر متر مربع) ایستگاه‌ها به ترتیب برابرند با: روانسر (۶۲۵)، گیلان غرب (۴۳۴)، سرارود (۴۱۱)، اسلام‌آباد غرب (۴۰۴)، تازه‌آباد (۳۶۳)، سنقر (۳۴۳)، سومار (۳۰۹)، کرمانشاه (۲۲۲)، هرسین (۲۱۰)، سرپل ذهاب (۱۶۶)، کنگاور (۱۶۵)، قصرشیرین (۱۵۵) و جوانرود (۱۴۵)؛ بنابراین همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روانسر با وجود میانگین سرعت باد کمتر نسبت به ایستگاه‌های گیلان غرب و

تازه‌آباد، میانگین چگالی توان بالایی دارد که به دلیل رخداد بیشتر بادهایی با سرعت بالاست که انرژی زیادی تولید می‌کنند؛ اما با توجه به رژیم بسیار نامنظم باد و عدم یکنواختی وزش باد در طول سال از یک‌سو و ثابت‌شدن یا حتی کاهش میزان تولید انرژی از سرعت باد مشخصی به بالا برای هر توربین (کمینه سرعت باد بیشینه تولید انرژی)، این میانگین چگالی توان باد به تولید انرژی بیشتر در طول سال منجر نمی‌شود. این مسئله در مورد ایستگاه اسلام‌آباد نیز تا اندازه‌ای مصداق دارد.

در ایستگاه‌های روانسر و کنگاور نبود وزش باد، محتمل‌ترین پیشامد است، همچنین در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب و اسلام‌آباد غرب نیز محتمل‌ترین سرعت باد بسیار پایین و کمتر از یک متر بر ثانیه است؛ در حالی که محتمل‌ترین سرعت باد در ایستگاه‌های تازه‌آباد (m/s72/5)، گیلان غرب (m/s61/5) و سومار (m/s91/4) به ترتیب بالاترین مقادیر را دارند. سرعت بیشینه تولید انرژی به عبارت دیگر سرعت بادی که بیشینه انرژی در سال را تولید می‌کند، در ایستگاه‌هایی که میانگین سرعت باد بیشتر و یکنواختی وزش باد کمتری دارند، بالاتر است. به این ترتیب سرعت باد بیشینه تولید انرژی در ایستگاه‌های روانسر، اسلام‌آباد، سنقر، سرارود، کنگاور، گیلان غرب، تازه‌آباد، سرپل‌ذهاب، هرسین، کرمانشاه، سومار، جوانرود و قصرشیرین به ترتیب کاهش یافته و مقدار آن از ۱۴/۵۷ متر بر ثانیه در ایستگاه روانسر تا ۹/۱۱ متر بر ثانیه در ایستگاه قصرشیرین متغیر است (جدول ۴).

بحث

بررسی نتایج نشان داد که به طور کلی در بیشتر ایستگاه‌های منطقه میانگین سرعت باد در ماه‌های گرم نسبت به ماه‌های سرد بیشتر بوده است؛ همچنین در بیشتر ایستگاه‌ها ضریب تغییرات میانگین ماهانه سرعت باد در ماه‌های نوامبر، دسامبر، ژانویه یا فوریه بیشترین مقدار را داشته است و ضریب تغییرات در ماه‌های گرم‌تر فصل بهار و تابستان کمتر بوده است؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که با افزایش ارتفاع خورشید شرایط به طور یکنواخت‌تری برای ایجاد ناپایداری و وزش باد در منطقه فراهم بوده است. به همین دلیل طبق مطالعه گندم‌کار (۱۳۸۸) در فصل تابستان در بسیاری از نواحی کشور توان تولید برق با استفاده از نیروی باد وجود دارد؛ البته براساس نتایج برخی مطالعات این ویژگی به‌بایست قابل تعمیم به تمامی مناطق نیست (همانند ایستگاه تازه‌آباد در پژوهش حاضر)؛ به عبارت دیگر، لزوماً بیشینه سرعت و پتانسیل باد مربوط به ماه‌های فصل تابستان نیست (کیهانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ فاضل‌پور و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین در مورد میزان پراکندگی داده‌های سرعت باد نیز لزوماً ایستگاه‌های مجاور شرایط مشابهی را نشان نمی‌دهند.

