





Feasibility of wind energy potential in Zabol using Weibull distribution

Parisa Kahkhamoghadam¹  , Masoomeh Delbari²

1. (Corresponding Author) *Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran*

Email: parisakahkhamoghadam@uoz.ac.ir

2. *Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran*

Email: massomeh.delbari@uoz.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

30 November 2024

Received in revised form:

29 February 2025

Accepted:

8 April 2025

Available online:

27 April 2025

Keywords:

*Wind energy,
Trend analysis,
Wind power,
Weibull distribution.*

ABSTRACT

The 120-day winds of Sistan are among the most effective local winds in Iran. In recent years, droughts caused by climate change have accelerated the speed of these winds. In this study, the feasibility of using wind energy in Zabol station which has good potential for wind energy development was investigated. For this purpose, wind speed data were used with three-hour intervals in a period of twenty years. The two-parameter Weibull distribution was used to describe the wind speed distribution. The results showed that the average wind speed in warm seasons is more than twice the average wind speed in cold seasons. The Wind Rose showed that the most probable winds blow in the northwest direction at the investigated station. The results of trend analysis showed that wind speed has a significant positive trend on an annual scale. The annual average wind power density at the height of 10 meters and 40 meters was calculated as 386.129 and 699.452 W/m², respectively. Also, the possibility of winds blowing with a speed between 3 and 25 m/s at 40 m is more than 80% of the total hours of wind existence (equivalent to 5987 hours per year), which shows that the mentioned station is a suitable place for installing and developing wind turbines. In order to choose the best wind turbine among different models, it is necessary to calculate the energy cost index. Therefore, due to the continuous wind speed of more than 8 meters per second in 6 hot months of the year, Type II wind turbines are recommended for the study area.

Citation: Kahkhamoghadam, P., & Delbari, M. (2025). Feasibility of wind energy potential in Zabol using Weibull distribution. *Geographical planning of space quarterly journal*, 15 (1), 159-178.

<http://doi.org/10.30488/gps.2025.478128.3779>



© The Author(s)

Publisher: Golestan University Press

This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract

Introduction

Energy is one of the most important demands in the development of human societies. As the world population continues to grow and the limited and non-renewable resources of fossil fuels diminish, countries must take action to facilitate greater use of renewable energy resources, such as geothermal and wind energy. Wind power is one of the clean, inexhaustible, and free energy sources, preventing environmental pollution caused by burning fossil fuels. In estimating wind energy production through wind turbine design, the probability distribution of wind speed is absolutely important. There are different distribution functions for studying the wind characteristics of any site. However, the 2-parameter Weibull distribution is the most commonly used function due to its simplicity and accuracy. Iran is in a low-pressure location and has a high wind energy potential in the summer and winter in some regions. Nevertheless, except in a few specific locations such as Binalud and Manjil, the use and exploitation of such clean, renewable sources is still not addressed enough.

Methodology

Zabol, with an area of 8117 square kilometers, is the capital of Sistan County and is located in northeastern Sistan and Baluchestan province, Iran. The 120-day wind of Sistan is the strongest wind in Iran, with a speed of up to 120 kilometers per hour, which blows almost from late May to late September (about four months). This work is based on the hourly mean wind speed data for Zabol recorded over twenty years (2001-2020). The most widely used model to describe the wind speed distribution is the two-parameter Weibull distribution. This work determined k and c through the maximum likelihood (ML) technique. Wind power density and wind energy density were calculated using Weibull distribution analysis. This study used the non-parametric Mann-Kendall (MK) test (Kendall, 1975; Mann, 1945) to detect mean wind speed value trends at Zabol station. The number of changes in wind speed values per unit of time (trend

slope) was obtained through Sen's slope. Knowledge of wind direction is important for orienting wind turbines properly. So, a wind rose diagram at an altitude of 10 m is drawn using WRPLOT software.

Results and discussion

This study uses hourly wind speed data for Zabol (Sistan) over twenty years for further analysis. The lowest and highest monthly mean wind speed values occurred in December 2009 (2.03 m/s) and July 2001 (13.84 m/s), respectively. The highest and the lowest mean wind speeds appear in 2020 (8.11 m/s) and 2011 (5.33 m/s), respectively. The twenty-year overall mean wind speed for the cold and warm seasons is 4.294 m/s and 9.220 m/s, respectively. This means the mean wind speed in summer is almost twice that in winter.

For a height of 10 meters, the yearly values of k range between 1.64 and 1.98, with an average value of 1.77. The lowest value of the scale parameter c is 5.09 m/s, which was found in 2014, while the highest value is 7.94, which occurred in 2020. The annual values of V_{mp} vary between 3.00 m/s and 5.20 m/s. The lowest value of the V_{op} is 7.49, while the highest value is 12.35 m/s. The lowest value of wind power density is 115 and was found in 2014, while the highest value is 485 W/m² and was found in 2020. Its average value is 386 W/m² for the same period. The energy values range between 1010- and 4247-kW h/m²/year. The average annual amount of energy for the Zabol station was 3382 kWh/m²/year. According to the results presented, the wind speed increases from May to August, which results in an increasing trend of wind power density. The probability of wind blowing at 3 to 25 m/s is about 74 percent in Zabol at 10 m height. So, the mean wind speed between 3-25 m/s is 5537 hours per year, almost the same as the mean wind speed exceeding 3 m/s. For a height of 40 meters, the wind speed exceeds 3 m/s in 7484 hrs/year (more than 80%). The economic operation of wind turbines requires at least 4000 hours. However, the economic performance of wind turbines in Zabol station is equal to 5987 hours per year. According to different classifications, Zabol seems to be a suitable place for harvesting

wind. The long-term monthly and annual mean wind speed trend was estimated using the nonparametric Mann-Kendall test. On an annual scale, wind speed has a significant positive trend at 5%. The significant results of the trend obtained from the Man-Kendall method are consistent with the Theil–Sen Slope results. Knowledge of wind direction is important for orienting wind turbines properly. So, a wind rose diagram at an altitude of 10 m is drawn using WRPLOT software. The wind speed and direction records used to generate the wind rose diagrams belong to the five recent years (2011-2015). The wind rose diagrams at 10 m altitude were also generated for all investigated years (not shown), which resulted in similar findings. The most probable wind blows toward the northwest direction.

Conclusion

The main focus of this study was to determine the key factors in wind energy resources assessment in a potentially suitable area for installing wind turbines. Most wind turbines are designed according to cut-in and cut-out speeds, defined as 3 and 25 m/s, respectively. The probability of wind blowing at a speed of between 3 to 25 m/s is about 74 percent in Zabol at 10 m height. So, the mean wind speed between 3-25 m/s is 5537 hours per year. The wind speed rises from May (6.277 m/s) to August (10.519 m/s), resulting in an increasing trend of wind power density from May (217.653 W/m²) to August (611.802 W/m²) at a height of 10 m. According to the results, yearly wind power density in the studied area is 386 and 700 W/m², respectively, at 10 and 40 m. Therefore, regarding different classification measures, Zabol station is suitable for installing wind turbines. The warm and cold seasons in Zabol are confronted with higher demands for cooling and heating, respectively. As there is still no gas supplier in this area, wind energy could be applied as a potential and cheap supplier for electricity heating and cooling.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

امکان سنجی پتانسیل انرژی باد در زابل با استفاده از توزیع ویبول

پریسا کهخامقدم^۱ ✉، معصومه دلبری^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده آب‌و‌خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: parisakahkhamoghadam@uoz.ac.ir
۲- گروه مهندسی آب، دانشکده آب‌و‌خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران رایانامه: massomeh.delbari@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	بادهای ۱۲۰ روزه سیستان از اثرگذارترین بادهای محلی ایران است. در سال‌های اخیر، خشک‌سالی‌های ناشی از تغییر اقلیم، عامل تسریع‌کننده افزایش سرعت این بادهای بوده است. لذا در این پژوهش امکان‌سنجی استفاده از انرژی بادی در ایستگاه زابل که پتانسیل خوبی برای توسعه انرژی بادی دارد، موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور از داده‌های سرعت باد، با فواصل زمانی سه‌ساعته در یک دوره بیست‌ساله استفاده گردید. برای توصیف توزیع سرعت باد از توزیع دو پارامتری ویبول استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین سرعت باد در فصول گرم سال بیش از دو برابر میانگین سرعت باد در فصول سرد است. نمودار گلباد ترسیم‌شده نشان داد که محتمل‌ترین بادهای در ایستگاه موردبررسی به سمت شمال غربی می‌وزد. نتایج تحلیل روند نشان داد که در مقیاس سالانه سرعت باد دارای روند مثبت معناداری می‌باشد. میانگین سالانه چگالی توان باد در ارتفاع ۱۰ و ۴۰ متری به ترتیب ۳۸۶/۱۲۹ و ۶۹۹/۴۵۲ کیلووات بر ساعت محاسبه گردید. همچنین نتایج نشان داد که احتمال وزش بادهایی با سرعت بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۴۰ متری، بیش از ۸۰ درصد از کل ساعات موجودیت باد (معادل ۵۹۸۷ ساعت در سال) می‌باشد که نشان می‌دهد ایستگاه مذکور مکانی مناسب جهت نصب و توسعه توربین‌های بادی است. به‌منظور انتخاب بهترین توربین بادی بین مدل‌های مختلف، محاسبه شاخص هزینه انرژی ضروری است. لذا با توجه به تداوم سرعت باد بیش از ۸ متر بر ثانیه در ۶ ماه گرم سال، توربین‌های بادی تیپ II برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌گردد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹	
تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷	
واژگان کلیدی: انرژی باد، تحلیل روند، توان باد، توزیع ویبول.	

استناد: کهخامقدم، پریسا و دلبری، معصومه. (۱۴۰۴). امکان‌سنجی پتانسیل انرژی باد در زابل با استفاده از توزیع ویبول. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۵ (۱)، ۱۷۸-۱۵۹.

<http://doi.org/10.30488/gps.2025.478128.3779>

مقدمه

انرژی یکی از مهم‌ترین مطالبات در توسعه جوامع بشری است. با ادامه رشد جمعیت جهان و کاهش منابع محدود و تجدید ناپذیر سوخت‌های فسیلی، کشورها باید برای تسهیل استفاده بیشتر از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی اقدام کنند. نیروی باد یکی از منابع انرژی پاک، پایان‌ناپذیر و رایگان است که از آلودگی محیطی ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی جلوگیری می‌کند (Filom et al., 2021). در سال‌های اخیر تعداد زیادی از کشورها از انرژی باد برای تنوع بخشیدن به منابع انرژی و تولید برق استفاده کرده‌اند و روش‌های متداول تولید برق به دلیل نقش آن‌ها در گرمایش جهانی و انتشار گازهای گلخانه‌ای موردبررسی قرار گرفته‌اند. در این راستا چندین دولت گام‌های مهمی در جهت افزایش تولید برق از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر، از جمله انرژی خورشیدی، باد و غیره برداشته‌اند (Bousla et al., 2023). با این وجود انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران به دلیل ذخایر سوخت‌های فسیلی تا حدودی مورد غفلت قرار گرفته است. افزایش جمعیت و تقاضای بالای انرژی و تأثیر منفی سوخت فسیلی بر تغییرات آب و هوایی، ایران را به سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله باد سوق داده است (Mohamadi et al., 2021). مطالعات پیشین نشان دادند که بخش‌های عمده جنوب شرقی ایران پتانسیل بسیار خوبی برای بهره‌برداری از انرژی باد دارند. با این حال برای امکان‌سنجی دقیق، باید محاسبه آماری کاملی بر روی داده‌های مرتبط مانند سرعت باد در این مناطق صورت گیرد (Fadai, 2007). در ادامه به شرح مختصری از مطالعاتی که در این خصوص صورت گرفته است، پرداخته می‌شود.

دلبری و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی توزیع مکانی سرعت و مدت وزش باد در ایران با هدف تعیین مناطق مستعد با پتانسیل خوب برای احداث توربین‌های بادی پرداختند. در این پژوهش از آمار ۲۰ ساله سرعت روزانه باد (متر بر ثانیه) در ۱۰۴ ایستگاه سینوپتیک کشور استفاده شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که بر اساس نقشه پهنه‌بندی شده میانگین سرعت باد، استان‌های واقع در شرق، شمال شرق و شمال غرب کشور دارای سرعت باد بیش از ۳-۴ m/s می‌باشند و در همین نواحی شهرهایی مانند رفسنجان، زابل، خواف، تربت‌جام، الیگودرز، کهنوج و خدابنده برای استفاده از انرژی بادی مناسب می‌باشند. کهخامقدم و دلبری (۱۳۹۶) با هدف تعیین پتانسیل انرژی باد و انتخاب نقاط بهینه برای احداث نیروگاه بادی به ارزیابی امکان بهره‌گیری از انرژی باد در استان سیستان و بلوچستان پرداختند. احتمال تجربی داده‌ها با استفاده از تابع توزیع ویبول محاسبه گردید و پتانسیل انرژی باد در دو ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ایستگاه‌های زابل، زهک و کنارک قابلیت مناسبی برای نصب توربین‌های تجاری را دارا می‌باشند و ایستگاه زابل با حداکثر چگالی توان باد مناسب‌ترین مکان برای بهره‌گیری انرژی باد شناخته شد.

