پژوهش های جغرافیای طبیعی، دورهٔ ۴۹، شماره۳ ، پائیز ۱۳۹۶
ص.۴۴۱-۴۵۵

ارزیابی امکان بهره‌گیری از انرژی باد در استان سیستان و بلوچستان

پریسا کهخامقدم* – مربی و عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ آب و خاک، دانشگاه زابل
معصومه دلبری– دانشیار و عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ آب و خاک، دانشگاه زابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، تعیین پتانسیل انرژی باد و انتخاب نقاط بهینه برای احداث نیروگاه بادی با استفاده از آمار هشت ایستگاه سینوپتیک استان سیستان و بلوچستان است. بدین منظور، از داده‌های سه‌ساعتهٔ سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در طی دورهٔ آماری ۲۰۰۵ـ۲۰۱۴ استفاده شد. احتمال تجربی داده‌ها با استفاده از تابع توزیع ویبول محاسبه شد. سپس، با استفاده از قانون یک‌هفتم نیرو، اطلاعات باد در ارتفاع ۱۰ متری به ارتفاع ۵۰ متری تبدیل شد و پتانسیل انرژی باد در هر دو ارتفاع یادشده تحلیل شد. همچنین، بر اساس آمار بلندمدت، روند تغییرات زمانی سرعت باد در مقیاس ماهانه و سالانه بررسی شد. نتایج تحلیل روند نشان داد ایستگاه‌های ایرانشهر، زابل، زهک، و زاهدان به‌ترتیب دارای بیشترین روند مثبت معنی‌دار ماهانه‌اند. در مقیاس سالانه، فقط زابل و ایرانشهر دارای روند مثبت معنی‌دارند. از طرفی، نتایج نشان داد که ایستگاه‌های زابل، زهک، و کنارک قابلیت مناسبی برای استقرار توربین‌های تجاری دارند. ایستگاه زابل با حداکثر مقدار چگالی توان باد (۵۱۳ وات بر متر مربع) در ارتفاع ۵۰ متری و حداکثر احتمال موجودیت باد با سرعت بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه مناسب‌ترین مکان برای بهره‌برداری از انرژی باد تشخیص داده شد.

کلیدواژه‌ها: پتانسیل انرژی باد، تحلیل روند، توزیع ویبول، چگالی توان باد.

مقدمه

کشور ایران سرشار از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر است. موقعیت جغرافیایی کشور ایران موجب شده است که منبع بسیار بزرگی از انرژی‌های بادی و خورشیدی در آن موجود باشد. پهناورترین استان کشور واقع در جنوب‌شرقی آن سیستان و بلوچستان است که برخی از شهرستان‌های آن، مانند زابل، دارای بادهای شدیدی است که گاه سرعت آن‌ها به ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت می‌رسد (رفاهی، ۱۳۸۵: ۳۲۰).

نیاز به انرژی در چند دههٔ آینده به‌حدی افزایش خواهد یافت که استفاده از سوخت‌های فسیلی کافی نخواهد بود. از طرفی، احتراق سوخت‌های فسیلی آثار نامطلوبی مانند آلودگی اتمسفر و مشکلات زیست برجای می‌گذارد. از سویی، سوخت‌های فسیلی در همهٔ کشورها در دسترس نیست، ولی انرژی‌های تجدیدپذیر کم‌وبیش به‌صورت مساوی توزیع شده است. با توجه به مطالبی که ذکر شد، در چند دههٔ اخیر جست‌وجو برای یافتن سیستم‌های انرژی جای‌گزین جدید افزایش یافته است (سعیدی و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۵۵۸ـ۳۵۶۹). پژوهشگران زیادی پتانسیل‌سنجی باد را در نقاط مختلف دنیا

* نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۵۵۴۴۱۵۴۰ E-mail: keykhamoghadam.parisa@gmail.com

انجام داده‌اند (ادوکوگا و ادویل، ۱۹۹۲؛ ارنست و همکاران، ۱۹۷۸). در کشور ایران نیز تحقیقات ارزنده‌ای در این زمینه انجام شده است.

علمداری، با استفاده از توزیع ویبول، پتانسیل انرژی باد در ایران را برای سال ۲۰۰۷ و برای سه سطح ارتفاع ۱۰، ۳۰، و ۴۰ متری با استفاده از آمار ۶۸ ایستگاه ارزیابی کرد. نتایج پژوهش نشان داد مناطق شرق و شمال غربی ایران دارای پتانسیل خوبی برای نصب توربین‌های بادی می‌باشند؛ در حالی که مناطق مرکزی و جنوبی کشور از این پتانسیل برخوردار نیستند (علمداری و همکاران، ۲۰۱۲: ۸۳۶ـ۸۶۰). محمدی و همکاران پتانسیل انرژی باد را با استفاده از داده‌های سه‌ساعتهٔ سرعت و جهت باد پنج ایستگاه سینوپتیک (سرپل‌ذهاب، کرمانشاه، کنگاور، اسلام‌آبادغرب، و روانسر) در یک دورهٔ آماری ده‌ساله ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه سه ایستگاه روانسر، سرپل‌ذهاب، و کنگاور پتانسیل مناسبی برای تولید انرژی باد دارند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۹ـ۳۲). در پژوهشی پتانسیل انرژی باد برای لوتک- زابل در سه ارتفاع ۱۰، ۳۰، و ۴۰ متری برای دورهٔ سه‌ساله (۲۰۰۷ـ۲۰۰۹) ارزیابی شد. بر اساس مقادیر سرعت و چگالی توان باد، این منطقه محل مناسبی برای نصب توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ پیش‌بینی شد. همچنین، بین پنج توربین بادی مقایسه‌ای انجام شد؛ بالاترین ضریب ظرفیت سالانه به‌ترتیب با ارزش ۰٫۳۸۴ و ۰٫۳۶۴ برای توربین AWE52/900 و D4/48 مشخص شد (رحمانی و همکاران، ۲۰۱۴: ۹۶۵ـ۹۶۷). مصطفایی‌پور برای شهرستان زاهدان پتانسیل انرژی باد را به مدت پنج سال ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که برای این ایستگاه کارآمدترین گزینه از نظر هزینه، توربین بادی ۲٫۵ کیلو واتی است (مصطفایی‌پور و همکاران، ۲۰۱۴: ۶۴۱ـ۶۵۰). در پژوهشی توان‌سنجی نیروگاه بادی با روش فازی- ای. اچ. پی. برای استان سیستان و بلوچستان ارزیابی شد. در این مطالعه استان سیستان و بلوچستان، از نظر قابلیت احداث نیروگاه بادی، به چهار سطح عالی، خوب، متوسط، و ضعیف تقسیم شد. مناطق عالی برای احداث نیروگاه بادی در منطقهٔ مورد بررسی، در منطقهٔ شمال و شمال شرقی منطقهٔ مورد مطالعه در ایستگاه زابل شناسایی شدند (انتظاری و اسدی، ۱۳۹۴: ۶۷ـ۸۴).

از طرفی، بررسی تغییرات زمانی بلندمدت سرعت باد می‌تواند در تشخیص موجودیت و تداوم سرعت باد مناسب برای احداث نیروگاه‌های بادی و اطمینان از سرمایه‌گذاری در این زمینه کمک مؤثری بنماید. در پژوهشی روند تغییرات زمانی سرعت باد در گسترهٔ اقلیمی ایران در شبکه‌ای متشکل از ۴۰ ایستگاه سینوپتیک ایران مطالعه شد. ایستگاه‌ها معرف اقلیم‌های مختلف ایران در نظر گرفته شد. برای تحلیل روند تغییرات از دو روش غیرپارامتری من- کندال و اسپیرمن و دو روش پارامتری تحلیل رگرسیون و ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. بر اساس این مطالعه، مشخص شد که روند افزایشی سرعت باد در فصل زمستان بیشتر از سایر فصول و در فصل تابستان کمتر از سایر فصول بوده است. همچنین، بیشترین روند کاهشی سرعت باد در اقلیم نیمه‌خشک معتدل مشاهده شد (قهرمان و قره‌خانی، ۲۰۱۰: ۳۱ـ۴۳).

هدف از تحقیق حاضر بررسی قابلیت‌های انرژی باد و نیز امکان‌سنجی استفاده از آن در ایستگاه‌های سینوپتیک استان سیستان و بلوچستان با استفاده از آمار سرعت باد ده سال اخیر (۲۰۰۵ـ۲۰۱۴)، با توجه به روش مرسوم و استاندارد (تابع توزیع احتمال ویبول)، است. همچنین، وجود روند در سری زمانی سرعت باد با استفاده از روش‌های ناپارامتری من- کندال و تخمینگر شیب سن بررسی می‌شود. بدیهی است که نتایج حاصل از این پژوهش و ارائهٔ اطلاعات کلی در زمینهٔ انرژی باد در منطقهٔ مورد مطالعه می‌تواند در بررسی‌های بعدی و مطالعات تکمیلی کسب انرژی برق از نیروی باد مورد توجه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

این تحقیق بر اساس اطلاعات ثبت‌شدهٔ باد در هشت ایستگاه سینوپتیک استان سیستان و بلوچستان برای یک دورهٔ آماری ده‌ساله (۲۰۰۵ـ۲۰۱۴) انجام شد. تحلیل‌ها، بر مبنای داده‌های سرعت باد، با فواصل زمانی سه‌ساعته، که در ارتفاع ده‌متری از سطح زمین اندازه‌گیری شده، انجام گرفته است. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق با مثلث سیاه نشان داده شده است. برای بررسی روند تغییرات زمانی سرعت باد از آمار بلندمدت (بالای ۲۵ سال منتهی به سال ۲۰۱۴) میانگین ماهانه و سالانهٔ سرعت باد استفاده شد.