جدول ۴. پارامترهای تعیین‌کننده پتانسیل باد در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین و برای زبری $m 0.3$

ایستگاه	میانگین سرعت باد	پارامتر c ویبول	پارامتر k ویبول	میانگین چگالی توان باد	محتمل‌ترین سرعت باد	سرعت باد بیشینه تولید انرژی
کرمانشاه	۵/۴۱	۶	۱/۵۲	۲۲۲	۲/۹۶	۱۰/۴۳
روانسر	۵/۰۳	۴/۶	۰/۸۵	۶۲۵	۰	۱۹/۰۹
اسلام‌آباد غرب	۵/۴۱	۵/۶	۱/۰۹	۴۰۴	۰/۵۷	۱۴/۵۷
کنگاور	۳/۳۶	۳/۲	۰/۸۸	۱۶۵	۰	۱۲/۳۱
سرپل‌ذهاب	۳/۹۲	۴/۱	۱/۰۹	۱۶۶	۰/۴۲	۱۰/۶۶
هرسین	۵/۰۴	۵/۶۱	۱/۴۰	۲۱۰	۲/۲۸	۱۰/۶۱
قصرشیرین	۴/۴۹	۵/۰۶	۱/۴۷	۱۵۵	۲/۳۱	۹/۱۱
سنقر	۵/۴۷	۵/۸۹	۱/۲۱	۳۴۳	۱/۳۷	۱۳/۲۲
جوانرود	۴/۲۶	۴/۵۹	۱/۲۷	۱۴۵	۱/۳۷	۹/۶۳
سرارود	۶/۴۶	۷/۲۷	۱/۴۹	۴۱۱	۳/۴۲	۱۲/۹۱
گیلان غرب	۷/۲۱	۸/۰۵	۱/۹۷	۴۳۴	۵/۶۱	۱۱/۵۱
سومار	۶/۳۴	۷/۰۶	۱/۹۷	۳۰۹	۴/۹۱	۱۰/۰۸
تازه‌آباد	۷/۰۱	۷/۸۰	۲/۰۹	۳۶۳	۵/۷۲	۱۰/۷۵

بررسی نتایج میانگین شرایط رژیم روزانه سرعت باد نشان داد که میانگین ساعتی سرعت باد از رژیم گرمایش روزانه پیروی می‌کند، به این ترتیب که پس از طلوع آفتاب با گرم شدن سطح زمین و گسترش لایه مرزی و شروع انتقال همرفتی، به دلیل تفاوت‌های محلی ناشی از ارتفاع، شیب، جهت جغرافیایی، نوع پوشش سطح زمین، میزان ناپایداری افزایش یافته و به‌طور میانگین بر میزان سرعت باد افزوده شده، به‌طوری که بیشینه سرعت باد در بیشتر ماه‌های سال در بعدازظهر (۱۲ به‌وقت جهانی و ۱۵:۳۰ به‌وقت محلی) رخ می‌دهد. بیشینه میانگین سرعت باد در فصل تابستان در بیشتر ایستگاه‌های منطقه در ساعت ۱۵ به‌وقت جهانی (۱۸:۳۰ به‌وقت محلی) مشاهده شده است؛ بنابراین در ماه‌های گرم سال زمان رخداد بیشینه سرعت باد به‌طور میانگین نسبت به ماه‌های سرد سال به‌تعویق می‌افتد؛ همچنین به‌طور میانگین دامنه نوسان روزانه سرعت باد در ماه‌های گرم‌تر سال بیشتر از ماه‌های سردتر است. مقدار میانگین بیشینه سرعت باد نیز در ماه‌های گرم‌تر سال نسبت به ماه‌های سردتر بیشتر است و به‌طور میانگین، دامنه نوسان روزانه سرعت باد در ماه‌های گرم‌تر سال بیشتر از ماه‌های سردتر سال است. هرچند این نتیجه در همه ایستگاه‌ها مصداق ندارد. در برخی ایستگاه‌های منطقه میانگین سرعت باد تنها تحت تأثیر رژیم گرمایش روزانه نبوده و به‌نظر می‌رسد با توجه به جهت وزش بادها از سمت ارتفاعات منطقه، بیشتر تحت تأثیر شکل زمین باشد.

به‌طور کلی برازش مدل توزیع ویبول به داده‌های سرعت باد نشان داد که تابع ویبول در سرعت‌های بالاتر (به‌طور عمده بیشتر از دو متر بر ثانیه) تطابق بسیار خوبی را با داده‌های ثبت‌شده نشان می‌دهد. عدم برازش مناسب این مدل توزیع در سرعت‌های کمتر نیز بیشتر از آنکه به‌دلیل نامناسب بودن الگوریتم برازش باشد، ناشی از پایین بودن دقت ابزار اندازه‌گیری داده‌های سرعت باد است؛ به‌عبارت دیگر، میزان فراوانی سرعت داده‌های پایین (یک تا دو متر بر ثانیه) به‌طور غیر عادی در سری داده‌ها کم و میزان فراوانی داده‌های با سرعت صفر (عدم رخداد) بسیار زیاد است.