مطالعات امکان‌سنجی دقیق و جامع انرژی باد در کشورهایی که سطح مصرف بالای منابع انرژی سنتی دارند، امری حیاتی است. در این راستا با هدف ارزیابی دقیق پتانسیل انرژی باد، پژوهشگران به بررسی شش تابع توزیع احتمال در هفت شهر ساحلی جنوب ایران پرداختند. در این پژوهش شش تابع توزیع احتمال موردبررسی قرار گرفت و از نظر سادگی و همچنین با در نظر گرفتن پراکندگی جغرافیایی ایستگاه‌ها، تابع گاما به‌عنوان مناسب‌ترین تابع در سواحل جنوبی ایران شناخته شد (Filom et al., 2021). در پژوهشی دیگر استفاده از انرژی باد در برخی از مناطق استان زنجان موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور آمار سرعت باد در فواصل ده دقیقه‌ای شامل سرعت باد در ارتفاعات ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری و جهت باد در ارتفاعات ۳۰ و ۳۷/۵ متری مورداستفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که سرعت باد سالانه برای سلطانیه و طارم در ارتفاع ۴۰ متر به ترتیب ۴/۸۱ و ۳/۹۳ متر بر ثانیه است. همچنین عملکرد چندین توربین بادی در مناطق مذکور نیز موردبررسی قرار گرفت (Mohammadi et al., 2022). در پژوهشی در لیبی پژوهشگران به ارزیابی قابلیت اقتصادی مزارع بادی در مقیاس‌های مختلف پرداختند. تجزیه و تحلیل‌ها شامل: توزیع فرکانس، ضرایب شکل و

مقیاس توزیع ویبول و همچنین تحلیل میانگین سرعت باد بود. علاوه بر آن از نرم‌افزار RETScreen برای تخمین خروجی انرژی و تحلیل امکان‌سنجی اقتصادی مزرعه بادی استفاده گردید. نتایج نشان داد که پروژه‌های بادی زمانی که از توربین EWT-DW52 با ظرفیت ۵۰۰ کیلووات استفاده می‌شود از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه هستند (Kassem et al., 2023). مکان‌یابی و تطبیق توربین مناسب برای برآوردن الزامات خاص از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا پژوهشگران به ارزیابی امکان‌سنجی انرژی باد برای انتخاب یک توربین تجاری کوچک برای استفاده مسکونی در هند پرداختند. برای این منظور از توابع توزیع احتمال رایلی و ویبول بر اساس داده‌های سرعت باد یک‌ساله استفاده شد. تجزیه‌وتحلیل مقایسه‌ای در شناسایی مناسب‌ترین توربین نشان داد که برای منطقه مورد مطالعه، برای کاربردهای مسکونی مناسب‌ترین توربین با بازده انرژی سالانه ۸ مگاوات می‌باشد (Banu & Bhadani, 2024). در مطالعه‌ای که در هند صورت گرفت پژوهشگران به ارزیابی پتانسیل نیروی باد و تحلیل اقتصادی آن برای ۶۲ مکان و با شش روش مختلف پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که پارامتر شکل تابع ویبول از ۱/۵۲ تا ۴/۶۵ متغیر است درحالی‌که پارامتر مقیاس تابع ویبول بین ۲/۳۹ تا ۹/۷۳ متر بر ثانیه می‌باشد (Kumar & Yadav, 2024). پژوهشگران در هند نقشه‌هایی با وضوح بالا برای تعیین مناطق مستعد جهت نصب توربین بادی ارائه نمودند. نتایج نشان داد که در ۲۳ درصد از مساحت هند سرعت باد در ارتفاع ۱۵۰ متری بیش از ۵ متر بر ثانیه می‌باشد. این محققین بیان کردند که اطلس‌های ترسیم‌شده می‌تواند انتخاب مکان‌های استراتژیک، کاهش زمان و هزینه و عدم اطمینان در فرآیند توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در هند را تسهیل کند (Von Krauland & Jacobson 2024).

مکان‌یابی مناطق مستعد جهت تولید برق و تأسیس مزارع بادی و حفظ محیط‌زیست امری ضروری می‌باشد (Mostafaeipour et al., 2011). با توجه به مطالب ذکرشده، زابل دارای پتانسیل انرژی بادی بسیار خوبی است. باین‌حال برای امکان‌سنجی دقیق، باید محاسبه آماری کاملی بر روی داده‌های مرتبط در این منطقه صورت گیرد. در حال حاضر نیروگاه بادی میل‌نادر به ظرفیت ۵۰ مگاوات شامل ۲۰ واحد توربین بادی در شهرستان نیمروز و در شمال غرب شهرستان زابل افتتاح شده است. اما مشاهدات اولیه نشان می‌دهد که پتانسیل باد بیشتری در این منطقه وجود دارد که هنوز ارتقا پیدا نکرده است (Pishgar-Komleh & Akram, 2017). سرعت باد نقش مهمی در برآورد انرژی موجود در باد دارد (رحیم‌زاده و پدرام، ۱۳۸۹) و در صنعت باد هیچ جایگزینی برای سرعت وجود ندارد. در سال‌های اخیر تغییرات آب و هوایی تأثیر بالقوه‌ای بر تعیین و پیش‌بینی منابع بادی داشته است که متعاقباً بر چشم‌انداز تولید انرژی بادی تأثیر می‌گذارد. تأثیر تغییر اقلیم در الگوهای باد، بر پتانسیل تولید انرژی بادی تأثیر می‌گذارد. مطالعات اخیر افزایش دمای کره زمین را با تغییرات سرعت باد در مناطق مختلف مرتبط دانسته‌اند (Kara & Şahin 2023). بادهای ۱۲۰ روزه منطقه سیستان اثر شگرفی بر ویژگی‌های طبیعی و انسانی داشته و خشک‌سالی‌های هیدرولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم، عامل زمینه‌ساز و تسریع‌کننده افزایش سرعت بادهای بوده است (پودینه و همکاران، ۱۳۹۷). لذا هدف این تحقیق ارزیابی پتانسیل انرژی بادی ایستگاه زابل بر اساس تخمین سرعت باد در ارتفاعات چنگانه با استفاده از روش استاندارد تابع توزیع احتمال ویبول است. بدیهی است که ارائه اطلاعات کلی در زمینه انرژی باد و نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در مطالعات تکمیلی کسب انرژی برق از نیروی باد در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

مبانی نظری

چرخ عظیم تمدن بشری به انرژی وابسته است و با اتمام انرژی‌های فسیلی غیرقابل تجدید، این چرخ مختل خواهد شد. لذا استفاده از انرژی‌های نو مانند انرژی خورشید و باد مقرون به صرفه می‌باشد (جانبازقبادی، ۱۳۹۸). تغییرات ناچیز در اقلیم سایر پارامترهای اقلیمی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. یکی از پدیده‌های حدی که بر اثر تغییر اقلیم رخ می‌دهد، بادهای و طوفان‌های شدید می‌باشد (پودینه و همکاران، ۱۳۹۷). تفاوت‌های زیادی در ویژگی‌های باد از جمله جهت و چگالی انرژی باد در مکان‌های مختلف وجود دارد و این منطق پشت تمام تجزیه و تحلیل‌ها، قبل از شروع پروژه‌های انرژی باد است (Mohammadi et al., 2022). پنج کشور جهان از جمله ایالات متحده آمریکا، آلمان، اسپانیا، چین و هند بیشترین سهم ظرفیت نصب توربین بادی را دارا می‌باشند (Pishgar-Komleh & Akram, 2017). اگرچه کشورهای خاورمیانه از نظر منابع انرژی متعارف مانند نفت و گاز طبیعی غنی هستند، اما اثرات زیست‌محیطی استفاده از سوخت‌های فسیلی، سیاست‌گذاران را تشویق به سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر کرده است (Heravi et al., 2020). ایران تا حد زیادی در بخش انرژی خود به سوخت‌های فسیلی مانند نفت خام وابسته است (Radfar et al., 2017). همان‌طور که در برنامه ششم توسعه ملی کشور آمده است، دولت ایران تا سال ۲۰۲۰ برداشت ۵۰۰۰ مگاوات از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر را هدف‌گذاری کرده است (Mills, 2021). با توجه به این تقاضای بالا، مطالعات گسترده‌ای در مورد انواع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر باید صورت گیرد (Amiri et al., 2016). برای استفاده بهینه از انرژی باد، لازم است با دانستن ویژگی‌های باد، پتانسیل و امکان‌سنجی انرژی باد در یک مکان خاص مورد ارزیابی قرار گیرد. توزیع مختلفی برای مطالعه خصوصیات باد از جمله ویبول، رایلی، جانسون و خی‌دو در هر منطقه وجود دارد (Manwell et al., 2004; Celik, 2004; Garcia et al., 1998; Burton et al., 2001; et al., 2002). باین‌حال، توزیع دو پارامتری ویبول به دلیل سادگی و دقت به‌عنوان پرکاربردترین تابع شناخته شده است (Eskin et al., 2008; Mostafaeipour et al., 2014). ایران در یک منطقه کم‌فشار قرار دارد و در برخی از مناطق دارای پتانسیل انرژی باد بالا در تابستان و زمستان است (Mostafaeipour et al., 2014). باین‌حال، به‌جز در چند مکان خاص مانند بینالود و منجیل، استفاده و بهره‌برداری از چنین منبع پاک تجدیدپذیر هنوز به‌اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است.

روش پژوهش

توزیع سرعت باد

برای پیش‌بینی احتمال وقوع هر یک از رخداد‌های باد از تابع توزیع احتمال ویبول استفاده می‌شود (Eskin et al., 2008) و این تابع به‌عنوان پرکاربردترین مدل برای توصیف توزیع سرعت باد شناخته می‌شود. این تابع متشکل از دو پارامتر شامل: پارامتر شکل (k) و پارامتر مقیاس (c) می‌باشد. مقدار پارامتر شکل وسعت و پهنای تابع را نشان می‌دهد و مقادیری بین ۱ تا ۳ را دارا می‌باشد. مقادیر کوچک برای پارامتر شکل نشان‌دهنده بادهای بسیار متغیر است، درحالی‌که بادهای تقریباً ثابت با مقادیر بزرگ‌تر مشخص می‌شوند. پارامتر مقیاس نیز مشخصات توزیع سرعت باد را تعیین می‌کند (جلالوند و همکاران، ۱۳۹۳). چندین روش برای محاسبه پارامترهای این مدل ارائه شده است، باین‌حال مطالعات نشان داده است که تفاوت معناداری بین روش‌های مختلف محاسبه مقادیر این پارامترها دیده نمی‌شود (Stevens & Smulders, 1979). در این پژوهش برای محاسبه پارامترهای تابع توزیع ویبول از روش حداکثر درست‌نمایی استفاده گردیده است. تابع توزیع ویبول به‌صورت زیر توصیف می‌شود (Justus et al., 1978; Yaniktepe et al., 2013):

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (k > 0, V > 0, c > 1) \quad (1)$$

که در آن $F(V)$ نشان‌دهنده احتمال سرعت باد برای سرعت V است و k و c به ترتیب پارامتر شکل (بدون بعد) و پارامتر مقیاس (m/s) را نشان می‌دهند. احتمال اینکه سرعت باد بین دو مقدار V_1 و V_2 قرار بگیرد از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P(V_1 < V < V_2) = \exp\left[-\left(\frac{V_1}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_2}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

پارامترهای k در روش حداکثر درست‌نمایی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد (Cellura et al., 2008):

$$k = \frac{n}{(1/c) \sum_{j=1}^n V_j^k \ln V_j - \sum_{j=1}^n \ln V_j} \quad (3)$$

که در آن n تعداد داده‌های موردبررسی و V_j هر یک از داده‌های سرعت باد است. پارامتر c را می‌توان با استفاده از مقادیر k به صورت زیر بیان کرد (Cellura et al., 2008):

$$c = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_j^k \right]^{1/k} \quad (4)$$

رابطه ۳ یک رابطه ضمنی است که برای حل آن از روش تکرار استفاده می‌گردد. تابع توزیع ویبول (رابطه ۱)، قادر به توصیف وضعیت واقعی سرعت باد برابر با صفر نیست. لذا در این تابع فقط از داده‌های غیر صفر استفاده می‌گردد (Cellura et al., 2008). میانگین (\bar{V}) و واریانس (σ^2) سرعت باد را می‌توان به ترتیب با روابط (۵) و (۶) محاسبه کرد:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2 \quad (6)$$

با داشتن پارامترهای k و c تابع توزیع ویبول، امید ریاضی ($E(V)$) یا میانگین (μ_V) و واریانس (σ_V^2) با استفاده از روابط ۷ و ۸ و تابع گاما نیز از رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$E(V) = \mu_V = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (7)$$

$$\sigma_V^2 = \mu_V^2 \left[\frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} - 1 \right] \quad (8)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (9)$$

در بسیاری از توربین‌های بادی تجاری، میانگین سرعت باد بیش از ۳ متر بر ثانیه است (Cellura et al., 2008). قدرت بادی که با سرعت V در یک منطقه جریان دارد، با مکعب سرعت باد و مساحت افزایش می‌یابد. بنابراین توان باد (P) در واحد سطح (A) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$P(V) = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (10)$$

که در آن ρ چگالی استاندارد هوا در سطح آزاد دریا با میانگین دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ اتمسفر (kg/m^3) و V میانگین سرعت باد (m/s) است. تخمین توان باد بر این فرض استوار است که چگالی هوا با سرعت باد همبستگی ندارد. خطای ارائه‌شده توسط این فرض در سطح فشار ثابت کمتر از ۵ درصد است (Hennessey, 1977; Keyhani et al., 2010).