شکل ۱. موقعیت ۸ ایستگاه مورد بررسی در استان سیستان و بلوچستان

توزیع ویبول

برای توصیف توزیع سرعت باد، از مدل ریاضی تابع توزیع ویبول دوپارامتری استفاده شده است. نتایج بیشتر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که این تابع توزیع احتمال برای بررسی آماری باد بیشترین کاربرد را دارد. چندین روش برای محاسبهٔ پارامترهای این مدل (پارامترهای شکل و مقیاس) ارائه شده است (تکل و براون، ۱۹۷۸: ۵۵۶؛ دانیل و چن، ۱۹۹۱: ۱ـ۱۱). با این حال، تحقیقات نشان داده است که تفاوت معنی‌داری بین روش‌های گوناگون برای محاسبهٔ مقادیر پارامترها وجود ندارد (استیونس و اسمودرس، ۱۹۷۸: ۱۳۲ـ۱۴۵). در این تحقیق برای محاسبهٔ پارامترهای شکل و مقیاس از روش حداکثر درست‌نمایی[1] استفاده شده است. تابع توزیع احتمال ویبول به شکل رابطهٔ ۱ است:

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

رابطهٔ ۱

1. MaximumLikelihood

که در آن V سرعت باد (m/s) است. c و k پارامترهای توزیع ویبول دو پارامتری است که c معروف به پارامتر مقیاس است و واحد آن متر بر ثانیه (m/s) و k پارامتر شکل (بدون بعد) می‌باشند. تابع توزیع تجمعی نیز به صورت رابطهٔ ۲ است:

رابطهٔ ۲
$$F(V)=1-\exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}\right]$$

چنانچه از دو طرف رابطه دو مرتبه لگاریتم گرفته شود، رابطهٔ ۲ به صورت رابطهٔ ۳ نوشته می‌شود:

رابطهٔ ۳
$$Ln\left\{-Ln\left[1-F(V)\right]\right\}=kLn(V)-kLn(c)$$

رابطهٔ ۳ یک معادلهٔ خطی بین Ln(V) و Ln{-Ln[1-F(V)]} است که در آن k شیب و kLn(c) ° عرض از مبدأ است. احتمال اینکه سرعت باد بین مقادیر V_1 و V_2 باشد نیز از رابطهٔ ۴ محاسبه شدنی است.

رابطهٔ ۴
$$P\left(V_1\langle V\langle V_2\right)=\exp\left[-\left(\frac{V_1}{c}\right)^{k}\right]-\exp\left[-\left[\frac{V_2}{c}\right]^{k}\right]$$

در روش حداکثر درست‌نمایی پارامترهای شکل و مقیاس به صورت رابطهٔ ۵ تعریف می‌شود (سلورا و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۲۳۷ـ۱۲۵۰):

رابطهٔ ۵
$$c=\left[\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}V_j^{\,k}\right]^{1/k}$$

رابطهٔ ۶
$$k=\frac{n}{(1/c)\sum_{j=1}^{n}V_j^{k}\,lnV_j-\sum_{j=}^{n}lnV_j}$$

که در آن V_j هر یک از داده‌های سرعت باد در ایستگاه مورد نظر و n تعداد داده‌های مورد بررسی است. رابطهٔ ۶ یک معادلهٔ ضمنی است که برای حل آن باید از روش تکرار استفاده کرد. در حالتی که سرعت باد برابر با صفر است، تابع توزیع ویبول (رابطهٔ ۱) نمی‌تواند حالت واقعی سرعت باد را توصیف کند. بنابراین، بدین منظور، فقط از داده‌های غیر صفر استفاده می‌شود. برای محاسبهٔ همهٔ موارد مربوط به تابع ویبول از نرم‌افزار اکسل استفاده شده است.

با داشتن k و c مقادیر محتمل‌ترین سرعت باد (V_{mp}) و سرعت نامی باد (V_{op}) یا سرعت باد دارای حداکثر انرژی (متر بر ثانیه) با استفاده از رابطه‌های ۷ و ۸ برآوردشدنی است (چانگ همکاران، ۲۰۰۲: ۸۵۱ـ۸۷۱):

رابطهٔ ۷
$$V_{mp}=c\left(1-\frac{1}{k}\right)^{1/k}(m/s)$$

رابطهٔ ۸
$$V_{OP}=c\left(1+\frac{2}{k}\right)^{1/k}(m/s)$$

در این پژوهش برای محاسبهٔ چگالی توان باد (P/A) و چگالی انرژی باد در یک مکان (E/A) بر اساس تابع چگالی احتمال ویبول از روابط زیر استفاده شد (چانگ و همکاران، ۲۰۰۲: ۸۵۱ـ۸۷۱):

رابطهٔ ۹
$$\frac{P}{A}=\frac{1}{2}\rho c^{3}\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)$$

رابطهٔ ۱۰
$$\frac{E}{A}=\frac{1}{2}\rho c^{3}\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)\mathrm{T}$$

در اینجا دانسیتهٔ هوا برابر $۱/۲۲۵Kg/m^3$ است. دانسیتهٔ هوا تابعی از فشار و درجهٔ حرارت است که تغییرات مربوط به آن در تخمین قدرت ناشی از باد قابل اغماض است (کیهانی همکاران، ۲۰۱۰: ۱۸۸ـ۲۰۱). همین‌طور در آن $\Gamma(x)=\int_0^\infty e^{-t}t^{x-1}dt$ تابع گاما است. در اینجا، T دورهٔ زمانی به ساعت است. مثلاً، برای یک دورهٔ ماهانه ۷۲۰ و برای یک دورهٔ سالانه ۸۷۶۶ ساعت است.

آزمون من- کندال

در این پژوهش از آزمون ناپارامتری من- کندال (کندال، ۱۹۷۵) برای بررسی روند بلندمدت داده‌های سرعت باد در ایستگاه‌های منتخب استان سیستان و بلوچستان استفاده شد. مراحل محاسبهٔ آمارهٔ این آزمون به شرح زیر است (یو همکاران، ۲۰۰۲):

۱. استخراج پارامتر S با محاسبهٔ اختلاف بین تک‌تک مشاهدات با همدیگر و اعمال تابع علامت:

$$s=\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{j=k+1}^{n}sgn(x_j-x_k)$$ رابطهٔ ۱۱

که در این رابطه n تعداد مشاهدات سری است. x_j و x_k به‌ترتیب داده‌های j ام و kام سری می‌باشند. تابع علامت نیز به صورت رابطهٔ ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$sgn(x)=\begin{cases}+1 & if \quad (x_j-x_k)>0\\ 0 & if \quad (x_j-x_k)=0\\ -1 & if \quad (x_j-x_k)<0\end{cases}$$ رابطهٔ ۱۲

۲. محاسبهٔ واریانس S توسط یکی از رابطه‌های ۱۳ و ۱۴:

$$Var(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)-\sum_{t=1}^{m}t(t-1)(2t+5)}{18} \quad :n>10 \text{ اگر}$$ رابطهٔ ۱۳

$$Var(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad :n\le 10 \text{ اگر}$$ رابطهٔ ۱۴

که در این رابطه‌ها n تعداد داده‌های مشاهده‌ای و m معرف تعداد سری‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک دادهٔ تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌هایی با ارزش یکسان است.

۳. استخراج آمارهٔ من- کندال (Z) به کمک رابطهٔ ۱۵:

$$Z=\begin{cases}\frac{s-1}{\sqrt{Var(s)}} if S>0\\ 0 \quad if S=0\\ \frac{s+1}{\sqrt{Var(s)}} if S<0\end{cases}$$ رابطهٔ ۱۵

در یک آزمون دودامنه برای روندیابی سری داده‌ها فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که رابطهٔ ۱۶ برقرار باشد:

$$|Z|\le Z_{\alpha/2}$$ رابطهٔ ۱۶

که سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_α آمارهٔ توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α است که با توجه به دودامنه بودن آزمون از $\alpha/2$ استفاده شده است. در صورتی که آمارهٔ Z مثبت باشد، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی‌بودن آن، روند نزولی در نظر گرفته می‌شود.