این مشکل را جمیل^۱ و همکاران (۱۹۹۵) و دیوس و لاینز^۲ (۱۹۹۷) نیز مطرح کردند. آن‌ها فواید تابع احتمال ویبول را برای ارزیابی چگالی انرژی باد تأیید نمودند. با این وجود بیان کردند که این توزیع‌ها با داده‌های واقعی باد با سرعت پایین در رکوردهای کوتاه‌مدت برازش خوبی ندارند؛ بنابراین می‌توان تصور کرد که ابزارهای مورد استفاده دقت لازم برای ثبت سرعت‌های پایین باد (تا حدود m/s) را نداشته‌اند؛ بنابراین چه‌بسا میانگین برآوردشده از تابع ویبول حاصل از این روش، دقت بالاتری نسبت به داده‌های ثبت‌شده داشته باشد.

مقایسه ویژگی‌های برآوردشده باد شامل میانگین سرعت باد، پارامترهای توزیع ویبول، میانگین چگالی توان باد، محتمل‌ترین سرعت باد و سرعت باد بیشینه تولید انرژی در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین برای زبری سطحی کلاس یک ($z_0=0.03$)، در محدوده ایستگاه‌های مورد بررسی نشان داد، میانگین سرعت باد به‌ترتیب در ایستگاه‌های گیلان غرب و تازه‌آباد بیشترین و در ایستگاه‌های کنگاور و سرپل ذهاب کمترین مقدار را دارد؛ همچنین با توجه به پارامتر k ویبول مشخص شد که رژیم بادی در ایستگاه‌های تازه‌آباد، سومار و گیلان غرب یکنواخت‌تر و در ایستگاه‌های کنگاور و روانسر نامنظم‌تر از دیگر ایستگاه‌ها است. باوجود میانگین سرعت باد کمتر در ایستگاه روانسر نسبت به ایستگاه‌های گیلان غرب و تازه‌آباد، این ایستگاه میانگین چگالی توان بالایی دارد که به‌دلیل رخداد بیشتر بادهایی با سرعت بالاست که انرژی زیادی تولید می‌کنند؛ اما با توجه به رژیم بسیار نامنظم باد و یکنواخت‌نبودن وزش باد در طول سال از یک‌سو و ثابت‌شدن یا حتی کاهش میزان تولید انرژی از سرعت باد مشخصی به بالا برای

1- Jamil

2- Deaves & Lines

هر توربین (کمینه سرعت باد بیشینه تولید انرژی) از دیگر سو، این میانگین چگالی توان باد به تولید انرژی بیشتر در طول سال منجر نمی‌شود. این مسئله در مورد ایستگاه اسلام‌آباد نیز تاحدودی مصداق دارد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر مشخص کرد که میانگین سرعت باد نظم مکانی مشخصی در منطقه مورد مطالعه ندارد، به این صورت که گاه ایستگاه‌هایی با فواصل کم، تفاوت‌های زیادی در مقدار میانگین سرعت باد دارند که ناشی از اهمیت تأثیر عوامل محلی و ریزمقیاس در تعیین مقدار سرعت باد و پیچیدگی‌های منطقه است؛ اما به‌طور کلی می‌توان گفت که نیمه غربی استان نسبت به نیمه شرقی آن پتانسیل بادخیزی بالاتری دارد؛ همچنین باوجودی که رژیم گرمایش روزانه در ویژگی‌های باد برخی نقاط منطقه مورد مطالعه عامل تأثیرگذاری است؛ اما این متغیر در برخی نقاط دیگر تنها تحت تأثیر رژیم گرمایش روزانه نیست و به‌نظر می‌رسد شکل زمین نیز عامل بسیار مؤثری در ویژگی‌ها و پتانسیل باد باشد؛ بنابراین ایستگاه‌های منطقه به‌لحاظ میانگین سرعت باد، فروانی هوای پایدار، دامنه نوسان سرعت باد، تفاوت‌های فصلی میانگین سرعت باد بسیار با یکدیگر متفاوت هستند. نقش شکل زمین و تکوین بادهای اروگرافیک نیز سهم متفاوتی در ویژگی‌های باد ایستگاه‌های منطقه داشته است که برای روشن‌تر شدن دلایل این تفاوت بررسی جزئیات توپوگرافی منطقه در ارتباط با محل ایستگاه لازم است. این نکته اهمیت مکان‌یابی و دقت آن را در نقاطی با پیچیدگی‌های توپوگرافی مثل منطقه مورد مطالعه برای تأسیس نیروگاه‌های بادی نشان می‌دهد؛ به‌طوری که در تعمیم ویژگی‌های باد یک نقطه به اطراف لازم است بسیار سنجیده عمل کرد و انتخاب قدرت تفکیک نامناسب می‌تواند خطای بزرگی در تخمین پتانسیل باد ایجاد سازد. نکته مهم دیگر این است که میانگین چگالی توان باد به‌تنهایی پارامتر گمراه‌کننده‌ای در تعیین پتانسیل باد است و لازم است به‌همراه پارامترهای مهم دیگری مثل یکنواختی وزش باد در طول سال در نظر گرفته شود.