چگالی توان باد (WPD)، که بر حسب وات بر مترمربع (W/m^2) بیان می‌شود، توزیع سرعت باد و وابستگی نیروی باد به چگالی هوا و مکعب سرعت باد را در نظر می‌گیرد. بنابراین، چگالی باد به‌طور کلی شاخص مناسب‌تری نسبت به سرعت باد می‌باشد (Al-Nassar et al., 2005). میانگین چگالی توان باد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$WPD = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho V_i^3}{n} \quad (11)$$

که در آن i سرعت باد سه‌ساعته (m/s) اندازه‌گیری شده و n کل داده‌های نمونه استفاده‌شده برای هر سال است. علاوه بر این، چگالی توان باد (P/A) و چگالی انرژی باد (E/A) با استفاده از تجزیه و تحلیل توزیع ویبول، از طریق روابط زیر ارائه می‌شود (Chang et al., 2003):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (12)$$

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) T \quad (13)$$

که در آن T دوره زمانی (hr) می‌باشد. برای مثال در یک دوره یک ماهانه برابر ۷۲۰ و در یک دوره سالانه برابر ۸۷۶۶ ساعت است.

با داشتن پارامترهای k و c محتمل‌ترین سرعت باد (V_{mp}) و سرعت نامی باد (V_{op}) از روابط ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌گردد (Chang et al., 2003). منظور از سرعت نامی باد، سرعت باد دارای حداکثر انرژی می‌باشد.

$$V_{mp} = c \left(1 - \frac{1}{k} \right)^{1/k} \quad (m/s) \quad (14)$$

$$V_{op} = c \left(1 - \frac{2}{k} \right)^{1/k} \quad (m/s) \quad (15)$$

آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن

در این پژوهش برای بررسی روند بلندمدت داده‌های سرعت باد از آزمون نا پارامتری من-کندال (Kendall, 1975) استفاده گردید. این آزمون برای بررسی سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند، کاربرد زیادی داشته (Partal, & Kahya et al., 2006) و به‌طور گسترده در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی بکار می‌رود (Lettenmaier et al., 1994). همچنین از آزمون سن (Sen, 1968) برای بررسی شیب خط روند سری در N جفت نمونه از داده‌ها (Q_i) استفاده شده است. این آزمون نیز مانند روش من-کندال روش نا پارامتری است که برای تحلیل سری‌های زمانی از تحلیل تفاوت بین مشاهدات بهره می‌گیرد و در صورت وجود داده‌های گم‌شده، به راحتی قابل استفاده می‌باشد (Serrano et al., 1999). روند محاسبات دو آزمون مذکور مطابق با پژوهش کهخامقدم و دلبری (۱۳۹۶) می‌باشد.

محدوده مورد مطالعه

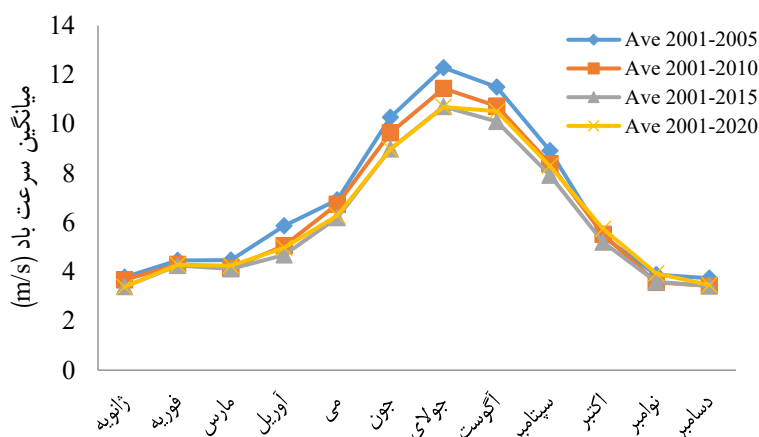
استان سیستان و بلوچستان بزرگ‌ترین استان ایران است که در معرض بادهای مختلف فصلی قرار گرفته است و باد رایج‌ترین منبع انرژی در این استان می‌باشد. شهرستان زابل با ۱۵۱۹۷ کیلومتر مربع در شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. این شهرستان به‌عنوان یکی از نواحی استراتژیک مرزی شرق ایران و حاشیه کویر می‌باشد (خمر و راهدارپودینه، ۱۳۹۹) و در محدوده جغرافیایی بین ۶۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۵ دقیقه و تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی واقع گردیده است (کریمی‌نظر و همکاران، ۱۳۸۹). برای

انجام این پژوهش از داده‌های سرعت باد، با فواصل زمانی سه‌ساعته که در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین اندازه‌گیری شده و از اداره هواشناسی کشور تهیه گردیده است، در یک دوره بیست‌ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۰) استفاده شد. میانگین و انحراف از معیار سرعت باد برای دوره موردبررسی به ترتیب ۶/۲۳۸ و ۳/۷۶۹ متر بر ثانیه می‌باشد. بیشترین سرعت باد در ماه جولای (۱۰/۶۹۳ متر بر ثانیه) و کمترین آن در ماه ژانویه (۳/۳۷۷ متر بر ثانیه) رخ داده است.

یافته‌ها

خصوصیات سرعت باد

مقادیر میانگین (\bar{V}) و انحراف از معیار (σ) ماهانه سرعت باد برای ایستگاه زابل (۲۰۰۱-۲۰۲۰) در جدول ۱ ارائه شده است. بیشترین مقدار میانگین سرعت باد در تابستان (جولای و آگوست) و کمترین مقدار آن در زمستان (دسامبر، ژانویه) رخ داده است. کمترین و بالاترین میانگین ماهانه سرعت باد به ترتیب در دسامبر ۲۰۰۹ (۲/۰۲۸ متر بر ثانیه) و جولای ۲۰۰۱ (۱۳/۸۴ متر بر ثانیه) اتفاق افتاده است. میانگین ماهانه انحراف از معیار نیز به ترتیب از ۱/۷۸۳ تا ۵/۹۳۷ متر بر ثانیه برای دسامبر ۲۰۰۹ و اکتبر ۲۰۰۱ متغیر است. جدول ۱ همچنین نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین میانگین سرعت باد به ترتیب در سال ۲۰۲۰ (۸/۱۰۷ متر بر ثانیه) و ۲۰۱۱ (۵/۳۲۷ متر بر ثانیه) ظاهر می‌شود. میانگین سرعت باد ماهانه در یک دوره زمانی کوتاه (۲۰۰۱-۲۰۰۵)، متوسط (۲۰۰۱-۲۰۱۰) و طولانی (۲۰۰۱-۲۰۱۵) و (۲۰۰۱-۲۰۲۰) در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر سرعت باد در ماه جولای (در طول دوره تابستان) و حداقل سرعت باد در ژانویه یا دسامبر (در زمستان) رخ داده است. جدول ۲ نیز نشان می‌دهد که میانگین سرعت باد در فصل گرم (می-اکتبر) بیشتر از فصل سرد (نوامبر-آوریل) می‌باشد. برای فصول سرد و گرم، میانگین سرعت باد بیست‌ساله به ترتیب ۴/۲۹۴ و ۹/۲۲۰ متر بر ثانیه است. این بدان معناست که میانگین سرعت باد در تابستان بیش از دو برابر میانگین سرعت باد در زمستان است. Pishgar-Komleh & Akram (2017) بیان کردند که روند مشابهی برای سرعت باد در ماه‌های مختلف سال در زابل وجود دارد، همچنین، فصل سرد دارای سرعت باد کمتری است در حالی که بادهای شدید در فصل گرم رخ می‌دهد. حنفی و ایران‌پور (۱۳۹۶) به ارزیابی و پهنه‌بندی سرعت باد در ۱۴۵ ایستگاه همدیدی کشور با استفاده از مدل تحلیل خوشه پرداختند. ایشان بیان کردند که ایستگاه منجیل، نهبندان و زابل جهت تولید انرژی الکتریکی بسیار مناسب می‌باشد و میانگین سالیانه سرعت باد در این ایستگاه‌ها ۱۰/۵ نات می‌باشد. از آنجایی که فصول گرم و سرد زابل به ترتیب با تقاضای سرمایشی و گرمایشی زیادی مواجه بوده و همچنین گازرسانی به این منطقه به صورت کامل صورت نگرفته است، می‌توان از انرژی باد به‌عنوان تأمین‌کننده بالقوه و ارزان برای گرمایش و سرمایش منطقه مذکور استفاده کرد. از آنجایی که این منطقه از فقیرترین مناطق کشور است و هزینه برق برای اکثریت مردم بالاست، برنامه‌ریزی و نصب توربین‌های بادی حتی کوچک می‌تواند هزینه انرژی را برای جامعه سیستان به‌طور مؤثر کاهش دهد. البته برای این منظور اطلاعات بیشتری لازم است.



شکل ۱. میانگین ماهانه سرعت باد در دوره زمانی کوتاه، متوسط و طولانی برای ایستگاه سینوپتیک زابل در دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۰

تابع توزیع ویبول، چگالی توان باد و چگالی انرژی باد

در این پژوهش، پارامترهای تابع توزیع ویبول از طریق روش حداکثر درست‌نمایی محاسبه گردید. میانگین مقادیر مؤلفه‌های باد برای هر سال و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر سالانه k بین ۱/۶۴۶ و ۱/۹۸۷ و با مقدار متوسط ۱/۷۷۱ متغیر بوده و یک تغییر جزئی را از سالی به سال دیگر نشان می‌دهد. مقادیر c نیز در سال‌های مختلف تغییر می‌کند. کمترین مقدار c برابر با ۵/۰۸۹ متر بر ثانیه و در سال ۲۰۱۴ به دست آمده است، در حالی که بیشترین مقدار آن ۷/۹۴۷ است که در سال ۲۰۲۰ رخ داده است. مقدار متوسط آن برای دوره مورد مطالعه ۷/۳۴۶ متر بر ثانیه محاسبه گردید. همچنین مقادیر محتمل‌ترین سرعت باد (V_{mp}) و سرعت نامی باد (V_{op}) که از مقادیر k و c محاسبه می‌شوند به ترتیب بین ۳/۰۰۲ و ۵/۲۰۴ و بین ۷/۴۹۳ و ۱۲/۳۴۷ متر بر ثانیه متغیر می‌باشد. چگالی توان باد در تمام سال‌های مورد بررسی بیشتر از ۱۱۵ و کمتر از ۴۸۵ وات بر مترمربع می‌باشد. چگالی انرژی باد در ارتفاع ۱۰ متری بین ۱۰۱۰/۲۴۸ و ۴۲۴۷/۸۱۱ کیلووات بر ساعت در سال متغیر است و میانگین سالانه چگالی انرژی باد برای دوره مورد بررسی ۳۳۸۲/۴۸۹ کیلووات بر ساعت محاسبه گردید. انرژی بادی، تبدیل انرژی باد به نوع مفید از انرژی مانند انرژی الکتریکی می‌باشد. چگالی انرژی باد که قدرت حاصل از انرژی باد در واحد سطح را نشان می‌دهد در تعیین مکان‌یابی احداث سایت و همچنین پتانسیل سنجی انرژی باد اهمیت زیادی دارد (سفیدپری و همکاران، ۱۳۹۵).