تخمینگر شیب سن

در این پژوهش برای برآورد شیب خط روند در N جفت نمونه از داده‌ها (Q_i) از تخمینگر شیب سن استفاده شد (سن، ۱۹۶۸):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j-k} \; for \; i = 1, \dots, N$$ رابطهٔ ۱۷

که در این رابطه x_j و x_k به‌ترتیب مقادیر داده در زمان‌های j و k هستند $(j > k)$. اگر فقط یک داده در هر دورهٔ زمانی وجود داشت، در نتیجه $N = \frac{n(n-1)}{2}$ که n تعداد دوره‌های زمانی است. اگر چندین مشاهده در یک یا چند دورهٔ زمانی وجود داشت، در نتیجه $N < \frac{n(n-1)}{2}$ که n جمع کل تعداد مشاهدات است. مقادیر N از Q_i از کوچک‌تر به بزرگ‌تر طبقه‌بندی می‌شود و میانهٔ شیب یا تخمینگر شیب سن به صورت رابطهٔ ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[N+1/2]} & N \text{ فرد باشد} \\ \frac{Q_{[N/2]} + Q_{[N+2/2]}}{2} & N \text{ زوج باشد} \end{cases}$$ رابطهٔ ۱۸

علامت Q_{med} نشان‌دهندهٔ بازتاب روند داده‌هاست؛ در حالی که مقادیر آن شیب روند را نشان می‌دهد. برای تعیین اینکه آیا شیب از لحاظ آماری میانه مخالف صفر است، اول باید فاصلهٔ اطمینان Q_{med} را در سطح احتمال خاص به‌دست آورد. فاصلهٔ اطمینان دربارهٔ شیب زمان را می‌توان از رابطهٔ ۱۹ به‌دست آورد (گیلبرت، ۱۹۸۷؛ هولاندر و همکاران، ۲۰۱۳):

$$C_\alpha = Z_{1-\alpha/2}\sqrt{Var(s)}$$ رابطهٔ ۱۹

که محاسبهٔ Var(S) در روش من- کندال شرح داده شد و $Z_{1-\alpha/2}$ از جدول توزیع نرمال استاندارد به‌دست می‌آید. در این رابطه فاصلهٔ اطمینان در دو سطح معنی‌داری ۵ و ۱ درصد محاسبه شد. برای بررسی معنی‌داری Q_{med} به روش زیر عمل می‌شود:

ابتدا مقادیر Q_i ها مرتب می‌شود: $Q_{[1]}, Q_{[2]}, \dots, Q_{[n]}$. سپس مقادیر $Q_{min} = Q_{[M_1]} = Q_{\left[\frac{N-C_\alpha}{2}\right]}$ و $Q_{max} = Q_{[M_2+1]} = Q_{\left[\frac{N+C_\alpha}{2}+1\right]}$ محاسبه می‌شود (گیلبرت، ۱۹۸۷). در صورتی که Q_{min} و Q_{max} هم‌علامت باشند، آنگاه Q_{med} اختلاف معناداری با صفر دارد. به عبارت دیگر، روند وجود دارد. برآوردکنندهٔ شیب سن به طور گسترده‌ای در سری‌های زمانی آب و هواشناسی استفاده شده است.

یافته‌های تحقیق

جدول ۱ مقادیر میانگین ( ) و انحراف از معیار ( ) ماهانهٔ سرعت باد برای ایستگاه زاهدان (۲۰۰۵ـ۲۰۱۴) را نشان می‌دهد. روند ماهانهٔ سرعت متوسط باد برای سال‌های مختلف یکسان است. به‌طور کلی، دامنهٔ تغییرات سرعت باد بین ۲ تا ۵ متر بر ثانیه است که بیشترین آن در فوریهٔ ۲۰۱۰ با مقداری برابر ۵/۴۰۲ و کمترین در نوامبر ۲۰۱۰ با مقداری برابر ۱/۹۰۸ اتفاق افتاده است. بیشترین و کمترین مقدار انحراف از معیار نیز به‌ترتیب با مقادیر ۳/۹۱۷ و ۱/۵۲۵ نیز در همین ماه‌ها اتفاق افتاده است. برای تجزیه و تحلیل پارامترهای باد، نخست با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی مقادیر پارامتر شکل و مقیاس توزیع ویبول برای ایستگاه‌های مورد مطالعه تخمین زده شد. نتایج محاسبات مؤلفه‌های ماهانه و سالانهٔ باد در ایستگاه زاهدان در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است (به دلیل پرهیز از طولانی‌شدن مقاله، فقط نتایج مربوط به ایستگاه زاهدان نشان داده شده است).

جدول ۱. سرعت و انحراف از معیار باد برای ایستگاه زاهدان

ماه	مؤلفه	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	همهٔ سال‌ها
ژانویه		۳٫۴۹۶	۳٫۳۲۳	۳٫۲۰۲	۳٫۲۳۴	۳٫۲۰۶	۳٫۴۱۱	۳٫۱۴۵	۳٫۷۲۲	۴٫۱۶۵	۲٫۸۱۹	۳٫۳۷۲
		۳٫۴۵۷	۳٫۱۶۰	۲٫۶۷۷	۲٫۹۱۲	۲٫۷۲۷	۲٫۸۱۱	۲٫۸۳۶	۲٫۶۰۰	۲٫۹۶۴	۲٫۰۵۳	۲٫۸۲۰
فوریه		۴٫۰۲۲	۴٫۰۷۱	۳٫۹۲۰	۴٫۲۶۳	۴٫۰۴۵	۵٫۴۰۲	۴٫۵۴۰	۴٫۶۸۱	۴٫۵۴۰	۳٫۱۲۹	۴٫۲۶۱
		۳٫۴۲۴	۳٫۱۸۰	۳٫۱۶۸	۳٫۴۷۰	۳٫۴۱۷	۳٫۹۱۷	۳٫۲۵۴	۳٫۱۲۳	۲٫۸۱۲	۱٫۸۷۷	۳٫۱۶۴
مارس		۳٫۶۴۹	۳٫۵۸۱	۴٫۵۷۳	۳٫۴۰۳	۴٫۰۵۶	۳٫۳۵۱	۳٫۳۶۷	۵٫۲۸۶	۴٫۵۷۷	۳٫۸۹۵	۳٫۹۷۴
		۳٫۲۴۱	۲٫۸۱۷	۳٫۲۹۶	۲٫۹۵۰	۳٫۲۳۳	۲٫۷۳۴	۲٫۶۴۰	۳٫۷۷۴	۲٫۹۲۳	۲٫۶۰۳	۳٫۰۲۱
آوریل		۲٫۸۹۶	۳٫۱۳۳	۳٫۶۰۸	۳٫۵۲۵	۴٫۵۳۳	۳٫۰۸۸	۳٫۶۹۲	۳٫۳۷۵	۳٫۷۹۲	۴٫۱۷۵	۳٫۵۸۲
		۲٫۲۹۶	۲٫۵۳۸	۳٫۳۲۴	۲٫۶۲۷	۳٫۲۹۳	۲٫۲۷۹	۲٫۷۱۱	۲٫۱۶۱	۲٫۷۸۵	۲٫۸۷۴	۲٫۶۸۹
می		۳٫۴۴۸	۲٫۶۹۴	۳٫۴۴۰	۳٫۲۹۰	۳٫۲۸۲	۳٫۲۱۰	۳٫۴۵۶	۳٫۶۲۱	۳٫۵۶۰	۲٫۹۳۵	۳٫۲۹۴
		۳٫۰۳۲	۲٫۲۵۶	۲٫۳۶۵	۲٫۲۵۴	۲٫۶۰۸	۲٫۲۴۹	۲٫۵۲۷	۲٫۲۳۵	۲٫۳۲۵	۲٫۳۹۰	۲٫۴۲۴
جون		۳٫۰۸۸	۳٫۲۹۲	۳٫۶۳۸	۳٫۳۲۵	۳٫۵۵۸	۳٫۷۵۰	۳٫۸۷۵	۳٫۹۷۱	۳٫۶۳۳	۳٫۷۳۳	۳٫۵۸۶
		۲٫۴۶۶	۲٫۳۹۹	۲٫۷۶۷	۲٫۳۳۶	۲٫۳۰۳	۲٫۶۵۰	۲٫۵۷۹	۱٫۹۸۰	۲٫۲۰۹	۲٫۱۷۹	۲٫۳۸۷
جولای		۳٫۲۳۰	۳٫۰۶۰	۳٫۱۰۵	۳٫۹۴۰	۳٫۶۵۳	۳٫۶۸۵	۳٫۷۱۸	۳٫۵۷۷	۳٫۲۶۶	۳٫۳۰۶	۳٫۴۵۴
		۲٫۶۴۵	۲٫۴۳۱	۲٫۴۲۶	۲٫۵۸۲	۲٫۶۸۳	۲٫۳۵۱	۲٫۴۰۸	۲٫۰۰۷	۱٫۹۷۶	۲٫۰۵۵	۲٫۳۵۶
آگوست		۲٫۹۶۴	۲٫۶۹۰	۲٫۷۹۴	۳٫۳۰۶	۳٫۱۸۵	۲٫۹۸۴	۳٫۰۳۲	۲٫۶۸۵	۳٫۱۲۹	۳٫۲۲۲	۲٫۹۹۹
		۲٫۵۸۵	۲٫۰۹۲	۲٫۳۶۴	۲٫۴۳۵	۲٫۵۴۲	۲٫۰۹۱	۱٫۹۳۸	۱٫۹۴۲	۲٫۰۱۶	۱٫۸۴۹	۲٫۱۸۵
سپتام بر		۲٫۳۷۵	۲٫۷۴۲	۲٫۴۵۸	۲٫۹۳۸	۳٫۰۲۵	۲٫۸۴۶	۲٫۵۰۴	۳٫۰۹۶	۲٫۴۴۲	۲٫۹۸۳	۲٫۷۴۱
		۲٫۳۷۲	۲٫۰۵۲	۲٫۲۵۰	۲٫۲۴۸	۲٫۳۰۹	۲٫۱۰۳	۲٫۵۰۴	۱٫۸۵۳	۱٫۶۲۰	۱٫۹۱۲	۲٫۱۲۲
اکتبر		۲٫۳۷۹	۲٫۱۶۹	۲٫۱۹۰	۲٫۱۶۹	۲٫۳۳۵	۲٫۸۳۹	۲٫۴۲۷	۲٫۷۷۸	۲٫۳۵۹	۲٫۹۹۶	۲٫۴۶۴
		۲٫۱۱۸	۲٫۰۲۵	۱٫۸۵۵	۲٫۰۰۹	۱٫۹۸۵	۲٫۱۱۹	۱٫۷۸۰	۱٫۵۸۰	۱٫۶۸۵	۲٫۱۱۹	۱٫۹۲۸
نوامبر		۲٫۴۷۵	۲٫۹۵۸	۲٫۶۷۵	۲٫۳۳۸	۲٫۹۸۳	۱٫۹۰۸	۳٫۳۷۵	۲٫۸۸۸	۲٫۴۲۵	۳٫۳۱۷	۲٫۷۳۴
		۲٫۴۷۷	۲٫۶۳۰	۲٫۰۵۶	۲٫۰۲۰	۲٫۵۸۲	۱٫۵۲۵	۲٫۴۱۲	۱٫۹۹۲	۱٫۹۴۶	۲٫۴۷۵	۲٫۲۱۲
دسامبر		۲٫۴۸۰	۲٫۷۹۸	۳٫۰۹۳	۲٫۳۴۷	۲٫۶۷۳	۱٫۹۷۲	۲٫۴۷۲	۳٫۴۴۰	۳٫۱۵۳	۲٫۳۳۵	۲٫۶۷۶
		۲٫۵۲۱	۲٫۷۵۱	۳٫۰۴۵	۲٫۲۴۶	۲٫۲۱۷	۱٫۸۶۷	۱٫۶۶۶	۲٫۳۶۱	۲٫۱۳۱	۱٫۸۶۷	۲٫۲۶۷
سالانه		۳٫۰۴۲	۳٫۰۴۳	۳٫۲۲۴	۳٫۱۷۳	۳٫۳۷۸	۳٫۲۰۴	۳٫۳۰۰	۳٫۵۹۳	۳٫۴۲۰	۳٫۲۳۷	۳٫۲۶۱
		۲٫۷۲۰	۲٫۵۲۸	۲٫۶۳۳	۲٫۵۰۸	۲٫۶۵۸	۲٫۳۹۱	۲٫۴۳۸	۲٫۳۰۱	۲٫۲۸۳	۲٫۱۸۸	۲٫۴۶۵