سپاسگزاری

در پایان از حمایت مالی شرکت توزیع نیروی برق استان کرمانشاه در نوشتار پیش رو (در قالب طرح پژوهشی) تقدیر می‌شود.

منابع

- جعفری، حمیدرضا؛ عزیزی، علی؛ نصیری، حسین؛ عابدی، سپیده (۱۳۹۲). تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل با استفاده از مدل AHP و SAW در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۱۵ (۲)، ۲۳-۴۱.
- حقی‌فام، محمودرضا؛ سلطانی، سینا (۱۳۸۸). بررسی تأثیر نیروگاه‌های بادی بر قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت. هفتمین همایش ملی انرژی، تهران: کمیته ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران.
- رفعتی، سمیه (۱۳۹۵). بررسی کیفی و همگنی داده‌های سرعت و جهت باد (مطالعه مقدماتی جهت بررسی پتانسیل تولید انرژی بادی در استان کرمانشاه. اولین همایش ملی شهر سبز پایدار، شهرداری و شورای اسلامی شهر همدان.
- رفعتی، سمیه؛ کریمی، مصطفی؛ سام‌دلیری، احمد (۱۳۹۷). پتانسیل‌یابی انرژی باد و ارزیابی اقتصادی تأسیس نیروگاه بادی در استان کرمانشاه. طرح پژوهشی شرکت توزیع نیروی برق استان کرمانشاه.
- گندم‌کار، امیر (۱۳۸۸). ارزیابی پتانسیل باد در کشور ایران. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۰ (۴)، ۸۵-۱۰۰.
- نشریه سازمان انرژی نو ایران (پیام سانا) (۱۳۸۶). ۱ (۱)، ۵.
- نوراللهی، یونس؛ اشرف، محمدعلی؛ زمانی، محسن (۱۳۹۰). پتانسیل‌سنجی انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. نشریه انرژی ایران، ۱ (۴)، ۱-۲۲.