جدول ۱. مقادیر سرعت و انحراف از معیار سرعت باد برای ایستگاه زابل در دوره آماری (۲۰۲۰-۲۰۰۱)

ماه	مؤلفه m/s	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	همه سالها
ژانویه	\tilde{V}	۴/۶۳۷	۴/۷۹۰	۲/۸۳۱	۳/۰۴۸	۳/۵۶۹	۳/۷۰۶	۳/۳۱۹	۴/۴۳۱	۳/۱۷۷	۳/۱۴۵	۲/۸۹۱	۲/۷۱۸	۲/۷۰۲	۲/۱۸۵	۳/۷۳۰	۳/۱۰۰	۳/۵۷۵	۳/۹۸۵	۲/۹۸۵	۴/۰۱۵	۳/۳۷۷
	σ	۳/۸۹۳	۴/۲۸۵	۲/۷۸۹	۲/۹۶۶	۳/۰۱۱	۳/۳۲۹	۳/۲۲۸	۳/۲۷۸	۳/۰۳۳	۳/۵۴۸	۲/۵۷۴	۲/۳۵۰	۲/۹۱۹	۲/۰۲۴	۲/۸۶۵	۲/۶۴۴	۲/۶۱۴	۲/۸۴۵	۲/۷۴۴	۲/۸۲۳	۳/۰۳۸
فوریه	\tilde{V}	۴/۹۷۳	۳/۹۴۲	۴/۴۷۸	۳/۱۱۲	۵/۷۸۶	۳/۵۴۹	۴/۶۱۲	۵/۶۳۴	۳/۲۸۱	۳/۵۸۹	۳/۵۶۳	۴/۳۱۰	۴/۱۴۳	۴/۵۸۰	۳/۵۸۰	۳/۹۲۵	۳/۶۸۷	۳/۷۹۵	۳/۹۸۵	۴/۱۲۵	۴/۲۸۴
	σ	۳/۷۴۸	۳/۷۴۷	۳/۴۲۷	۴/۰۶۲	۴/۴۲۳	۳/۲۴۱	۴/۰۰۳	۴/۱۷۷	۴/۵۷۱	۳/۰۵۸	۳/۴۶۹	۲/۸۲۵	۳/۶۶۰	۳/۱۱۸	۳/۱۵۳	۳/۲۱۸	۳/۶۸۷	۳/۶۸۷	۳/۷۹۵	۳/۹۸۵	۳/۶۳۸
مارس	\tilde{V}	۴/۴۴۴	۴/۴۶۴	۴/۳۱۰	۵/۴۹۲	۳/۶۵۳	۳/۹۹۲	۴/۴۰۷	۳/۱۳۳	۳/۴۸۰	۴/۰۱۰	۴/۰۴۸	۳/۵۹۷	۳/۶۸۱	۳/۸۱۰	۵/۱۳۰	۳/۳۱۰	۴/۲۷۵	۳/۹۸۵	۵/۱۲۵	۶/۴۵۵	۴/۲۴۵
	σ	۳/۹۸۴	۴/۷۶۴	۳/۹۸۴	۴/۶۸۴	۳/۳۳۹	۳/۶۶۵	۳/۳۶۰	۳/۴۶۲	۳/۶۳۳	۲/۶۳۳	۳/۲۵۳	۳/۲۶۳	۲/۹۱۶	۳/۱۱۸	۳/۴۴۷	۲/۵۴۵	۲/۲۳۶	۲/۵۴۵	۳/۹۵۶	۲/۹۵۸	۳/۶۱۱
آوریل	\tilde{V}	۵/۰۷۱	۴/۴۷۹	۵/۷۱۳	۷/۴۶۷	۶/۵۷۵	۴/۷۹۲	۳/۸۰۰	۴/۰۲۵	۴/۳۱۳	۴/۳۳۳	۳/۵۴۶	۴/۳۲۸	۴/۳۶۳	۴/۲۳۸	۴/۰۴۰	۴/۱۹۰	۶/۲۰۰	۸/۰۴۵	۴/۷۶۵	۵/۹۸۵	۴/۹۷۰
	σ	۴/۴۸۸	۳/۹۳۹	۴/۱۴۹	۵/۰۹۳	۵/۷۵۲	۴/۰۲۱	۳/۳۱۵	۳/۲۱۱	۳/۲۹۸	۳/۰۷۸	۲/۴۲۳	۲/۶۰۸	۲/۹۹۶	۲/۵۱۱	۳/۳۴۶	۲/۴۱۷	۳/۴۷۸	۳/۹۵۹	۳/۸۹۵	۳/۹۶۳	۳/۶۴۷
می	\tilde{V}	۷/۷۲۲	۷/۳۷۱	۷/۴۶۰	۵/۸۱۹	۶/۲۱۰	۷/۹۹۶	۸/۲۱۰	۵/۳۵۵	۶/۲۹۰	۴/۹۸۴	۵/۰۲۰	۴/۹۸۴	۶/۰۰۰	۴/۷۰۰	۵/۲۷۰	۵/۲۳۰	۴/۹۳۵	۷/۶۷۵	۷/۶۷۵	۶/۲۷۷	۶/۲۷۷
	σ	۵/۴۳۰	۵/۴۵۹	۵/۳۵۷	۴/۱۱۶	۴/۰۶۷	۴/۴۴۱	۴/۶۰۶	۴/۰۵۷	۳/۷۹۱	۳/۶۳۸	۳/۸۱۹	۲/۹۱۰	۳/۴۷۳	۳/۰۵۰	۳/۶۹۲	۳/۲۲۵	۳/۱۱۷	۳/۸۸۶	۳/۹۸۶	۳/۹۱۵	۴/۰۰۲
جون	\tilde{V}	۱۱/۴۶۷	۱۱/۶۰۰	۱۱/۲۰۰	۱۰/۷۲۹	۹/۳۶۷	۱۰/۲۹	۸/۵۵۴	۱۰/۳۳	۸/۶۰۴	۷/۲۴۶	۷/۵۴۶	۸/۸۳۸	۷/۹۵۴	۸/۸۳۸	۶/۹۱۷	۷/۱۷۰	۷/۷۷۰	۷/۷۵۵	۹/۹۵۵	۱۰/۱۲۵	۹/۰۱۵
	σ	۵/۵۱۰	۵/۳۵۳	۵/۲۰۲	۴/۹۳۶	۴/۶۰۲	۴/۹۳۶	۴/۳۲۱	۳/۶۷۳	۴/۶۷۳	۳/۵۲۶	۳/۵۴۳	۴/۳۳۸	۲/۹۸۴	۴/۳۲۷	۲/۷۲۲	۴/۰۱۴	۳/۸۵۴	۴/۲۲۷	۴/۵۶۹	۴/۲۲۴	۴/۲۲۶
جولای	\tilde{V}	۱۳/۸۳۹	۱۱/۹۶۰	۱۱/۷۵۰	۱۲/۳۸۷	۱۱/۵۲۴	۱۲/۵۵	۱۱/۳۴	۱۰/۰۱	۹/۵۹۳	۹/۴۹۲	۹/۳۳۹	۹/۱۹۴	۹/۳۵۹	۹/۴۶۸	۸/۸۲۰	۹/۲۹۰	۹/۵۰۰	۱۱/۱۸۵	۱۲/۲۳۵	۱۱/۰۱۵	۱۰/۶۹۳
	σ	۴/۸۲۱	۴/۶۶۴	۵/۸۳۴	۴/۱۶۰	۳/۱۴۹	۳/۷۹۳	۳/۴۷۱	۳/۷۷۴	۳/۶۹۵	۴/۳۵۴	۳/۶۴۰	۲/۷۷۱	۴/۱۷۴	۳/۷۵۱	۳/۴۸۰	۴/۱۰۵	۳/۹۵۲	۴/۳۲۸	۴/۵۹۷	۴/۶۲۵	۴/۰۵۷
آگوست	\tilde{V}	۱۱/۴۱۹	۱۰/۶۱۷	۱۲/۶۱۳	۱۲/۱۰۱	۱۰/۷۵۴	۱۰/۸۲	۱۰/۰۲	۱۰/۰۹	۹/۷۳۰	۹/۰۸۹	۹/۳۳۵	۸/۱۸۵	۹/۰۶۰	۸/۶۳۷	۸/۴۸۰	۹/۲۵۰	۹/۵۶۵	۱۳/۷۸۵	۱۳/۲۳۵	۱۲/۹۵۵	۱۰/۵۱۹
	σ	۴/۴۱۷	۴/۴۹۴	۵/۷۲۶	۵/۲۰۹	۳/۱۸۳	۳/۷۶۱	۳/۴۱۴	۴/۱۳۲	۳/۸۵۰	۳/۷۲۷	۳/۲۴۶	۳/۲۸۹	۳/۳۹۷	۳/۰۴۰	۳/۲۸۹	۳/۶۸۵	۴/۱۵۳	۴/۵۱۵	۴/۶۵۸	۴/۵۲۸	۳/۹۳۶
سپتامبر	\tilde{V}	۸/۲۹۲	۹/۵۷۵	۹/۳۲۱	۸/۹۲۹	۸/۴۴۲	۸/۱۴۲	۹/۶۰۸	۷/۳۷۹	۶/۲۹۲	۷/۷۹۶	۷/۵۵۴	۷/۸۸۸	۵/۱۰۴	۶/۵۲۵	۷/۹۱۰	۶/۲۰۰	۷/۴۶۰	۹/۵۳۵	۱۱/۹۹۵	۱۱/۹۹۵	۸/۲۹۷
	σ	۵/۵۴۰	۵/۱۹۴	۵/۳۱۶	۴/۸۵۴	۴/۲۱۵	۵/۰۲۷	۴/۴۱۴	۴/۹۶۶	۴/۴۴۸	۴/۹۵۸	۳/۳۵۷	۳/۶۶۶	۳/۵۶۱	۳/۲۵۸	۳/۶۴۷	۳/۸۷۴	۳/۸۹۵	۴/۲۱۴	۴/۳۹۵	۴/۴۱۸	۴/۳۱۰
اکتبر	\tilde{V}	۵/۰۸۵	۵/۴۸۰	۵/۲۹۰	۶/۲۲۶	۶/۰۴۰	۴/۰۶۹	۷/۲۷۴	۵/۵۱۲	۵/۴۹۲	۵/۶۹۸	۵/۶۸۵	۴/۷۶۲	۴/۶۶۲	۵/۶۵۷	۳/۹۳۰	۵/۸۱۰	۴/۱۸۵	۷/۱۸۵	۶/۶۵۵	۱۲/۹۸۵	۵/۷۳۹
	σ	۵/۹۳۷	۴/۲۴۸	۴/۲۰۶	۵/۷۱۱	۵/۱۸۹	۳/۴۳۰	۳/۹۹۱	۳/۹۱۹	۳/۹۹۹	۴/۰۱۵	۲/۸۴۷	۳/۶۶۶	۳/۷۱۷	۳/۲۵۸	۳/۳۰۶	۳/۲۵۸	۳/۷۴۲	۴/۱۱۵	۳/۹۵۴	۴/۵۵۸	۴/۰۵۰
نوامبر	\tilde{V}	۳/۷۲۹	۴/۲۵۴	۳/۹۷۱	۳/۰۶۷	۴/۳۸۳	۴/۳۷۱	۲/۲۶۷	۳/۴۷۱	۲/۳۲۸	۳/۱۷۹	۳/۶۶۳	۳/۲۰۰	۳/۲۴۶	۳/۲۴۶	۳/۵۴۰	۴/۱۲۰	۳/۸۱۰	۴/۸۷۵	۵/۹۹۵	۶/۰۱۵	۳/۹۳۱
	σ	۳/۲۲۹	۳/۶۱۲	۴/۲۳۳	۳/۴۴۵	۴/۱۷۲	۳/۴۴۵	۲/۷۲۴	۳/۵۸۶	۴/۱۸۱	۳/۰۱۶	۳/۰۲۷	۲/۸۷۹	۲/۷۷۰	۳/۱۷۶	۲/۴۴۶	۲/۹۶۵	۲/۸۷۴	۲/۵۲۹	۳/۸۷۹	۳/۸۶۳	۳/۳۱۳
دسامبر	\tilde{V}	۳/۱۷۷	۳/۹۲۳	۴/۴۹۶	۳/۴۷۲	۳/۶۰۱	۳/۸۴۳	۳/۵۷۷	۲/۷۷۴	۲/۰۲۸	۳/۳۴۳	۳/۷۳۰	۲/۵۷۷	۴/۰۹۳	۳/۴۷۶	۳/۲۵۰	۳/۱۸۰	۲/۶۸۵	۲/۶۸۵	۳/۵۶۵	۴/۹۹۵	۳/۴۵۸
	σ	۳/۲۴۴	۴/۳۶۹	۴/۹۵۱	۳/۹۲۸	۴/۴۵۳	۳/۳۴۵	۳/۷۶۴	۱/۷۸۳	۳/۰۳۶	۳/۹۲۶	۳/۶۷۰	۳/۳۴۱	۲/۵۳۴	۲/۸۲۸	۲/۶۷۷	۲/۵۵۸	۲/۴۸۷	۲/۸۵۸	۳/۴۰۴	۳/۷۸۹	۳/۴۰۲
سالانه	\tilde{V}	۶/۹۸۸	۶/۶۲۱	۶/۸۶۹	۶/۸۲۱	۶/۶۵۹	۶/۴۳۶	۶/۴۱۶	۶/۰۵۲	۵/۴۷۴	۵/۴۹۹	۵/۳۲۷	۵/۳۴۵	۵/۳۷۰	۵/۵۴۳	۵/۴۱۹	۵/۷۱۴	۵/۳۱۳	۷/۳۱۳	۷/۴۲۲	۸/۱۰۷	۶/۲۳۸
	σ	۴/۵۲۸	۴/۵۶۷	۴/۴۸۸	۴/۳۶۲	۴/۱۳۰	۳/۸۴۰	۳/۷۳۲	۳/۹۳۸	۳/۲۴۴	۳/۶۸۴	۳/۲۳۹	۳/۰۹۷	۳/۴۴۱	۳/۰۱۴	۳/۳۲۱	۳/۳۹۶	۳/۸۰۹	۳/۹۸۶	۳/۹۸۶	۴/۱۵۴	۳/۷۶۹