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین مقدار k به‌ترتیب با مقادیر ۲٫۳۰۶ و ۱٫۸۱۲ در ماه‌های جولای و ژانویه رخ داده است. کمترین مقدار c برای دورهٔ آماری مورد نظر در اکتبر با مقداری معادل ۳٫۶۸۷ متر بر ثانیه و بیشترین مقدار آن نیز در فوریه با مقداری برابر ۵٫۶۶۲ متر بر ثانیه محاسبه شده است. نتایج حاکی از آن است که چگالی توان باد در فوریه دارای حداکثر مقدار (۱۶۴٫۱۵۱ W/m^2) است و سپس مقدار آن کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در اکتبر به حداقل خود، یعنی ۳۷٫۲۵۴W/m^2، می‌رسد. در پژوهشی که برای بازهٔ آماری ۲۰۰۳ـ۲۰۰۷ برای ایستگاه زاهدان صورت

گرفت چگالی توان باد با حداکثر و حداقلی در ماه‌های فوریه و اکتبر با مقادیری به‌ترتیب ۱۶۲٫۵۵۷W/m^2 و ۳۵٫۱۱۳ محاسبه شد (مصطفایی‌پور و همکاران، ۲۰۱۴: ۶۴۱ـ۶۵۰). سایر مؤلفه‌ها (سرعت نامی باد، سرعت متوسط باد، و چگالی انرژی باد) نیز دارای روندی مشابه روند C می‌باشند.

میانگین مقادیر مؤلفه‌های باد برای ایستگاه زاهدان، برای هر سال و به‌طور کلی برای ۱۰ سال دورهٔ آماری در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که متوسط سرعت باد برای همهٔ سال‌ها کمتر از ۳٫۶ متر بر ثانیه است و کمترین مقدار آن برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ با مقداری معادل ۳ متر بر ثانیه است. چگالی توان باد نیز در همهٔ سال‌های مورد بررسی کمتر از ۱۰۰ W/m^2 است. بنابراین، بر اساس تقسیم‌بندی PNL، ایستگاه زاهدان در کلاس ۱ قرار می‌گیرد (سعیدی و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۵۵۸ـ۳۵۶۹).

جدول ۲. مؤلفه‌های ماهانهٔ باد در ایستگاه زاهدان برای دورهٔ آماری ۲۰۰۵ـ۲۰۱۴ در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین

ماه	K	c(m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	(m/s)	P/A (W/m^2)	E/A (KW h/m^2 /Month)
ژانویه	۱٫۸۱۲	۴٫۸۳۰	۳٫۱۰۱	۷٫۲۸۰	۳٫۳۷۲	۱۰۲٫۹۱۲	۷۴٫۰۹۶
فوریه	۱٫۸۲۷	۵٫۶۶۲	۳٫۶۶۹	۸٫۴۸۸	۴٫۲۶۱	۱۶۴٫۱۵۱	۱۱۸٫۱۸۹
مارس	۱٫۸۲۷	۵٫۳۵۴	۳٫۴۶۹	۸٫۰۲۶	۳٫۹۷۴	۱۳۸٫۷۷۷	۹۹٫۹۱۹
آوریل	۱٫۸۹۷	۴٫۸۷۶	۳٫۲۸۵	۷٫۱۲۷	۳٫۵۸۲	۱۰۰٫۱۴۲	۷۲٫۱۰۲
می	۲٫۰۵۹	۴٫۵۶۸	۳٫۳۰۷	۶٫۳۵۱	۳٫۲۹۴	۷۵٫۳۲۰	۵۴٫۲۳۱
جون	۲٫۲۶۹	۴٫۸۲۳	۳٫۷۳۳	۶٫۳۷۲	۳٫۵۸۶	۸۱٫۲۳۶	۵۸٫۴۹۰
جولای	۲٫۳۰۶	۴٫۷۴۵	۳٫۷۰۹	۶٫۲۲۱	۳٫۴۵۴	۷۶٫۳۹۸	۵۵٫۰۰۷
آگوست	۲٫۲۶۶	۴٫۲۸۷	۳٫۳۱۶	۵٫۶۶۷	۲٫۹۹۹	۵۷٫۱۱۸	۴۱٫۱۲۵
سپتامبر	۲٫۲۰۲	۳٫۹۵۱	۳٫۰۰۱	۵٫۲۹۸	۲٫۷۴۱	۴۵٫۷۹۸	۳۲٫۹۷۵
اکتبر	۲٫۱۹۹	۳٫۶۸۷	۲٫۷۹۸	۴٫۹۴۷	۲٫۴۶۴	۳۷٫۲۵۴	۲۶٫۸۲۳
نوامبر	۲٫۰۱۱	۴٫۰۸۴	۲٫۹۰۲	۵٫۷۵۶	۲٫۷۳۴	۵۵٫۱۳۰	۳۹٫۶۹۳
دسامبر	۱٫۹۳۳	۴٫۰۷۷	۲٫۷۹۷	۵٫۸۸۹	۲٫۶۷۶	۵۷٫۳۰۳	۴۱٫۲۵۸

جدول ۳. مؤلفه‌های سالانهٔ باد در ایستگاه زاهدان برای دورهٔ آماری ۲۰۰۵ـ۲۰۱۴ در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین

سال	k	c(m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	(m/s)	P/A (W/m^2)	E/A (KW h/m^2 /Year)
۲۰۰۵	۱٫۹۰۸	۴٫۸۱۷	۳٫۲۶۳	۷٫۰۱۴	۳٫۰۴۲	۹۵٫۸۷۲	۸۳۹٫۸۳۹
۲۰۰۶	۲٫۰۴۲	۴٫۶۶۳	۳٫۳۵۵	۶٫۵۱۴	۳٫۰۴۳	۸۰٫۷۸۵	۷۰۷٫۶۸۱
۲۰۰۷	۱٫۸۹۸	۴٫۷۵۳	۳٫۲۰۴	۶٫۹۴۵	۳٫۲۲۴	۹۲٫۶۹۷	۸۱۲٫۰۲۶
۲۰۰۸	۱٫۹۴۱	۴٫۶۰۳	۳٫۱۷۰	۶٫۶۲۹	۳٫۱۷۳	۸۲٫۰۱۰	۷۱۸٫۴۰۹
۲۰۰۹	۱٫۹۱۰	۴٫۸۲۴	۳٫۲۷۲	۷٫۰۲۱	۳٫۳۷۸	۹۶٫۲۲۱	۸۴۲٫۸۹۸
۲۰۱۰	۱٫۸۹۹	۴٫۵۲۷	۳٫۰۵۳	۶٫۶۱۳	۳٫۲۰۴	۸۰٫۰۳۴	۷۰۱٫۰۹۴
۲۰۱۱	۱٫۹۳۷	۴٫۴۶۷	۳٫۰۷۰	۶٫۴۴۲	۳٫۳۰۰	۷۵٫۱۵۶	۶۵۷٫۳۶۷
۲۰۱۲	۱٫۹۲۰	۴٫۵۷۳	۳٫۱۱۸	۶٫۶۳۱	۳٫۵۹۳	۸۱٫۳۹۹	۷۱۳٫۰۶۰
۲۰۱۳	۱٫۹۵۲	۴٫۴۸۰	۳٫۱۰۱	۶٫۴۳۰	۳٫۴۲۰	۷۵٫۱۵۹	۶۵۸٫۳۹۰
۲۰۱۴	۲٫۰۸۴	۴٫۳۲۲	۳٫۱۵۸	۵٫۹۶۹	۳٫۲۳۷	۶۳٫۰۵۰	۵۵۲٫۳۲۰
همه سال‌ها	۱٫۹۴۹	۴٫۶۰۳	۳٫۱۷۶	۶٫۶۲۱	۳٫۲۶۱	۸۲٫۲۳۸	۷۲۰٫۴۰۸

به منظور برآورد مقادیر احتمال بر حسب مدل ویبول، خلاصهٔ طبقه‌بندی‌شدهٔ مشاهدات و اندازه‌گیری‌های آماری سرعت باد در ایستگاه زاهدان طی دورهٔ آماری مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. برآورد میزان ساعات موجودیت باد در یک مکان از رابطهٔ ۲۰ قابل محاسبه است (امیدوار و دهقان طزرجانی، ۲۰۱۲):

$$WE_{h/y} = \left(\frac{\sum f_i}{N}\right)t$$ رابطهٔ ۲۰

که در آن WE موجودیت باد بر حسب ساعت در سال، f_i فراوانی رده‌های سرعت باد، N طول دورهٔ آماری مورد مطالعه، و t فاصلهٔ زمانی بین برداشت داده‌های باد بر حسب ساعت است. بدین ترتیب، میزان کل ساعات موجودیت باد در این ایستگاه معادل ۷۰۴۵٫۸ ساعت در سال برآورد شد.