References

- Boudia, M. & Guerri, O. (2015). Investigation of wind power potential at Oran, northwest of Algeria. *Energy Conversion and Management*, 105, 81-92.
- Carta, J. A., Ramirez, P. & Velazquez, S. (2009). A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: case studies in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (5), 933-955.
- Dabbaghiyan, A., Fazelpour, F., Dehghan Abnavi, M. & Rosen, M. A. (2016). Evaluation of wind energy potential in province of Bushehr, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 455-466.
- Deaves, D. M. & Lines, I. G. (1997). On the fitting of low mean wind speed data to the Weibull distribution. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 66 (3), 169-178.
- Fazelpour, F., Mohammadi, K. & Mostafaeipour, A. (2013). Economic feasibility of developing wind turbines in Aligoodarz, Iran. *Energy Conversion and Management*, 76, 645-653.
- Fazelpour, F., Soltani N, Soltani S. & Rosen, M. A. (2015). Assessment of wind energy potential and economics in the north-western Iranian cities of Tabriz and, Ardabil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 88-99.
- Gandomkar, A. (2009). Wind Energy Potential Estimation in Iran, *Geography and Environmental planning*, 20 (4), 85-100 (In Persian).
- Haghifam, M. & Soltani, S. (2009). Investigating the effect of wind power plant on the reliability of power systems. *7th National Energy Conference, Tehran*, National Energy Committee of the Islamic Republic of Iran (In Persian).
- Hennessey, Jr. (1977). Some aspects of wind power statistics. *Journal of Applied Meteorology*, 16 (2), 119-128.
- Jafari, H. R., Azizi, A., Nasiri, H. & Abedi, S. (2014). Analysis of Land Suitability to Locate Wind Power Plant in Ardabil Province Using AHP and SAW Methods in GIS Environment. *Journal of Environmental Science and Technology*, 15 (2), 23-41 (In Persian).
- Jamil, M., Parsa, S. & Majidi, M. (1995). Wind power statistics and an evaluation of wind energy density. *Renewable Energy*, 6-5, 623-628.
- Journal of Renewable Energy Organization of Iran. (2007), 1 (1), 5.
- Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M. & Abbaszadeh, R. (2010). An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy*, 35 (1), 188-201.
- Mentis, M., Hermann, S., Howells, M., Welsch, M. & Siyal, S. H. (2015). Assessing the technical wind energy potential in Africa a GIS-based approach. *Renewable Energy*, 83, 110-125.
- Mohammadi, K. & Mostafaeipour, A. (2013). Using different methods for comprehensive study of wind turbine utilization in Zarrineh, Iran. *Energy Conversion and Management*, 65, 463-470.
- Mostafaeipour, A, Jadidi, M., Mohammadi, K. & Sedaghat, A. (2014). An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 641-650.
- Mostafaeipour, A, Sedaghat, A., Ghalishooyan, M., Dinpashoh, Y., Mirhosseini, M., Sefid, M. & et al. (2013). Evaluation of wind energy potential as a power generation source for electricity production in Binalood, Iran. *Renewable Energy*, 52, 222-229.
- Mostafaeipour, A. & Abarghoeei H. (2008). Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (6), 1758-1766.
- Mostafaeipour, A. (2010). Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1), 93-111.
- Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A. & Kalantar, V. (2011). Wind energy feasibility study for city of Shahr babak in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (6), 2545-2556.
- Norollahi, Y., Ashraf, M. A. & Zamani, M. (2011). West wind power energy potential assesment using Geographic Information System (GIS). *Iranian Journal of Energy*, 1 (4), 1-22 (In Persian).

- Noorollahi, Y., Yousefi, H. & Mohammadi, M. (2016). Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 13, 38-50.
- Peterson, T. C., Easterling, D. R., Karl, T. R., Groisman, P., Nicholls, N., Plummer, N., Torok, S., Auer, I., Boehm, R., Gullet, D., Vincent, L., Heino, R., Tuomenvirta, H., Mestre, O., Szentimrey, T., Salinger, J., Forland, E. J., Hanssen, i., Alexandersson, H., Jones. P. & Parker, D. (1998). Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review. *International Journal of Climatology*, 18 (13), 1493-1517.
- Peterson, T. C. (2013). *Introduction to Quality Control of Daily Climate Data*, Nanjing Workshop, National Climatic Data Center, Asheville, North Carolina, USA.
- Rafati, S. (2016). Qualitative and homogeneous study of wind speed and direction data (Preliminary study to investigate the potential of wind energy production in Kermanshah province. *The first national conference on sustainable green city*, municipality and Islamic council of Hamadan (In Persian).
- Rafati, S., Karimi, M. & Samdeliri, A. (2018). *Wind energy potential and economic evaluation for installation wind farm in Kermanshah province*. Research project of Kermanshah Power Distribution Company (In Persian).
- Shaahid, S. M., Al-Hadhrami, L, M. & Rahman, M. K. (2014). Potential of Establishment of Wind Farms in Western Province of Saudi Arabia. *Energy Procedia*, 52, 497-505.
- Shami, S.H., Ahmad, J., Zafar, R., Haris, M. & Bashir, S. (2016). Evaluating wind energy potential in Pakistan's three provinces, with proposal for integration into national power grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 408-421.
- Shu, Z.R., Li, Q. S. & Chan, P. W. (2015). Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, 101, 644-657.
- Waewsak, J., Chaichana, T., Chancham, C., Landry, M. & Gagnon, Y. (2014). Micro-siting wind resource assessment and near Shore wind farm analysis in Pakpanang district, Nakhon Si Thammarat province, Thailand. *Energy Procedia*, 52, 204-215.
- Wang, X. L. (2008). Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean shifts without trend-change. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 25 (3), 368-384. DOI:10.1175/2007/JTECHA982.1.
- Wang, X. L. & Feng, Y. (2013). RHtests V4 User Manual, Published online at <http://etcddi.pacificclimate.org/software.shtml>.
- WWEA (2010). World Wind Energy Report 2009, www.wwindea.org.