جدول ۲. میانگین سالانه سرعت باد (m/s) برای فصول گرم و سرد برای ایستگاه زابل در دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۰

سال	فصل سرد (نوامبر-آوریل)	فصل گرم (می-اکتبر)
۲۰۰۱	۴/۳۳۹	۹/۶۳۷
۲۰۰۲	۴/۳۰۹	۸/۹۳۴
۲۰۰۳	۴/۳۰۰	۹/۴۳۹
۲۰۰۴	۴/۲۷۶	۹/۳۶۵
۲۰۰۵	۴/۵۹۴	۸/۷۲۳
۲۰۰۶	۳/۸۹۲	۸/۹۸۰
۲۰۰۷	۳/۶۶۳	۹/۱۶۸
۲۰۰۸	۳/۹۸۹	۸/۱۱۵
۲۰۰۹	۳/۲۸۲	۷/۶۶۷
۲۰۱۰	۳/۶۱۴	۷/۳۸۴
۲۰۱۱	۳/۵۷۳	۷/۰۸۰
۲۰۱۲	۳/۳۶۰	۷/۳۳۰
۲۰۱۳	۳/۶۹۷	۷/۰۴۰
۲۰۱۴	۳/۷۵۶	۶/۹۸۴
۲۰۱۵	۳/۹۷۵	۶/۹۳۵
۲۰۱۶	۳/۵۸۵	۷/۲۵۸
۲۰۱۷	۴/۱۹۵	۷/۲۳۵
۲۰۱۸	۴/۶۸۳	۹/۹۴۲
۲۰۱۹	۴/۵۳۲	۱۰/۳۱۵
۲۰۲۰	۵/۴۲۷	۱۰/۷۸۷
همه سالها	۴/۲۹۴	۹/۲۲۰

مقادیر ماهانه توزیع ویبول برای ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در جدول ۴ ارائه شده است. بیشترین و کمترین مقدار k در ماه‌های جولای و دسامبر و به ترتیب با مقادیر $۳/۳۶۴$ و $۱/۶۳۴$ اتفاق افتاده است. برای دوره مورد بررسی بیشترین مقدار c در جولای با مقدار $۱۰/۶۹۵$ و کمترین مقدار آن در ژانویه با مقدار $۳/۵۱۲$ متر بر ثانیه محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر چگالی توان باد در جولای ($۷۱۸/۵۵۳ \text{ W/m}^2$) رخ می‌دهد و رفته‌رفته مقدار آن کاهش یافته و در ژانویه به کمترین میزان ($۴۰/۹۷۴ \text{ W/m}^2$) می‌رسد. سرعت نامی باد، سرعت متوسط باد و چگالی انرژی باد نیز دارای روندی مشابه می‌باشند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، سرعت باد، از ماه می تا آگوست افزایش می‌یابد و با شدت کمتری در سپتامبر و اکتبر ادامه می‌یابد که منجر به افزایش نیروی باد در این ماه‌ها می‌شود. Pishgar-Komleh & Akram, (2017) نیز نتایج مشابهی را برای ایستگاه زابل در دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۲۰ ارائه نمودند. حمیدیان پور و همکاران (۱۳۹۵) بیان کردند که میانگین سرعت باد در ایستگاه زابل در طی دوره گرم سال افزایش یافته و به حدود ۹ متر بر ثانیه می‌رسد که با نتایج این پژوهش نیز همخوانی دارد.

میزان ساعات موجودیت باد در یک مکان از رابطه ۱۶ محاسبه می‌گردد (امیدوار و دهقان طرزجانی، ۱۳۹۱):

$$WE_{h/y} = \left(\frac{\sum f_i}{N} \right) t \quad (16)$$

در رابطه ۱۶ پارامتر WF موجودیت باد (hr/year)، f_i فراوانی رده‌های سرعت باد، N طول دوره آماری مورد بررسی و t نیز فاصله زمانی بین برداشت داده‌های باد (hr) می‌باشد.

جدول ۳. مؤلفه‌های سالانه باد برای ایستگاه زابل در دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۰ در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین

سال	k	c (m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	\tilde{V} (m/s)	P/A (W/m ²)	E/A (KW h/m ² /Year)
۲۰۰۱	۱/۷۱۸	۷/۸۵۸	۴/۷۳۱	۱۲/۳۱۴	۶/۹۸۸	۴۷۶/۳۷۲	۴۱۷۳/۰۲۲
۲۰۰۲	۱/۷۱۵	۷/۲۵۳	۴/۳۵۵	۱۱/۳۸۳	۶/۶۲۱	۳۷۵/۶۶۹	۳۲۹۰/۸۶۱
۲۰۰۳	۱/۷۱۰	۷/۶۸۰	۴/۵۹۲	۱۲/۰۸۰	۶/۸۶۹	۴۴۷/۸۴۳	۳۹۲۳/۱۰۲
۲۰۰۴	۱/۷۶۹	۷/۷۴۷	۴/۸۳۹	۱۱/۸۷۸	۶/۸۲۱	۴۳۸/۳۳۹	۳۸۳۹/۸۴۸
۲۰۰۵	۱/۹۵۹	۷/۳۸۳	۵/۱۲۷	۱۰/۵۷۴	۶/۶۵۹	۳۳۵/۱۶۳	۲۹۳۶/۰۲۹
۲۰۰۶	۱/۹۸۷	۷/۴۰۱	۵/۲۰۴	۱۰/۵۰۷	۶/۴۳۶	۳۳۲/۳۲۶	۲۹۱۱/۱۷۷
۲۰۰۷	۱/۹۸۵	۷/۰۹۶	۴/۹۸۵	۱۰/۰۸۱	۶/۴۱۶	۲۹۳/۲۸۵	۲۵۶۹/۱۷۶
۲۰۰۸	۱/۷۸۷	۶/۵۱۲	۴/۱۱۵	۹/۹۱۵	۶/۰۵۲	۲۵۶/۹۷۹	۲۲۵۱/۱۳۸
۲۰۰۹	۱/۶۴۶	۵/۲۹۸	۳/۰۰۲	۸/۵۸۹	۵/۴۷۴	۱۵۵/۶۲۹	۱۳۶۳/۳۰۷
۲۰۱۰	۱/۶۶۷	۵/۴۵۳	۳/۱۴۶	۸/۷۵۲	۵/۴۹۹	۱۶۶/۴۸۸	۱۴۵۸/۴۳۱
۲۰۱۱	۱/۷۲۳	۵/۱۴۴	۳/۱۰۷	۸/۰۴۵	۵/۳۲۷	۱۳۳/۱۴۷	۱۱۶۶/۳۷۰
۲۰۱۲	۱/۷۷۷	۵/۲۴۰	۳/۲۸۹	۸/۰۱۱	۵/۳۴۵	۱۳۴/۸۹۴	۱۱۸۱/۶۶۹
۲۰۱۳	۱/۶۸۱	۵/۱۸۷	۳/۰۳۱	۸/۲۶۸	۵/۳۶۸	۱۴۱/۴۵۶	۱۲۳۹/۱۵۵
۲۰۱۴	۱/۸۷۶	۵/۰۸۹	۳/۳۹۱	۷/۴۹۳	۵/۳۷۰	۱۱۵/۳۲۹	۱۰۱۰/۲۸۴
۲۰۱۵	۱/۷۰۴	۵/۴۹۷	۳/۲۷۲	۸/۶۷۰	۵/۵۴۳	۱۶۵/۰۵۷	۱۴۴۵/۸۹۹
۲۰۱۶	۱/۶۵۹	۵/۳۷۳	۳/۰۸۰	۸/۶۵۵	۵/۴۱۹	۱۶۰/۳۹۹	۱۴۰۵/۰۹۲
۲۰۱۷	۱/۶۷۲	۵/۳۸۰	۳/۱۱۹	۸/۶۱۲	۵/۷۱۴	۱۵۹/۱۳۳	۱۳۹۴/۰۰۸
۲۰۱۸	۱/۷۲۰	۷/۸۶۲	۴/۷۳۹	۱۲/۳۱۱	۷/۳۱۳	۴۷۶/۴۵۷	۴۱۷۳/۷۶۵
۲۰۱۹	۱/۷۲۸	۷/۸۷۳	۴/۷۷۴	۱۲/۲۸۵	۷/۴۲۳	۴۷۵/۳۲۳	۴۱۶۳/۸۲۹
۲۰۲۰	۱/۷۳۸	۷/۹۴۷	۴/۸۵۵	۱۲/۳۴۷	۸/۱۰۷	۴۸۴/۹۱۰	۴۲۴۷/۸۱۱
همه سال‌ها	۱/۷۷۱	۷/۳۴۶	۴/۵۷۵	۱۱/۲۸۹	۶/۷۵۲	۳۸۶/۱۲۹	۳۳۸۲/۴۸۹

جدول ۴. مؤلفه‌های ماهانه باد برای ایستگاه زابل در دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۰ در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین

ماه	k	c (m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	\tilde{V} (m/s)	P/A (W/m ²)	E/A (KW h/m ² /Month)
ژانویه	۱/۷۶۵	۳/۵۱۲	۳/۸۰۴	۹/۳۸۴	۳/۳۹۴	۴۰/۹۷۴	۲۹/۵۰۲
فوریه	۱/۶۷۲	۴/۴۳۸	۴/۰۴۷	۱۱/۱۷۴	۴/۳۱۹	۸۹/۲۰۵	۶۴/۲۲۸
مارس	۱/۶۵۴	۴/۰۸۰	۳/۸۱۳	۱۰/۷۹۰	۴/۱۱۴	۷۰/۶۶۰	۵۰/۸۷۵
آوریل	۱/۷۲۳	۴/۷۳۶	۴/۳۱۵	۱۱/۱۷۱	۴/۶۸۹	۱۰۳/۸۹۲	۷۴/۸۰۳
می	۱/۸۱۴	۶/۲۰۲	۵/۶۰۹	۱۳/۱۴۱	۶/۳۵۱	۲۱۷/۶۵۳	۱۵۶/۷۱۰
جون	۲/۳۰۴	۸/۸۱۷	۸/۹۱۱	۱۴/۹۶۲	۹/۲۱۳	۴۹۰/۴۲۸	۳۵۳/۱۰۸
جولای	۳/۳۶۴	۱۰/۶۹۵	۱۱/۸۹۳	۱۵/۱۷۳	۱۰/۹۸۷	۷۱۸/۵۵۳	۵۱۷/۳۵۸
اگوست	۲/۷۸۷	۹/۸۳۳	۱۰/۵۹۵	۱۵/۰۸۹	۱۰/۲۹۴	۶۱۱/۸۰۲	۴۴۰/۴۹۷
سپتامبر	۲/۱۲۵	۷/۷۹۴	۷/۶۶۵	۱۴/۱۲۷	۷/۹۷۶	۳۶۳/۰۱۱	۲۶۱/۳۶۸
اکتبر	۱/۷۸۳	۵/۵۹۸	۵/۱۱۱	۱۲/۳۶۵	۵/۳۴۱	۱۶۳/۶۹۶	۱۱۷/۸۶۱
نوامبر	۱/۷۶۴	۴/۲۶۶	۴/۰۳۵	۹/۹۶۴	۳/۶۹۵	۷۳/۴۹۳	۵۲/۹۱۵
دسامبر	۱/۶۳۴	۳/۸۶۲	۳/۶۱۶	۱۰/۵۲۶	۳/۴۲۵	۶۰/۹۸۲	۴۳/۹۰۷

با کمک رابطه ۱۶ میزان کل ساعت موجودیت باد در ایستگاه زابل برابر ۷۴۸۴ ساعت در سال محاسبه گردید. توربین‌های بادی با دو سرعت: (۱) سرعت باد شروع به بازدهی نیرو (Cut-in speed) و (۲) سرعت بادی که توربین برای جلوگیری از آسیب پره‌ها موازی باد قرار گرفته و متوقف می‌شود (Cut-out speed)، طراحی می‌شوند (کهخامقدم و دلبری، ۱۳۹۶). سرعت باد که برای شروع بازدهی نیرو لازم است برابر ۳ متر بر ثانیه و همچنین سرعت توقف بیشتر توربین‌های بادی معادل ۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد (Weisser, 2003). خلاصه مقادیر مشاهدات و اندازه‌گیری‌های آماری سرعت باد در ایستگاه زابل طی دوره آماری موردبررسی به‌منظور برآورد مقادیر احتمال مدل ویبول، در جدول ۵ آورده شده است. بر اساس جدول ۵ احتمال وزش باد با سرعت بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه در زابل در ارتفاع ۱۰ متری حدود ۷۴ درصد است که معادل ۵۵۳۷ ساعت در سال می‌باشد و تقریباً با میانگین وجود باد با سرعت بیش از ۳ متر بر ثانیه برابر است.