توربین‌های بادی با دو سرعت طراحی شده‌اند: یکی، سرعت باد شروع به بازدهی نیرو (Cut-in speed) و دیگری، سرعت بادی که توربین برای جلوگیری از آسیب پره‌های خود را موازی با باد قرار می‌دهد و متوقف می‌شود (Cut-out speed). سرعت باد شروع به بازدهی و سرعت توقف بیشتر توربین‌های بادی به‌ترتیب ۳ و ۲۵ متر بر ثانیه است (ویزر، ۲۰۰۳: ۱۸۰۳ـ۱۸۱۲). بدین ترتیب، احتمال وزش باد با سرعت‌های بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه برای ایستگاه زاهدان در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین ۰٫۴۸۹ درصد برآورد شد که معادل ۳۴۳۹ ساعت در سال است.

جدول ۴. اندازه‌گیری آماری سرعت باد در ایستگاه زاهدان در دورهٔ آماری ۲۰۰۵ـ۲۰۱۴

ردیف	رده‌های سرعت	سرعت میانهٔ رده‌های سرعت	فراوانی	احتمال	احتمال تجمعی	احتمال بر حسب مدل ویبول
I	V (m/s)	V_i (m/s)	f_i	$P(v_i)$	P(v)	$Pw(v_i)$
۱	۰٫۵–۱٫۵	۱	۸	۰٫۰۰۰۳۴۱	۰٫۰۰۰۳۴۱	۰٫۰۹۴۴۹۱
۲	۱٫۵–۲٫۵	۲	۷۵۶۹	۰٫۳۲۲۲۷۷	۰٫۳۲۲۶۱۸	۰٫۱۵۷۶۴۹
۳	۲٫۵–۳٫۵	۳	۴۴۴۵	۰٫۱۸۹۲۶۲	۰٫۵۱۱۸۸۰	۰٫۱۸۲۷۲۹
۴	۳٫۵–۴٫۵	۴	۳۵۳۳	۰٫۱۵۰۴۳۰	۰٫۶۶۲۳۱۰	۰٫۱۷۳۲۲۲
۵	۴٫۵–۵٫۵	۵	۲۸۱۹	۰٫۱۲۰۰۲۹	۰٫۷۸۲۳۳۹	۰٫۱۴۱۴۴۷
۶	۵٫۵–۶٫۵	۶	۲۰۰۹	۰٫۰۸۵۵۴۰	۰٫۸۶۷۸۷۹	۰٫۱۰۱۸۵۸
۷	۶٫۵–۷٫۵	۷	۱۲۱۷	۰٫۰۵۱۸۱۸	۰٫۹۱۹۶۹۷	۰٫۰۶۵۵۱۹
۸	۷٫۵–۸٫۵	۸	۸۰۵	۰٫۰۳۴۲۷۶	۰٫۹۵۳۹۷۳	۰٫۰۳۷۹۴۲
۹	۸٫۵–۹٫۵	۹	۴۱۳	۰٫۰۱۷۵۸۵	۰٫۹۷۱۵۵۸	۰٫۰۱۹۸۸۵
۱۰	۹٫۵–۱۰٫۵	۱۰	۲۷۴	۰٫۰۱۱۶۶۷	۰٫۹۸۳۲۲۴	۰٫۰۰۹۴۶۵
۱۱	۱۰٫۵–۱۱٫۵	۱۱	۱۴۹	۰٫۰۰۶۳۴۴	۰٫۹۸۹۵۶۹	۰٫۰۰۴۱۰۴
۱۲	۱۱٫۵–۱۲٫۵	۱۲	۱۱۰	۰٫۰۰۴۶۸۴	۰٫۹۹۴۲۵۲	۰٫۰۰۱۶۲۴
۱۳	۱۲٫۵–۱۳٫۵	۱۳	۵۳	۰٫۰۰۲۲۵۷	۰٫۹۹۶۵۰۹	۰٫۰۰۰۵۸۷
۱۴	۱۳٫۵–۱۴٫۵	۱۴	۳۳	۰٫۰۰۱۴۰۵	۰٫۹۹۷۹۱۴	۰٫۰۰۰۱۹۴
۱۵	۱۴٫۵–۱۵٫۵	۱۵	۲۱	۰٫۰۰۰۸۵۲	۰٫۹۹۸۷۶۶	۰٫۰۰۰۰۵۹
۱۶	۱۵٫۵–۱۶٫۵	۱۶	۱۰	۰٫۰۰۰۴۲۶	۰٫۹۹۹۱۹۱	۰٫۰۰۰۰۱۶
۱۷	۱۶٫۵–۱۷٫۵	۱۷	۱۱	۰٫۰۰۰۴۶۸	۰٫۹۹۹۶۶۰	۰٫۰۰۰۰۰۴
۱۸	۱۷٫۵–۱۸٫۵	۱۸	۵	۰٫۰۰۰۲۱۳	۰٫۹۹۹۸۷۳	۰٫۰۰۰۰۰۱
۱۹	۱۸٫۵–۱۹٫۵	۱۹	۰	۰٫۰۰۰۰۰۰	۰٫۹۹۹۸۷۳	۰٫۰۰۰۰۰۰
۲۰	۱۹٫۵–۲۰٫۵	۲۰	۱	۰٫۰۰۰۰۴۳	۰٫۹۹۹۹۱۵	۰٫۰۰۰۰۰۰
۲۱	۲۰٫۵–۲۱٫۵	۲۱	۱	۰٫۰۰۰۰۴۳	۰٫۹۹۹۹۵۸	۰٫۰۰۰۰۰۰
۲۲	۲۱٫۵–۲۲٫۵	۲۲	۱	۰٫۰۰۰۰۴۳	۱٫۰۰۰۰۰۰	۰٫۰۰۰۰۰۰
		مجموع	۲۳۴۸۶	۱		

یکی از مزایای انتخاب تابع ویبول برای نشان‌دادن توزیع سرعت باد امکان تبدیل سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری به هر ارتفاع دیگری است. این امر با استفاده از قانونی به نام قانون یک‌هفتم نیرو صورت می‌گیرد (بیجی‌آرگس و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۶۴۰_۱۶۵۵).

رابطهٔ ۲۱

$$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{1/7}$$

که در آن C_1 و C_2 پارامتر مقیاس تابع ویبول در ارتفاع Z_1 و Z_2 می‌باشند. از طرفی، تغییرات پارامتر شکل با ارتفاع جزئی بوده و در تجزیه تحلیل پتانسیل انرژی باد پارامتر شکل مستقل از ارتفاع در نظر گرفته می‌شود (ال‌ناصر و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۱۴۹_۲۱۶۱).

ارتفاع محور بیشتر توربین‌های بادی ۵۰ متری از سطح زمین است (اسکین و همکاران، ۲۰۰۸: ۸۳۹_۸۵۱). جدول‌های ۵ و ۶ نتایج محاسبات مؤلفه‌های ماهانه و سالانهٔ باد در ایستگاه زاهدان در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین را نشان می‌دهند. در این پژوهش سرعت بادی که در آن چگالی انرژی باد در بالاترین سطح خود قرار گرفته باشد سرعت باد حاوی حداکثر انرژی نامیده می‌شود. روند تغییرات این مؤلفه برای ایستگاه زاهدان در مقیاس ماهانه بین ۶٫۲۲۶ تا ۱۰٫۶۸۲ است که به‌ترتیب در ماه‌های اکتبر و فوریه رخ داده است. در مقیاس سالانه، کمترین و بیشترین مقدار این مؤلفه به‌ترتیب برابر ۷٫۵۱۲ و ۸٫۸۳۶ است که در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۰۹ اتفاق افتاده است.