با استفاده از قانون یک‌هفتم نیرو می‌توان سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری را به هر ارتفاع دیگری تبدیل نمود و این یکی از مزایای استفاده از تابع توزیع ویبول می‌باشد (Bagiorgas et al., 2007).

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{1/7} \quad (17)$$

در این رابطه C_1 و C_2 پارامترهای مقیاس تابع توزیع ویبول به ترتیب در ارتفاع‌های Z_1 و Z_2 می‌باشند. به‌دلیل ناچیز بودن تغییرات پارامتر شکل با ارتفاع، در تجزیه و تحلیل پتانسیل انرژی باد، پارامتر شکل مستقل از ارتفاع فرض می‌گردد (Al-Nassar et al., 2005). ارتفاع معمول محور بیشتر توربین‌های بادی ۴۰ متری از سطح زمین می‌باشد (Pishgar-Komleh & Akram, 2017; Mohammadi et al., 2022). لذا با استفاده از رابطه ۱۷، مؤلفه‌های سالانه و ماهانه باد در ایستگاه مورد مطالعه در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین محاسبه گردید و نتایج به ترتیب در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. سرعت بادی که در آن چگالی انرژی باد در بالاترین مقدار خود باشد به‌عنوان سرعت باد دارای حداکثر انرژی در نظر گرفته می‌شود (کهخامقدم و دلبری، ۱۳۹۶). در این پژوهش بیشترین و کمترین مؤلفه مذکور در مقیاس سالانه به ترتیب معادل ۱۵/۰۵۱ و ۹/۱۳۳ است که در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۴ رخ داده است. در مقیاس ماهانه نیز دارای روند تغییرات در حدفاصل ۱۴/۹۷۷ و ۶/۵۷۶ بوده که به ترتیب در ماه‌های جولای و ژانویه به وقوع پیوسته است.

عملکرد اقتصادی توربین‌های بادی مستلزم حداقل ۴۰۰۰ ساعت در سال می‌باشد (امیدوار و دهقان طرزجانی، ۱۳۹۱). با توجه به سرعت شروع به کار و توقف توربین‌های بادی (به ترتیب ۳ و ۲۵ متر بر ثانیه) و همچنین بر اساس رابطه ۲۴، احتمال وزش بادهایی با سرعت بین این دو مقدار در ارتفاع ۴۰ متری برای ایستگاه مورد مطالعه، بیش از ۸۰ درصد از کل ساعات موجودیت باد (معادل ۷۴۸۴ ساعت در سال) محاسبه گردید. لذا کارکرد اقتصادی توربین‌های بادی در ایستگاه زابل برابر با ۵۹۸۷ ساعت در سال می‌باشد. دلبری و همکاران (۱۳۹۵) اظهار داشتند که از میان ۱۰۴ ایستگاه سینوپتیک موردبررسی در ایران، زابل دارای بیشترین درصد ساعاتی از سال است که سرعت باد بیش از ۴ متر بر ثانیه می‌باشد و لذا مکانی مناسب برای بهره‌گیری از انرژی بادی محسوب می‌شود. کهخامقدم و دلبری (۱۳۹۶) نیز نشان دادند که در میان ایستگاه‌های موردبررسی، زابل دارای بیشترین احتمال وقوع باد با سرعت‌های ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین می‌باشد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

جدول ۵. اندازه گیری آماری سرعت باد برای ایستگاه زابل در دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۰

رده های سرعت	سرعت میانه رده های سرعت	فراوانی	احتمال	احتمال تجمعی	احتمال بر حسب مدل ویبول
V (m/s)	V _i (m/s)	f _i	P (v _i)	P (v)	P _w (v _i)
۰/۵-۱/۵	۱	۲۸۴	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۵۷	۰/۰۵۰۴
۱/۵-۲/۵	۲	۶۰۱۷	۰/۱۲۰۶	۰/۱۲۶۲	۰/۰۸۰۱
۲/۵-۳/۵	۳	۶۶۸۴	۰/۱۳۴۰	۰/۲۶۰۳	۰/۰۹۸۶
۳/۵-۴/۵	۴	۵۳۳۶	۰/۱۰۶۹	۰/۳۶۷۲	۰/۱۰۷۴
۴/۵-۵/۵	۵	۴۱۸۴	۰/۰۸۳۹	۰/۴۵۱۱	۰/۱۰۸۱
۵/۵-۶/۵	۶	۳۱۶۷	۰/۰۶۳۵	۰/۵۱۴۵	۰/۱۰۲۶
۶/۵-۷/۵	۷	۳۲۲۳	۰/۰۶۴۶	۰/۵۷۹۱	۰/۰۹۲۸
۷/۵-۸/۵	۸	۳۲۲۱	۰/۰۶۴۶	۰/۶۴۳۷	۰/۰۸۰۴
۸/۵-۹/۵	۹	۲۸۹۰	۰/۰۵۷۹	۰/۷۰۱۶	۰/۰۶۷۲
۹/۵-۱۰/۵	۱۰	۳۶۲۴	۰/۰۷۲۶	۰/۷۷۴۳	۰/۰۵۴۳
۱۰/۵-۱۱/۵	۱۱	۱۷۰۰	۰/۰۳۴۱	۰/۸۰۸۳	۰/۰۴۲۶
۱۱/۵-۱۲/۵	۱۲	۲۴۳۴	۰/۰۴۸۸	۰/۸۵۷۱	۰/۰۳۲۴
۱۲/۵-۱۳/۵	۱۳	۱۹۰۶	۰/۰۳۸۲	۰/۸۹۵۳	۰/۰۲۳۹
۱۳/۵-۱۴/۵	۱۴	۱۴۷۴	۰/۰۲۹۵	۰/۹۲۴۹	۰/۰۱۷۲
۱۴/۵-۱۵/۵	۱۵	۱۳۲۹	۰/۰۲۶۶	۰/۹۵۱۵	۰/۰۱۲۱
۱۵/۵-۱۶/۵	۱۶	۷۵۰	۰/۰۱۵۰	۰/۹۶۶۵	۰/۰۰۸۳
۱۶/۵-۱۷/۵	۱۷	۵۶۴	۰/۰۱۱۳	۰/۹۷۷۸	۰/۰۰۵۵
۱۷/۵-۱۸/۵	۱۸	۴۸۴	۰/۰۰۹۷	۰/۹۸۷۵	۰/۰۰۳۶
۱۸/۵-۱۹/۵	۱۹	۱۴۹	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹۰۵	۰/۰۰۲۳
۱۹/۵-۲۰/۵	۲۰	۲۳۵	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹۵۲	۰/۰۰۱۴
۲۰/۵-۲۱/۵	۲۱	۵۱	۰/۰۰۱۰	۰/۹۹۶۳	۰/۰۰۰۹
۲۱/۵-۲۲/۵	۲۲	۷۷	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹۷۸	۰/۰۰۰۵
۲۲/۵-۲۳/۵	۲۳	۴۲	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۰۳
۲۳/۵-۲۴/۵	۲۴	۲۰	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹۰	۰/۰۰۰۲
۲۴/۵-۲۵/۵	۲۵	۲۷	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۰۱
۲۵/۵-۲۶/۵	۲۶	۱۰	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۱
۲۶/۵-۲۷/۵	۲۷	۶	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۰
۲۷/۵-۲۸/۵	۲۸	۵	۰/۰۰۰۱	۱/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
مجموع		۴۹۸۹۳	۱		

Manwell et al., (2002) ویژگی های باد را به شرح زیر طبقه بندی نموده اند:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P}{A} < 100 \text{ W/m}^2 \\ \frac{P}{A} \approx 400 \text{ W/m}^2 \\ \frac{P}{A} > 700 \text{ W/m}^2 \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{ضعیف} \\ \text{خوب} \\ \text{عالی} \end{array} \quad (18)$$

با توجه به طبقه بندی (Manwell et al., 2002)، ایستگاه زابل مکان مناسبی برای نصب توربین بادی در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین محسوب می شود. کهمخامقدم و دلبری (۱۳۹۶) نیز نشان دادند که از میان ایستگاه های مورد بررسی و بر اساس طبقه بندی (Manwell et al., 2002)، ایستگاه زابل در دو ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری از سطح زمین مکانی مناسب برای نصب توربین بادی می باشد. نتایج مشابه دیگر در تحقیقات صورت گرفته نیز نشان می دهد که ایستگاه زابل مکان

مناسی جهت نصب توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ است (Rahmani et al., 2014; Pishgar-Komleh & Akram, 2017).

جدول ۶. مؤلفه‌های سالانه باد برای ایستگاه زابل در دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۰ در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین

سال	k	c (m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	\bar{V} (m/s)	P/A (W/m ²)	E/A (KW h/m ² /Year)
۲۰۰۱	۱/۷۱۸	۷/۸۵۸	۵/۷۶۷	۱۵/۰۱۱	۸/۵۱۸	۸۶۲/۹۲۳	۷۵۵۹/۲۱۰
۲۰۰۲	۱/۷۱۵	۷/۲۵۳	۵/۳۰۹	۱۳/۸۷۶	۸/۰۷۱	۶۸۰/۵۰۵	۵۹۶۱/۲۲۱
۲۰۰۳	۱/۷۱۰	۷/۶۸۰	۵/۵۹۸	۱۴/۷۲۶	۸/۳۷۴	۸۱۱/۲۴۳	۷۱۰۶/۴۹۳
۲۰۰۴	۱/۷۶۹	۷/۷۴۷	۵/۸۹۹	۱۴/۴۸۰	۸/۳۱۴	۷۹۴/۰۲۸	۶۹۵۵/۶۸۲
۲۰۰۵	۱/۹۵۹	۷/۲۸۳	۶/۲۵۰	۱۲/۸۹۰	۸/۱۱۷	۶۰۷/۱۳۰	۵۳۱۸/۴۶۲
۲۰۰۶	۱/۹۸۷	۹/۰۲۱	۶/۳۴۳	۱۲/۸۰۸	۷/۸۴۶	۶۰۱/۹۹۱	۵۲۷۳/۴۴۵
۲۰۰۷	۱/۹۸۵	۸/۶۵۰	۶/۰۷۶	۱۲/۲۸۹	۷/۸۲۱	۵۳۱/۲۷۰	۴۶۵۳/۹۲۸
۲۰۰۸	۱/۷۸۷	۷/۹۳۹	۵/۰۱۷	۱۲/۰۸۶	۷/۳۷۸	۴۶۵/۵۰۴	۴۰۷۷/۸۱۷
۲۰۰۹	۱/۶۴۶	۶/۴۵۸	۳/۶۵۹	۱۰/۴۷۰	۶/۶۷۳	۲۸۱/۹۱۳	۲۴۶۹/۵۶۰
۲۰۱۰	۱/۶۶۷	۶/۶۴۷	۳/۸۳۵	۱۰/۶۶۸	۶/۷۰۳	۳۰۱/۵۸۳	۲۶۴۱/۸۷۱
۲۰۱۱	۱/۷۲۳	۶/۲۷۱	۳/۷۸۸	۹/۸۰۷	۶/۴۹۳	۲۴۱/۱۸۹	۲۱۱۲/۸۱۷
۲۰۱۲	۱/۷۷۷	۶/۳۸۸	۴/۰۰۹	۹/۷۶۵	۶/۵۱۶	۲۴۴/۳۵۳	۲۱۴۰/۵۳۱
۲۰۱۳	۱/۶۸۱	۶/۳۲۳	۳/۶۹۵	۱۰/۰۷۸	۶/۵۴۴	۲۵۶/۲۴۰	۲۲۴۴/۶۶۴
۲۰۱۴	۱/۸۷۶	۶/۲۰۳	۴/۱۳۳	۹/۱۳۳	۶/۵۴۶	۲۰۸/۹۱۳	۱۸۳۰/۰۷۷
۲۰۱۵	۱/۷۰۴	۶/۷۰۱	۳/۹۸۹	۱۰/۵۶۹	۶/۷۵۷	۲۹۸/۹۹۲	۲۶۱۹/۱۷۰
۲۰۱۶	۱/۶۵۹	۶/۵۵۰	۳/۷۵۴	۱۰/۵۵۱	۶/۶۰۶	۲۹۰/۵۵۴	۲۵۴۵/۲۵۱
۲۰۱۷	۱/۶۷۲	۶/۵۵۸	۳/۸۰۲	۱۰/۴۹۹	۶/۹۶۵	۲۸۸/۲۶۲	۲۵۲۵/۱۷۲
۲۰۱۸	۱/۷۲۰	۹/۵۸۴	۵/۷۷۶	۱۵/۰۰۸	۸/۹۱۵	۸۶۳/۰۷۷	۷۵۶۰/۵۵۵
۲۰۱۹	۱/۷۲۸	۹/۵۹۷	۵/۸۲۰	۱۴/۹۷۶	۹/۰۴۹	۸۶۱/۰۲۳	۷۵۴۲/۵۵۸
۲۰۲۰	۱/۷۳۸	۹/۶۸۸	۵/۹۱۸	۱۵/۰۵۱	۹/۸۸۳	۸۷۸/۳۸۹	۷۶۹۴/۶۸۷
همه سال‌ها	۱/۷۷۱	۷/۵۷۱	۵/۵۷۷	۱۳/۷۶۱	۸/۱۲۹	۶۹۹/۴۵۲	۶۱۲۷/۲۰۱

جدول ۷. مؤلفه‌های ماهانه باد برای ایستگاه زابل در دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۰ در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین

ماه	k	c (m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	\bar{V} (m/s)	P/A (W/m ²)	E/A (KW h/m ² /Month)
ژانویه	۱/۷۶۵	۴/۲۸۱	۲/۶۶۶	۶/۵۷۶	۴/۱۳۷	۷۴/۲۲۳	۵۳/۴۴۰
فوریه	۱/۶۷۲	۵/۴۰۸	۳/۱۳۵	۸/۶۵۷	۵/۲۶۵	۱۶۱/۵۹۰	۱۱۶/۳۴۵
مارس	۱/۶۵۴	۴/۹۷۶	۲/۸۴۰	۸/۰۳۵	۵/۰۱۵	۱۲۷/۹۹۸	۹۲/۱۵۸
آوریل	۱/۷۲۳	۵/۷۷۳	۳/۴۸۸	۹/۰۲۹	۵/۷۱۶	۱۸۸/۱۹۶	۱۳۵/۵۰۱
می	۱/۸۱۴	۷/۵۶۰	۴/۸۶۱	۱۱/۳۸۸	۷/۷۴۲	۳۹۴/۲۶۷	۲۸۳/۸۷۲
جون	۲/۳۰۴	۱۰/۷۴۸	۸/۳۹۵	۱۴/۰۹۷	۱۱/۲۳۱	۸۸۱/۳۸۵	۶۳۹/۶۳۷
جولای	۳/۳۶۴	۱۳/۰۳۷	۱۱/۷۳۹	۱۴/۹۷۷	۱۳/۳۹۴	۱۳۰/۱۶۲۱	۹۳۷/۱۶۷
اگوست	۲/۷۸۷	۱۲/۰۴۸	۱۰/۳۷۲	۱۴/۶۲۸	۱۲/۵۴۹	۱۱۰/۸/۲۴۶	۷۹۷/۹۳۷
سپتامبر	۲/۱۲۵	۹/۵۰۱	۷/۰۴۴	۱۲/۹۸۲	۹/۷۲۳	۶۵۷/۵۷۵	۴۷۳/۴۵۴
اکتبر	۱/۷۸۳	۶/۸۲۴	۴/۳۰۱	۱۰/۴۰۶	۶/۵۱۰	۲۹۶/۵۲۷	۲۱۳/۵۰۰
نوامبر	۱/۷۶۴	۵/۲۰۰	۳/۲۳۶	۷/۹۹۱	۴/۵۰۵	۱۳۳/۱۲۸	۹۵/۸۵۲
دسامبر	۱/۶۳۴	۴/۷۰۸	۲/۶۳۷	۷/۶۷۸	۴/۱۷۵	۱۱۰/۴۶۵	۷۹/۵۳۵

آزمون من - کندال و تخمین گر شیب سن

افزایش تغییرات آب و هوایی محققین را به سوی بررسی روند متغیرهای هواشناسی سوق داده است. در این راستا بررسی وجود یا عدم وجود روند در سری‌های زمانی با استفاده از آزمون‌های آماری یکی از روش‌های مرسوم برای بررسی و تحلیل این سری‌ها می‌باشد (پودینه و همکاران، ۱۳۹۷). بادها شدید یکی از پدیده‌هایی است که در نتیجه تغییر اقلیم رخ می‌دهد. نتایج صورت گرفته نشان می‌دهد که اگر این تغییرات پایدار باشند باعث مشکلات فراوان می‌شوند (Tuller, 2004). لذا در این پژوهش از دو روش متداول آزمون من - کندال و تخمین گر شیب سن جهت تحلیل روند سری زمانی استفاده گردید. در جدول ۸ مقادیر آماره آزمون من - کندال و آزمون سن در مقیاس ماهانه و سالانه برای تحلیل روند سرعت باد در ایستگاه زابل ارائه شده است. در مقیاس سالانه سرعت باد دارای روند مثبت معناداری در سطح ۵ درصد می‌باشد. نتایج معناداری روند به دست آمده از روش من - کندال با نتایج آزمون شیب سن مطابقت دارد.

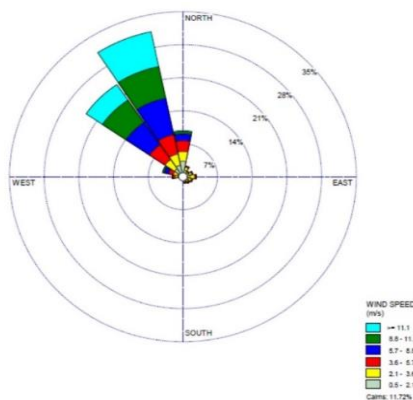
جدول ۸. مقادیر آماره آزمون من - کندال و آزمون سن برای سرعت باد در مقیاس ماهانه و سالانه

ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	جون	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
۲/۹۳*	۴/۴۵**	۱/۱۹	۲/۰۰*	۱/۰۵	۰/۱۰	۱/۱۲	۰/۹۸	۰/۸۸	۱/۷۶	۲/۶**	۴/۱۹**	۲/۵۳*
۰/۰۴**	۰/۰۵**	۰/۰۱	۰/۰۲*	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳**	۰/۰۵**	۰/۰۲*

** و * به ترتیب نشان‌دهنده سطوح معناداری ۱ و ۵ درصد است.

نمودار گلباد (Wind Rose)

آگاهی از جهت باد برای جهت‌دهی صحیح توربین بادی مهم است (Alamdari et al., 2012). بنابراین برای مشخص کردن سرعت، جهت و تواتر بادها، نمودار گلباد ایستگاه هواشناسی زابل در ارتفاع ۱۰ متری با استفاده از نرم‌افزار WRPLOT ترسیم گردید (شکل ۲). برای این منظور از داده‌های مربوط به بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ (پنج سال میانی دوره مورد مطالعه) استفاده گردید. نمودار گلباد ترسیم شده در ارتفاع مذکور برای تمامی سال‌ها در دوره مورد مطالعه (۲۰۲۰-۲۰۰۱)، نتایج مشابهی را ارائه نمود. نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که محتمل‌ترین بادها در ایستگاه مورد بررسی به سمت شمال غربی می‌وزد. (Rahmani et al., 2014) برای ایستگاه هواشناسی زابل به نتایج مشابهی دست یافتند. حمیدیان پور و همکاران (۱۳۹۵) اظهار داشتند که در طی ۴۲ سال مورد بررسی، باد غالب ایستگاه هواشناسی زابل به صورت شمال - شمال غربی می‌باشد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. حنفی و ایران پور (۱۳۹۶) بیان کردند که جهت باد غالب در ایستگاه زابل شمال غرب می‌باشد.



شکل ۲. گلباد ایستگاه هواشناسی زابل در ارتفاع ۱۰ متری

بحث

در حال حاضر نیروگاه بادی میل‌نادر به ظرفیت ۵۰ مگاوات شامل ۲۰ واحد توربین بادی در شهرستان نیمروز و در شمال غرب زابل به بهره‌برداری رسیده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پتانسیل باد بیشتری در ایستگاه زابل و شهرستان‌های پنج‌گانه سیستان (شامل نیمروز، زهک، هیرمند، هامون و زابل) که شرایط بسیار مشابه اقلیمی با زابل دارند، وجود دارد که هنوز مورد استفاده قرار نگرفته است. لذا استفاده از پتانسیل باد این منطقه محروم برای اشتغال صادرات برق به کشورهای مجاور مانند افغانستان دور از انتظار نیست. توسعه توربین‌های بادی علاوه بر اینکه به اشتغال جامعه محلی سیستان کمک می‌کند، با نصب توربین‌های بادی کوچک نیز می‌توان برق ساختمان‌ها عمومی و خانه‌های خصوصی را تأمین کرده و تأثیر اقتصادی مثبتی بر جامعه محلی داشت. ایجاد مزارع بادی همواره با چالش‌هایی مواجهه بوده است. یکی از این چالش‌ها مکان‌های خشن و توفانی همراه با گردوغبار می‌باشد که ممکن است عملکرد توربین‌ها را کاهش دهد و لازم است قبل از اجرای پروژه‌های بادی در چنین مکان‌هایی مطالعات کافی در این زمینه صورت گیرد. از دیگر این چالش‌ها، سرمایه‌گذاری اولیه بالا برای احداث نیروگاه‌های بادی می‌باشد که اگر با مشوق‌های حمایتی همراه باشد باعث افزایش جذابیت سرمایه‌گذاری در این بخش خواهد شد.

نتیجه‌گیری

تمرکز این پژوهش تعیین عوامل کلیدی در ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایستگاه زابل برای نصب توربین‌های بادی است. توربین‌های بادی معمولاً بر اساس سرعت Cut-in و Cut-out طراحی می‌شوند که برای اکثر توربین‌های بادی به ترتیب ۳ و ۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد. احتمال وزش باد با سرعت بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه در ایستگاه زابل در ارتفاع ۱۰ متری حدود ۷۴ درصد است که معادل ۵۵۳۷ ساعت در سال می‌باشد و تقریباً با میانگین وجود باد با سرعت بیش از ۳ متر بر ثانیه برابر است. سرعت باد از ماه می (۶/۲۷۷ متر بر ثانیه) تا آگوست (۱۰/۵۱۹ متر بر ثانیه) افزایش می‌یابد که منجر به روند افزایشی چگالی توان باد از ماه می (۲۱۷/۶۵۳ وات بر مترمربع) تا آگوست (۶۱۱/۸۰۲ وات بر مترمربع) در ارتفاع ۱۰ متری می‌شود. احتمال وزش بادهایی با سرعت بین دو مقدار مذکور در ارتفاع ۴۰ متری نیز، بیش از ۸۰ درصد از کل ساعات موجودیت باد برآورد گردید، بنابراین کارکرد اقتصادی توربین‌های بادی در ایستگاه زابل (۵۹۸۷ ساعت در سال) بیش از حداقل عملکرد اقتصادی معمول توربین‌های بادی می‌باشد. چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری تقریباً برابر ۷۰۰ وات بر مترمربع محاسبه گردید، بنابراین ایستگاه زابل مکان مناسبی جهت نصب توربین‌های بادی است. نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین سرعت باد در ۶ ماه گرم سال در منطقه مورد مطالعه بیش از ۹ متر بر ثانیه می‌باشد لذا با توجه به استاندارد بین‌المللی IEC 61400-1 برای این منطقه توربین‌های بادی تیپ II پیشنهاد می‌شوند. با این وجود، به منظور انتخاب بهترین توربین بادی بین مدل‌های مختلف، محاسبه شاخص هزینه انرژی ضروری می‌باشد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی ندارد.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمامی بخش‌ها و مراحل پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- امیدوار، کمال و دهقان طرزجانی، مهدی. (۱۳۹۱). پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد. *فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی*، ۲۷(۲)، ۱۶۸-۱۴۹.
- پودینه، اسمعیل؛ صلاحی، برومند؛ خسروی، محمود و حمیدیان‌پور، محسن. (۱۳۹۷). تحلیل روند تغییرات بیشینه سرعت بادهای ۱۲۰ روزه سیستان با آزمون‌های من- کندال و شیب تخمین سن. *پژوهش‌های دانش زمین*، ۹(۳۴)، ۱۱۴-۱۲۸. doi: 10.29252/esrj.9.2.114
- جانبازقبادی، غلامرضا. (۱۴۰۰). پتانسیل سنجی انرژی باد جهت تعیین مکان بهینه برای احداث توربین‌های بادی در استان مازندران. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۹(۳۴)، ۲۲۴-۲۰۹. doi: 10.30488/gps.2020.121201.2742
- جلالوند، مهرداد؛ باخدا، حسین و الماسی، مرتضی. (۱۳۹۳). پتانسیل سنجی امکان استفاده از انرژی باد برای پمپ‌های کشاورزی برقی در منطقه بروجرد. *نشریه مائین‌های کشاورزی*، ۴(۲)، ۳۷۷-۳۶۸. doi.org/10.22067/jam.v4i2.34821
- حنفی، علی و ایران‌پور، فخرالدین. (۱۳۹۶). ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل سرعت باد در کشور به‌منظور برنامه‌ریزی جهت تولید برق بادی. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۸(۳۱)، ۸۸-۷۳.
- حمیدیان‌پور، محسن؛ مفیدی، عباس و سلیقه، محمد. (۱۳۹۵). تحلیل ماهیت و ساختار باد سیستان. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۰(۲)، ۸۳-۱۰۹. doi: 20.1001.1.20080336.1395.10.2.7.4
- خمر، غلامعلی و راهدارپودینه، سمیه. (۱۳۹۹). مکان‌یابی بهینه کاربری‌های اداری- دولتی با استفاده از منطق فازی در محیط GIS، مطالعه موردی: شهر زاہل. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۰(۳۷)، ۷۲-۵۷. doi: 10.30488/gps.2020.158651.2948
- دلبری، معصومه؛ کهنخامقدم، پریسا؛ محمدی، احسان و احمدی، تاریخ. (۱۳۹۵). برآورد الگوی پراکنش مکانی سرعت باد برای پتانسیل تولید انرژی بادی در ایران. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۴۸(۲)، ۲۸۵-۲۶۵. doi: 10.22059/jphgr.2016.59368
- رحیم‌زاده، فاطمه و پدرام، مژده. (۱۳۸۹). کاهش میزان انرژی باد در اثر تغییرات بلندمدت سرعت باد در استان اصفهان. *نیوار*، ۳۴(۷۰-۷۱)، ۵۳-۶۲.
- سفیدپری، پریا؛ کیهانی، علیرضا؛ پیشگر کومله، سید حسن؛ خانعلی، مجید و اکرم، اسداله. (۱۳۹۵). پتانسیل سنجی تولید انرژی باد به کمک تحلیل آماری مشخصه‌های باد- مطالعه موردی: شهرستان اقلید در استان فارس. *مهندسی بیوسیستم ایران*، ۴۷(۳)، ۴۶۹-۴۸۳. doi: 10.22059/ijbse.2016.59353
- کریمی‌نظر، مریم؛ مقدم‌نیا، علیرضا و مساعدی، ابوالفضل. (۱۳۸۹). بررسی عوامل اقلیمی مؤثر بر وقوع خشک‌سالی (مطالعه موردی: منطقه زاہل). *مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک*، ۱۷(۱)، ۱۵۸-۱۴۵.
- کهنخامقدم، پریسا و دلبری، معصومه. (۱۳۹۶). ارزیابی امکان بهره‌گیری از انرژی باد در استان سیستان و بلوچستان. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۴۹(۳)، ۴۵۵-۴۴۱. doi: 10.22059/jphgr.2017.218706.1006952