به‌منظور مقایسهٔ بهتر نتایج، مقادیر مؤلفه‌های مؤثر در جهت پتانسیل‌سنجی انرژی باد برای ایستگاه‌های مورد مطالعه برای ارتفاع ۱۰ متری در جدول ۷ و برای ارتفاع ۵۰ متری در جدول ۸ آورده شده‌اند. بیشترین چگالی توان باد برای ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری با مقداری برابر ۲۵۷٫۲۲۷ W/m^2 و ۵۱۲٫۷۱۳ W/m^2 در ایستگاه زابل و کمترین چگالی توان باد با مقداری معادل ۴۰٫۱۹۶ W/m^2 و ۸۰٫۱۲۰ W/m^2 در ایستگاه ایرانشهر مشاهده شد. بر اساس یک طبقه‌بندی (من‌ول و همکاران، ۲۰۰۲: ۶۸۹) ویژگی‌ها و ارزیابی باد به شرح رابطهٔ ۲۲ است:

جدول ۵. مؤلفه‌های ماهانهٔ باد در ایستگاه زاهدان برای دورهٔ آماری ۲۰۰۵_۲۰۱۴ در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین

ماه	k	c(m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	(m/s)	P/A (W/m^2)	E/A (KW h/m^2 /Month)
ژانویه	۱٫۸۱۲	۶٫۰۷۸	۳٫۹۰۳	۹٫۱۶۲	۴٫۲۴۵	۲۰۵٫۱۲۷	۱۴۷٫۶۹۲
فوریه	۱٫۸۲۷	۷٫۱۲۶	۴٫۶۱۷	۱۰٫۶۸۲	۵٫۳۶۵	۳۲۷٫۱۹۱	۲۳۵٫۵۷۸
مارس	۱٫۸۲۷	۶٫۷۳۸	۴٫۳۶۶	۱۰٫۱۰۰	۵٫۰۰۳	۲۷۶٫۶۱۵	۱۹۹٫۱۶۳
آوریل	۱٫۸۹۷	۶٫۱۳۷	۴٫۱۳۴	۸٫۹۷۰	۴٫۵۰۹	۱۹۹٫۶۰۷	۱۴۳٫۷۱۷
می	۲٫۰۵۹	۵٫۷۴۸	۴٫۱۶۲	۷٫۹۹۳	۴٫۱۴۵	۱۵۰٫۱۳۱	۱۰۸٫۰۹۵
جون	۲٫۲۶۹	۶٫۰۶۹	۴٫۶۹۸	۸٫۰۱۹	۴٫۵۱۴	۱۶۱٫۹۲۳	۱۱۶٫۵۸۵
جولای	۲٫۳۰۶	۵٫۹۷۲	۴٫۶۶۷	۷٫۸۲۹	۴٫۳۴۸	۱۵۲٫۲۷۹	۱۰۹٫۶۴۱
آگوست	۲٫۲۶۶	۵٫۳۹۵	۴٫۱۷۳	۷٫۱۳۲	۳٫۷۷۴	۱۱۳٫۸۵۰	۸۱٫۹۷۲
سپتامبر	۲٫۲۰۲	۴٫۹۷۲	۳٫۷۷۷	۶٫۶۶۸	۳٫۴۵۰	۹۱٫۲۸۶	۶۵٫۷۲۶
اکتبر	۲٫۱۹۹	۴٫۶۴۰	۳٫۵۲۱	۶٫۲۲۶	۳٫۱۰۲	۷۴٫۲۵۷	۵۳٫۴۶۵
نوامبر	۲٫۰۱۱	۵٫۱۴۰	۳٫۶۵۲	۷٫۲۴۴	۳٫۴۴۱	۱۰۹٫۸۸۷	۷۹٫۱۱۸
دسامبر	۱٫۹۳۳	۵٫۱۳۱	۳٫۵۲۰	۷٫۴۱۱	۳٫۳۶۹	۱۱۴٫۲۱۴	۸۲٫۲۳۸

جدول ۶. مؤلفه‌های سالانهٔ باد در ایستگاه زاهدان برای دورهٔ آماری ۲۰۰۵ـ۲۰۱۴ در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین

سال	k	c(m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	(m/s)	P/A (W/m^2)	E/A (KW h/m^2 /Year)
۲۰۰۵	۱٫۹۰۸	۶٫۰۶۲	۴٫۱۰۷	۸٫۸۲۷	۳٫۸۲۲	۱۹۱٫۰۹۵	۱۶۷۳٫۹۹۷
۲۰۰۶	۲٫۰۴۲	۵٫۸۶۸	۴٫۲۲۲	۸٫۱۹۸	۳٫۸۱۹	۱۶۱٫۰۲۴	۱۴۱۰٫۵۷۴
۲۰۰۷	۱٫۸۹۸	۵٫۹۸۲	۴٫۰۳۲	۸٫۷۴۱	۴٫۰۵۳	۱۸۴٫۷۶۷	۱۶۱۸٫۵۵۸
۲۰۰۸	۱٫۹۴۱	۵٫۷۹۳	۳٫۹۹۰	۸٫۳۴۲	۳٫۹۸۸	۱۶۳٫۴۶۵	۱۴۳۱٫۹۵۸
۲۰۰۹	۱٫۹۱۰	۶٫۰۷۱	۴٫۱۱۸	۸٫۸۳۶	۴٫۲۴۲	۱۹۱٫۷۹۱	۱۶۸۰٫۰۹۳
۲۰۱۰	۱٫۸۹۹	۵٫۶۹۷	۳٫۸۴۲	۸٫۳۲۲	۴٫۰۱۳	۱۵۹٫۵۲۶	۱۳۹۷٫۴۴۶
۲۰۱۱	۱٫۹۳۷	۵٫۶۲۲	۳٫۸۶۴	۸٫۱۰۸	۴٫۱۴۰	۱۴۹٫۸۰۴	۱۳۱۲٫۲۸۱
۲۰۱۲	۱٫۹۲۰	۵٫۷۵۵	۳٫۹۲۴	۸٫۳۴۵	۴٫۵۱۸	۱۶۲٫۲۴۸	۱۴۲۱٫۲۹۵
۲۰۱۳	۱٫۹۵۲	۵٫۶۳۸	۳٫۹۰۳	۸٫۰۹۲	۴٫۲۹۷	۱۴۹٫۸۰۹	۱۳۱۲٫۳۲۵
۲۰۱۴	۲٫۰۸۴	۵٫۴۳۹	۳٫۹۷۴	۷٫۵۱۲	۴٫۰۷۱	۱۲۵٫۶۷۵	۱۱۰۰٫۹۰۳
همه سال‌ها	۱٫۹۴۹	۵٫۷۹۳	۳٫۹۹۸	۸٫۳۳۲	۴٫۰۹۶	۱۶۳٫۹۲۰	۱۴۳۵٫۹۴۳

رابطهٔ ۲۲

$$\begin{cases} \frac{P}{A} < 100\,W/m^2 & \text{ضعیف} \\ \frac{P}{A} \approx 400\,W/m^2 & \text{خوب} \\ \frac{P}{A} > 700\,W/m^2 & \text{عالی} \end{cases}$$

بر اساس این طبقه‌بندی و نیز بر اساس طبقه‌بندی PNL، در هر دو ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری از سطح زمین به‌ترتیب ایستگاه زابل، زهک، و کنارک مناسب‌ترین مکان برای نصب نیروگاه‌های بادی ارزیابی می‌شوند. در پژوهشی پتانسیل انرژی باد برای ایستگاه لوتک– زابل بررسی شد و نتایج نشان داد که این ایستگاه مکان مناسبی برای نصب توربین‌های بادی با مقیاس بزرگ است (رحمانی و همکاران، ۲۰۱۴: ۹۶۵ـ۹۷۶). در پژوهشی گندم‌کار آمار ۱۲۰ ایستگاه سینوپتیک کشور ایران را برای بررسی پتانسیل انرژی باد به گونه‌ای توصیفی ارزیابی کرد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، ایستگاه‌های سینوپتیک از نظر سرعت وزش باد در چهار گروه مختلف قرار گرفتند که ایستگاه زابل در گروه اول– که در بیشتر زمان‌های سال بادخیزی زیادی دارند– جای گرفت (گندم‌کار، ۱۳۸۸: ۸۵). سایر ایستگاه‌ها (ایرانشهر، چابهار، خاش، زاهدان، و سراوان)، با توجه به میانگین سرعت و چگالی توان باد و با این سطح از قدرت باد، برای کاربردهای محلی کوچک مانند ژنراتورهای بادی، مصارف خانگی، تولید برق برای مزارع، شارژ باتری، و پمپاژ آب مناسب است.

ایستگاه زابل دارای بیشترین احتمال وزش باد با سرعت‌های بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه، با مقادیر ۰٫۷۱ و ۰٫۸۲ درصد به‌ترتیب در دو ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متر است. امیدوار و دهقان طزرجانی عملکرد اقتصادی توربین‌های بادی را مستلزم کارکرد حداقل ۴۰۰۰ ساعت در سال می‌داند (امیدوار و دهقان طزرجانی، ۲۰۱۲). بنابراین، با توجه به سرعت‌های شروع به کار و توقف بیشتر توربین‌های بادی به‌ترتیب ۳ و ۲۵ متر بر ثانیه است و بر اساس رابطهٔ ۲۰ احتمال وزش بادهایی با سرعت بین این دو سرعت در ارتفاع ۵۰ متری برای ایستگاه زابل با احتمالی برابر ۰٫۸۲ از کل ساعات موجودیت باد (۷۵۶۶ ساعت در سال) برآورد شد. بنابراین، کارکرد اقتصادی توربین‌های بادی در این مکان مقداری معادل ۵۸۲۲ ساعت در سال برآورد شد. در پژوهشی، دلبری و همکاران بیان کردند که زابل دارای بیشترین درصد ساعاتی از سال است که سرعت باد در آن بیش از ۴ متر بر ثانیه است. بنابراین، مکان مناسبی برای استفاده از انرژی بادی است (دلبری و همکاران، ۲۰۱۶).

جدول ۷. مؤلفه‌های مؤثر در پتانسیل‌سنجی باد برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین

نام ایستگاه	پارامتر شکل	پارامتر مقیاس	محتمل‌ترین سرعت باد	سرعت نامی باد	میانگین سرعت باد	احتمال وزش باد با سرعت‌های بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه	قدرت باد
	K	c(m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	(m/s)	(٪)	P/A (W/m^2)
ایرانشهر	۲/۰۱۷	۳/۶۸۰	۲/۶۲۱	۵/۱۷۷	۲/۵۳۵	۰/۳۰	۴۰/۱۹۶
چابهار	۲/۰۹۲	۳/۸۱۹	۲/۷۹۸	۵/۲۶۳	۲/۵۳۲	۰/۳۵	۴۳/۳۴۱
خاش	۱/۹۹۱	۴/۲۷۱	۳/۰۰۸	۶/۰۵۶	۲/۴۵۳	۰/۴۳	۶۳/۷۲۳
سراوان	۲/۱۳۳	۴/۳۳۰	۳/۲۱۸	۵/۹۰۴	۲/۸۲۹	۰/۴۶	۶۲/۰۲۵
زابل	۱/۷۹۷	۶/۵۳۱	۴/۱۵۴	۹/۹۰۲	۶/۱۴۴	۰/۷۱	۲۵۷/۲۲۷
زاهدان	۱/۹۴۹	۴/۶۰۳	۳/۱۸۲	۶/۶۱۳	۳/۲۵۵	۰/۴۹	۸۱/۶۴۹
زهک	۱/۷۲۹	۶/۰۷۰	۳/۶۸۳	۹/۴۶۸	۴/۹۸۵	۰/۶۸	۲۱۷/۶۵۳
کنارک	۲/۱۳۱	۵/۰۹۷	۳/۷۸۵	۶/۹۵۳	۲/۸۸۷	۰/۵۹	۱۰۱/۲۵۵

جدول ۸. مؤلفه‌های مؤثر در پتانسیل‌سنجی باد برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین

نام ایستگاه	پارامتر شکل	پارامتر مقیاس	محتمل ترین سرعت باد	سرعت نامی باد	میانگین سرعت باد	احتمال وزش باد با سرعت‌های بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه	قدرت باد
	k	c(m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{op} (m/s)	(m/s)	(٪)	P/A (W/m^2)
ایرانشهر	۲/۰۱۷	۴/۶۳۱	۳/۲۹۸	۶/۵۱۵	۳/۱۹۰	۰/۵۴	۸۰/۱۲۰
چابهار	۲/۰۹۲	۴/۸۰۶	۳/۵۲۲	۶/۶۲۴	۳/۱۸۷	۰/۵۶	۸۶/۳۸۹
خاش	۱/۹۹۱	۵/۳۷۵	۳/۷۸۶	۷/۶۲۱	۳/۰۸۷	۰/۶۰	۱۲۷/۰۱۵
سراوان	۲/۱۳۳	۵/۴۹۹	۴/۰۵۰	۷/۴۳۱	۳/۵۶۰	۰/۶۲	۱۲۳/۶۲۹
زابل	۱/۷۹۷	۸/۲۱۹	۵/۲۲۸	۱۲/۴۶۲	۷/۷۳۲	۰/۸۲	۵۱۲/۷۱۳
زاهدان	۱/۹۴۹	۵/۷۹۳	۴/۰۰۴	۸/۳۲۲	۴/۰۹۶	۰/۵۹	۱۶۲/۷۴۶
زهک	۱/۷۲۹	۷/۶۳۹	۴/۶۳۶	۱۱/۹۱۵	۶/۲۷۴	۰/۸۱	۴۳۳/۸۳۳
کنارک	۲/۱۳۱	۶/۴۱۴	۴/۷۶۴	۸/۷۵۱	۳/۶۳۳	۰/۷۱	۲۰۱/۸۲۵

برای تحلیل روند بلندمدت سرعت باد در ایستگاه‌های منتخب استان سیستان و بلوچستان، مقادیر آمارهٔ آزمون من- کندال برای داده‌های سرعت باد در مقیاس ماهانه و سالانه محاسبه شد (جدول ۹). نتایج نشان داد که هم روند افزایشی و هم روند کاهشی در ایستگاه‌های گوناگون رخ داده است که البته درصد وقوع روند افزایشی بیشتر از روند کاهشی است و بیشتر در ایستگاه‌های ایرانشهر، زابل، زاهدان، و کنارک اتفاق افتاده است. در ایرانشهر، سرعت باد در مقیاس ماهانه (به‌جز آوریل) و سالانه دارای روند مثبت معنی‌دار است. در ایستگاه زابل نیز سرعت باد در ۴۱/۶ درصد ماه‌ها و در مقیاس سالانه دارای روند افزایشی معنادار است. در ایستگاه زهک در ماه‌های می، جولای، آگوست، و دسامبر و در زاهدان در ماه‌های نوامبر، اکتبر، و فوریه روند معنادار افزایشی رخ داده است. به‌طورکلی، در مقیاس سالانه ۵۰ درصد ایستگاه‌ها روند افزایشی و ۵۰ درصد دیگر روند کاهشی سرعت باد را نشان دادند. نتایج معناداری روند به‌دست‌آمده از روش من- کندال با نتایج آزمون شیب سن (جدول ۱۰) همخوانی دارد. همان‌طورکه از جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، دو ایستگاه زابل و

ایرانشهر بیشترین معناداری روند افزایش سرعت باد را دارند. با این حال، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقادیر شیب روند مربوط به ایستگاه زهک و به‌ترتیب در ماه‌های دسامبر (برابر ۰/۰۷) و آگوست (برابر ۰/۱-) اتفاق افتاده است. در مقیاس سالانه نیز دو ایستگاه زابل و ایرانشهر دارای شیب روند مثبت معنی‌دار به‌ترتیب در سطح ۵ و ۱ درصد می‌باشند.

جدول ۹. مقادیر آمارهٔ آزمون من- کندال برای سرعت باد در مقیاس ماهانه و سالانه

ایستگاه	سالانه	Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	July	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan
زابل	۲٫۵۳*	۴٫۱۹**	۲٫۶**	۱٫۷۶	-۰٫۰۶	۰٫۹۸	۱٫۱۲	۰٫۱۰	۱٫۰۵	۲٫۰۰۵*	۱٫۱۹	۴٫۴۵**	۲٫۹۲**
زاهدان	۱٫۳۲	-۰٫۷۱	۲٫۲۲*	۲٫۰۱*	۰٫۶۸	۰٫۳۲	۰٫۵۷	۱٫۶۳	۱٫۱۷	۰٫۴۱	-۰٫۲۲	۲٫۱۳*	۰٫۳۶
چابهار	-۱٫۶۳	-۰٫۵	-۰٫۸	-۰٫۱۱	-۱٫۳۵	-۱٫۲۱	-۱٫۱۲	-۱٫۷	۲٫۴*	-۱٫۹۵	-۱٫۲۶	-۰٫۶	-۱٫۴۲
سراوان	-۱٫۷۲	۱٫۲۵	۱٫۵۳	۲٫۴*	-۱٫۳۵	-۱٫۷۸	-۱٫۲۱	-۱٫۳۵	-۱٫۴۸	-۱٫۵	-۰٫۹	۰٫۵	-۰٫۰۱
زهک	-۰٫۱۸	۲٫۶۴**	۰٫۶۰	۰٫۵۲	-۰٫۹۲	۲٫۶۲**	۲٫۰۰۷*	۰٫۱۸	۱٫۹۵*	-۰٫۵۸	۰٫۸۹	۱٫۵۰	-۰٫۰۲
ایرانشهر	۲٫۲۷**	۳٫۴۲**	۳٫۳۰**	۳٫۴۲**	۲٫۸۱**	۲٫۸۸**	۲٫۲۶*	۲٫۴۱*	۲٫۸۲**	۱٫۶۸	۲٫۰۵*	۲٫۸۴**	۳٫۱۲**
خاش	-۰٫۵۰۶	-۱٫۴۲	۰٫۶۵	۰٫۱۳	-۰٫۱۵	-۰٫۳۰	-۱٫۱۴	-۱٫۲۹	-۰٫۹	-۰٫۴۱	-۲٫۰۸*	-۰٫۵۶	-۱٫۰۵
کنارک	۱٫۸۱	۱٫۸۷	۱٫۳۵	۰٫۹۴	۱٫۲۶	۱٫۱۴	۱٫۳۵	۱٫۶۹	۱٫۲۱	۱٫۳۵	۱٫۳۹	۲٫۰۵*	۰٫۸۷

** و * به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ سطوح معناداری ۱ و ۵ درصد می‌باشند.

جدول ۱۰. مقادیر آمارهٔ آزمون سن برای سرعت باد در مقیاس ماهانه و سالانه

ایستگاه	سالانه	Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	July	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan
زابل	۰٫۰۲*	۰٫۰۵**	۰٫۰۳**	۰٫۰۳	-۰٫۰۰۰۵	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۲*	۰٫۰۱	۰٫۰۵**	۰٫۰۴**
زاهدان	۰٫۰۰۷	-۰٫۰۰۷	۰٫۰۲*	۰٫۰۱*	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۶	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰۴	-۰٫۰۰۱	۰٫۰۲*	۰٫۰۰۳
چابهار	-۰٫۰۱	-۰٫۰۰۷	-۰٫۰۰۹	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	-۰٫۰۰۵	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	-۰٫۰۲*	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	-۰٫۰۰۶	-۰٫۰۱
سراوان	-۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	-۰٫۰۴*	-۰٫۰۲	-۰٫۰۲	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	-۰٫۰۲	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	۰٫۰۰۸	-۰٫۰۰۰۲
زهک	-۰٫۰۱	۰٫۰۷**	۰٫۰۱	۰٫۰۲	-۰٫۰۳	-۰٫۱**	-۰٫۰۷*	۰٫۰۱	-۰٫۰۶*	-۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰
ایرانشهر	۰٫۰۳**	۰٫۰۴**	۰٫۰۴**	۰٫۰۴**	۰٫۰۵**	۰٫۰۴**	۰٫۰۲*	۰٫۰۳*	۰٫۰۳**	۰٫۰۲*	۰٫۰۲*	۰٫۰۳**	۰٫۰۳**
خاش	-۰٫۰۰۹	-۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰۲	-۰٫۰۰۳	-۰٫۰۰۹	-۰٫۰۲	-۰٫۰۲	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	-۰٫۰۴*	-۰٫۰۱	-۰٫۰۲
کنارک	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳*	۰٫۰۱