References

- Alamdari, P., Nematollahi, O., & Mirhosseini, M. (2012). Assessment of wind energy in Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 836-860. doi:10.1016/j.rser.2011.09.007
- Al-Nassar, W., Alhajraf, S., Al-Enizi, A., & Al-Awadhi, L. (2005). Potential wind power generation in the State of Kuwait. *Renewable Energy*, 30(14), 2149-2161. doi: 10.1016/j.renene.2005.01.002
- Amiri, A., Panahi, R., & Radfar, S. (2016). Parametric study of two-body floating-point wave absorber. *Journal of marine science and application*, 15(01), 41-49. doi: 10.1007/s11804-016-1342-1
- Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Theoharopoulos, D., Matthopoulos, D., & Mihalakakou, G.K. (2007). Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece. *Energy Conversion and Management*, 48(5), 1640-1655. doi: 10.1016/j.enconman.2006.11.009
- Banu, P.A., & Bhadani, M. (2024). Wind energy feasibility and wind turbine selection studies for the city Surat, India. *Clean Energy*, 8(3), 166-173. doi: 10.1093/ce/zkae014
- Bousla, M., Haddi, A., El Mourabit, Y., Sadki, A., Mouradi, A., El Kharrim, A., Mobayen, S., Zhilenkov, A., & Bossoufi, B. (2023). Analysis and Comparison of Wind Potential by Estimating the Weibull Distribution Function: Application to Wind Farm in the Northern of Morocco. *Sustainability*, 15(20), 15087. doi.org/10.3390/su152015087
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). Wind energy handbook. *John Wiley & Sons*. doi: 10.1002/0470846062
- Celik, A.N. (2004). A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. *Renewable energy*, 29(4), 593-604. doi: 10.1016/j.renene.2003.07.002
- Cellura, M., Cirrincione, G., Marvuglia, A., & Miraoui, A. (2008). Wind speed spatial estimation for energy planning in Sicily: Introduction and statistical analysis. *Renewable Energy*, 33(6), 1237-1250. doi: 10.1016/j.renene.2007.08.012
- Chang, T.J., Wu, Y.T., Hsu, H.Y., Chu, C.R., & Liao, C.M. (2003). Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. *Renewable Energy*, 28(6), 851-871. doi: 10.1016/S0960-1481(02)00184-2
- Delbari, M., Kahkhamoghaddam, P., Mohammadi, E., & Ahmadi, T. (2016). Estimation of the spatial distribution pattern of wind speed for assessment of wind energy potential in Iran. *Physical Geography Research*, 48(2), 265-285. doi: 10.22059/jphgr.2016.59368 [In Persian].
- Eskin, N., Artar, H., & Tolun, S. (2008). Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 839-851. doi: 10.1016/j.rser.2006.05.016
- Fadai, D. (2007). The feasibility of manufacturing wind turbines in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(3), 536-542. doi: 10.1016/j.rser.2005.01.012
- Filom, S., Radfar, S., Panahi, R., Amini, E., & Neshat, M. (2021). Exploring wind energy potential as a driver of sustainable development in the southern coasts of Iran: The importance of wind speed statistical distribution model. *Sustainability*, 13(14), 7702. doi: 10.3390/su13147702
- Garcia, A., Torres, J.L., Prieto, E., & De Francisco, A. (1998). Fitting wind speed distributions: a case study. *Solar energy*, 62(2), 139-144. doi: 10.1016/S0038-092X(97)00116-3
- Hamidian Pour, M., Mofidi, A., & Salighe, M. (2016). Analysis of the nature and structure of Sistan wind. *Iranian Journal of Geophysics*, 10(2), 83-109. doi: 20.1001.1.20080336.1395.10.2.7.4 [In Persian].
- Hanafi, A., & Iranpour, F. (2017). Evaluation and zoning of wind speed potential in the country in order to plan for wind power generation. *Journal of Climate Research*, 8(31), 73-88. [In Persian].
- Hennessey, J.P. (1977). Some aspects of wind power statistics. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 16(2), 119-128. doi: 10.1175/1520-0450(1977)016<0119:SAOWPS>2.0.CO;2
- Heravi, G., Salehi, M.M., & Rostami, M. (2020). Identifying cost-optimal options for a typical residential nearly zero energy building's design in developing countries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(10), 2107-2128. doi: 10.1007/s10098-020-01962-4

- Jalalvand, M., Bakhoda, H., & Almassi, M. (2014). Wind energy potential assessment for electric pumps of agriculture in Broujerd. *Journal of Agricultural Machinery*, 4(2), 368-377. doi:10.22067/jam.v4i2.34821 [In Persian].
- Janbazghobadi, G. (2020). Potentiometric analysis of wind energy to determine the optimum location for wind turbines in Mazandaran province. *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 9 (34), 209-224. doi:10.30488/gps.2020.121201.2742 [In Persian].
- Justus, C.G., Hargraves, W.R., Mikhail, A., & Graber, D. (1978). Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 17(3): 350-353. doi:10.1175/1520-0450(1978)017<0350:MFEWSF>2.0.CO;2
- Kahkhamoghaddam, P., & Delbari, M. (2017). Evaluation of the feasibility of wind energy utilization in Sistan and Baluchestan province. *Physical Geography Research*, 49(3), 441-455. doi: 10.22059/jphgr.2017.218706.1006952 [In Persian].
- Kara, T., & Şahin, A.D. (2023). Implications of Climate Change on Wind Energy Potential. *Sustainability*, 15(20), 14822. doi.org/10.3390/su152014822
- Kariminazar, M., Moghaddammia, A. R., & Mosaedi, A. (2010). Investigation of climatic factors affecting occurrence of drought (Case study: Zabol region). *Journal of Water and Soil Conservation*, 17(1), 145-158. [In Persian].
- Kassem, Y., Camur, H., & Mosbah, A.A.S. (2023). Feasibility analysis of the wind energy potential in Libya using the RETScreen expert. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(4), 11277-11289. doi: 10.48084/etasr.6007
- Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods*. Griffin.
- Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhashti, 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. doi: 10.1016/j.energy.2009.09.009
- Khamar, G., & Rahdar Podineh, S. (2020). Optimum location of government-administrative uses using fuzzy logic in GIS environment. Case study: Zabol city. *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 10 (37), 57-72. doi: 10.30488/gps.2020.158651.2948 [In Persian].
- Kumar, P., & Yadav, A. K. (2024). Novel exploration of hub heights on economics and Weibull distribution methods for wind power potential in Indian sites. *Science and Technology for Energy Transition*, 79, 10. doi: 10.2516/stet/2024003
- Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., & Wallis, J.R. (1994). Hydro-climatological trends in the continental United States, 1948-88. *Journal of Climate*, 7(4), 586-607. doi:10.1175/1520-0442(1994)0072.0.CO;2
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., & Rogers, A.L. (2002). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons. doi: 10.1002/0470846127
- Mills, R. (2021). The Politics of Low-Carbon Energy in Iran and Iraq. *Low Carbon Energy in the Middle East and North Africa*, 19-56. doi: 10.1007/978-3-030-59554-8_2
- Mohamadi, H., Saeedi, A., Firoozi, Z., Zangabadi, S.S., & Veisi, S. (2021). Assessment of wind energy potential and economic evaluation of four wind turbine models for the east of Iran. *Heliyon*, 7(6). doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07234
- Mohammadi, S., Maleki, A., Ehsani, R., & Shakouri, O. (2022). Investigation of Wind energy potential in Zanjan province, Iran. *Renewable Energy Research and Applications*, 3(1), 61-70. doi: 10.22044/rera.2021.10682.1052
- 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. doi: 10.1016/j.rser.2013.11.016
- Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A.A., & Kalantar, V. (2011). Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2545-2556. doi: 10.1016/j.rser.2011.02.030
- Omidvar, K., & Dehghan Tezerjani, M. (2012). Evaluation of the wind power potential and wind characteristics for the generation of energy at Yazd synoptic stations. *Geographical Research*, 27(2), 149-168. [In Persian].

- Partal, T., & Kahya, E. (2006). Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(9), 2011-2026. doi: 10.1002/hyp.5993
- Pishgar-Komleh, S.H., & Akram, A. (2017). Evaluation of wind energy potential for different turbine models based on the wind speed data of Zabol region, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 34-40. doi: 10.1016/j.seta.2017.05.007
- Poudineh, E., Salahi, B., Khosravi, M. & Hamidianpour, M. (2017). Analyzing the trend of changes in the maximum wind speed of 120 days in Sistan with Mann-Kendall tests and the slope of age estimation. *Researches in Earth Sciences*, 9(34), 114-128. doi: 10.29252/esrj.9.2.114 [In Persian].
- Radfar, S., Panahi, R., Javaherchi, T., Filom, S., & Mazyaki, A.R. (2017). A comprehensive insight into tidal stream energy farms in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 323-338. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.037
- Rahimzadeh, F., & Pedram, M. (2010). Reduction of wind power due to long term variation of wind speed in Esfahan province. *NIVAR*, 34(70-71), 145-158. [In Persian].
- Rahmani, K., Kasaeian, A., Fakoor, M., Kosari, A., & Alavi, S. (2014). Wind power assessment and site matching of wind turbines in Lootak of Zabol. *International journal of renewable energy research*, 4(4), 965-976. doi: 10.20508/ijrer.v4i4.1700.g6434
- Sefeedpari, P., Keyhani, A., Pishgar Komleh, S.H., Khanali, M. & Akram, A. (2016). Evaluating the potential of wind energy generation through statistical analysis of wind characteristics- case study: Eqlid county of Fars province. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(3), 469-483. doi:10.22059/ijbse.2016.59353 [In Persian].
- Sen, P.K. (1968). On a class of aligned rank order tests in two-way layouts. *The Annals of Mathematical Statistics*, 39(4), 1115-1124. doi: 10.1214/aoms/1177698236
- Serrano, A., Mateos, V.L., & Garcia, J.A. (1999). Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2), 85-90. doi: 10.1016/S1464-1909(98)00016-1
- Stevens, M.J.M., & Smulders P.T. (1979). The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes, *Wind Engineering*, 3(2), 132-145.
- Tuller, S.E. (2004). Measured wind speed trends on the west coast of Canada. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(11), 1359-1374. doi:10.1002/joc.1073
- Von Krauland, A.K., & Jacobson, M.Z. (2024). India onshore wind energy atlas accounting for altitude and land use restrictions and co-located solar. *Cell Reports Sustainability*, 1(5). doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100083
- Weisser, D. (2003). A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the 'Weibull' density function. *Renewable Energy*, 28(11), 1803-1812. doi:10.1016/S0960-1481(03)00016-8
- Yaniktepe, B., Koroglu, T., & Savrun, M.M. (2013). Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Osmaniye, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 703-711. doi: 10.1016/j.rser.2013.01.005