** و * به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ سطوح معناداری ۱ و ۵ درصد می‌باشند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

نتیجه‌گیری

بررسی تغییرات ماهانهٔ باد در ایستگاه‌های منتخب استان سیستان و بلوچستان نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات مربوط به ایستگاه زابل است. در همهٔ ایستگاه‌ها در ماه‌های آخر سال سرعت باد کاهش می‌یابد. همچنین، بر اساس تحلیل روند انجام‌شده در این پژوهش، ایستگاه‌های زابل، زاهدان، ایرانشهر، و کنارک در بیشتر ماه‌ها و در مقیاس سالانه دارای روند افزایشی سرعت باد هستند؛ با این حال، بیشترین روند معنی‌دار به‌ترتیب در ایستگاه‌های ایرانشهر، زابل، زاهدان، و کنارک مشاهده شد. از طرفی، در این پژوهش به برآورد پارامترهای شکل و مقیاس توزیع ویبول با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی پرداخته شد و سپس مقدار تخمینی مؤلفه‌های مربوط به انرژی باد در دو ارتفاع ۱۰ (ارتفاع استاندارد) و ۵۰ متری (ارتفاع نصب بیشتر توربین‌های بادی) در ایستگاه‌های منتخب به‌دست آمد. در بین ایستگاه‌های منتخب، حداکثر مقدار چگالی توان باد در هر دو ارتفاع مورد بررسی در ایستگاه زابل مشاهده شد. مقدار چگالی توان باد در ارتفاع ۵۰ متری برای زابل برابر ۵۱۳ وات بر متر مربع بود. پس از زابل، ایستگاه زهک در رتبهٔ دوم از نظر قدرت باد (۴۳۴ وات بر متر مربع) قرار دارد و کمترین این مقدار نیز در ایستگاه ایرانشهر (۸۰ وات بر متر مربع) مشاهده شد. نتایج احتمال وقوع باد با سرعت‌های بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه نشان داد در ارتفاع ۵۰ متری بالاترین احتمال به ایستگاه زابل و زهک

اختصاص دارد و کمترین احتمال متعلق به ایستگاه ایرانشهر و چابهار است. با مبنا قراردادن سرعت باد و تداوم سالانهٔ باد و با درنظرگرفتن روند زمانی افزایش سرعت باد به‌ترتیب سه ایستگاه زابل، زهک، و کنارک قابلیت مناسبی برای استقرار توربین‌های تجاری دارند. سایر ایستگاه‌ها مانند زاهدان نیز برای راه‌اندازی توربین‌های کوچک مناسب‌اند. ذکر این نکته لازم است که در مطالعات امکان‌سنجی بهره‌برداری از انرژی باد، علاوه بر معیارهای اقلیمی و جغرافیایی، مانند آنچه در این تحقیق مطالعه شد، مدنظر قراردادن سایر معیارهای مهم از جمله معیارهای فنی، زیست‌محیطی، و اقتصادی کاملاً ضروری است.

منابع

انتظاری، ع. و اسدی، م. (۱۳۹۴). توان‌سنجی نیروگاه‌های بادی در استان سیستان و بلوچستان با روش فازی- ای. اچ. پی.، فصل‌نامهٔ *تحقیقات جغرافیایی*، ۳۰(۳۰): ۶۷ـ۸۴.

امیدوار، ک. و دهقان طزرجانی، م. (۱۳۹۱). پتانسیل‌سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد، فصل‌نامهٔ *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۷(۲): ۱۴۹ـ۱۶۸.

دلبری، م.؛ کهخامقدم، پ.؛ محمدی، ا. و احمدی، ت. (۱۳۹۵). برآورد الگوی پراکنش مکانی سرعت باد برای پتانسیل‌یابی تولید انرژی بادی در ایران، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸(۲): ۲۶۵ـ۲۸۵.

رفاهی، ح. (۱۳۸۵). *فرسایش بادی و کنترل آن*، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

قهرمان، ن. و قره‌خانی، ا. (۱۳۸۹). بررسی روند تغییرات زمانی سرعت باد در گسترهٔ اقلیمی ایران، مجلهٔ *آبیاری و زهکشی ایران*، ۴(۱):۳۱ـ۴۳.

گندم‌کار، ا. (۱۳۸۸). ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران. مجلهٔ *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۶(۴):۸۵ـ۱۰۰.

محمدی، ح.؛ رستمی جلیلیان، ش.؛ تقوی، ف. و شمسی‌پور، ع.ا. (۱۳۹۱). پتانسیل‌سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۴(۲): ۱۹ـ۳۲.

Adokoga, L.O. and Adewale, A.A. (1992). Wind energy potential of Nigeria, *Renewable Energy*, Vol. 2.

Alamdari, P.; Nematollahi, O. and Mirhosseini, M. (2012). Assessment of WindEnergy in Iran: A Review, *Renewableand Sustainable Energy Reviews*, 16(1): 836-860.

Al-Nassar, W. and et al. (2005). Potential wind power generation in the State of Kuwait, *Renewable Energy*, 30: 2149-2161.

Bagiorgas, H.S. and et al. (2007). Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48.

Celluraa, M.; Cirrincioneb, G.; Marvugliaa, A.; Miraouic, A. (2008). Wind speed spatial estimation for energy planning in Sicily: Introduction and statistical analysis, *Renewable Energy*, 33: 1237-1250.

Chang, T.J.; Wu, Y.T.; Hsu, H.Y.; Chu, C.R. and Liao, C.M. (2002). Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan, *Renewable Energy*, 28: 851-871.

Daniel, AR. and Chen, AA. (1991). Stochastic simulation and forecasting of hourly average wind speed sequences in Jamaica, *Sol Energy*, 46: 1-11.

Delbari, M.; Kahkhamoghadam, P.; Mohamadi, E. and Ahmadi, T. (2016). Estimating the spatial distribution pattern of wind speed for assessment of wind energy potential in Iran, *Physical Geography research Quarterly*, 48(2): 265-285. (In Persian)

Entezari, A. and Asadi, M. (2015). The feasibility of wind power plant in Sistan and Baluchistan province by fuzzy method, *Geographical Research Quarterly*, 30(30): 67-84. (In Persian)

Ernest, W. P. and Hennessey, J. P. J. (1978). On the use of power laws for estimates of wind power potential, *J. Appl, Meteorology*. Vol. 17.

Eskin, N.; Artar, H. and Tolun, S. (2008). Wind energy potential of Go¨ kc-eada Island in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12: 839-851.

Gandomkar, A. (2008). Wind energy potential estimation in Iran, *Geography and Environmental Planning*, 36(4): 85-100. (In Persian)

Ghahreman, N. and Gharekhani, A. (2010). Trend analysis of mean wind speed in different climatic regions of Iran, *Iranian Journal Irrigation and drainage*, 4(1): 31-34. (In Persian)

Gilbert, R.O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*, John Wiley and Sons. New York.

Hollander, M.; Wolfe, D.A. and Chicken, E. (2013). *Nonparametric statistical methods*, Third Edition. John Wiley and Sons. New York.

Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods, 4th edition, Charles Griffin, London.

Keyhani, A.; Ghasemi-Varnamkhasti, M.; Khanali, M. and Abbaszadeh, R. (2010). An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran, *J. Energy*, 35: 188-201.

Manwell JF; McGowan JG and Rogers AL. (2002). *Wind energy explained: theory, designand application*, Amherst, USA: John Wiley & Sons, 689.

Mohammadi, H.; Rostami Jalilian, SH.; Taghavi, F. and Shamsipour, A.A. (2012). Evaluation of energy potential in Kermanshah province, *Physical Geography research Quarterly*, 80(2): 19-32.(In Persian).

Mostafaeipour, A.; Jadidi, M.; Mohamadi, K. and Sedaghat, A. (2014). An analysis wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30: 641-650.

Omidvar, K. and Dehghantarjani, M. (2012). Evaluation and estimating features of wind power for energy production synoptic stations in Yazd province, *Geographical Research Quarterly*, 27(2): 149-168. (In Persian)

Rahmani, K.; Kasaeian, A.; Fakoor, M.; Kosari, A. and Alavi, SB. (2014). Wind power assessment and site matching of wind turbines in Lootak of Zabol, *International journal of renewable energy research*, 4(4).

Refahi, H. (2006). *Wind erosion and conservation*, Tehran University Press, 320.(IN Persian).

Sen, P.K. (1968). On a class of aligned rank order tests in two-way layouts, *The Annals of Mathematical Statistics*, 1115-1124 .

Saeidi, D.; Mirhosseini, M.; Sedaghat, A. and Mostafaeipour, A. (2011). Feasibility Study ofWind Energy Potential inTwo Provinces of Iran: North and South Khorasan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8): 3558-3569.

Stevens, M.J.M, and Smulders P.T. (1979). The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes, *Wind Eng*, 3(2):132-145.

Tackle, ES. and Brown, JM. (1978). Note on the use of Weibull statistics to characterize wind speed data, *J.* Appl *Meteorol*, 17: 556-559.

Weisser, D. (2003). A wind energy analysis of Granada: an estimation using the Weibull density, *Renewable Energy*, 28: 1803-1812.

Yue, S.; Pilon, P. and Cavadias, G. (2002). Power of the Mann° Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series, *Journal of hydrology*, 259(1): 254-271.