

پتانسیل سنجی تولید انرژی باد به کمک تحلیل آماری مشخصه‌های باد - مطالعه موردی: شهرستان اقلید در استان فارس

پریا سفیدپری^{۱*}، علیرضا کیهانی^۲، سید حسن پیشگر کومله^۳، مجید خانعلی^۴، اسداله اکرم^۵

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۲. استاد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۴. استادیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۵. دانشیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۲/۲۷)

چکیده

سرعت باد یکی از مهمترین مشخصه‌های انرژی باد است که داده‌های آن از ایستگاه‌های هواشناسی استخراج می‌گردد. در این مطالعه از داده‌های اخذ شده از ایستگاه هواشناسی شهرستان اقلید در دوره ده ساله استفاده شده است. توزیع ویبل به عنوان بهترین توزیع با روش برازش منحنی و با استفاده از تخمین پارامترهای مهم آماری مشخص شد. نتایج نشان داد متوسط سرعت باد حدود ۲/۹۶ متر بر ثانیه است و کمترین سرعت وزش باد متعلق به ماه‌های گرم سال است. متوسط سرعت نامی برای استحصال حداکثر انرژی باد در ایستگاه مورد مطالعه حدود ۷/۸۱ متر بر ثانیه برآورد گردید. مجموع چگالی توان و انرژی باد در دوره ده ساله به ترتیب معادل ۷۹ وات بر مترمربع در سال و ۶۵۷/۶۷۲۳ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال محاسبه شد. جهت باد غالب در منطقه به ترتیب با بیشترین سهم در جهت‌های شرق و غرب شناسایی گردید.

واژه‌های کلیدی: شهرستان اقلید، انرژی باد، انرژی تجدیدپذیر، توزیع رایلی، توزیع ویبل

مقدمه

در ادبیات فنی انرژی، تعاریف مختلفی برای انرژی تجدیدپذیر وجود دارد که عبارت است از انرژی که از فرآیندهای طبیعی که به طور مداوم احیاء و تجدید می‌شود، قابل استحصال است. گرچه این تعریف از حیث افق زمانی تجدید منابع قابل بحث می‌باشد اما به عنوان تعریف کلی تاکنون پذیرفته شده است. از سال ۱۹۹۰ منابع تجدیدپذیر با نرخ سالانه حدود ۱/۷٪ رشد داشته‌اند. این میزان رشد برای منابع انرژی همچون باد و خورشید دارای رشد بیشتری بوده است که بخش عمده آن در کشورهای عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) و به دلیل توسعه برنامه‌های اجرایی در این حوزه در کشورهایی نظیر دانمارک و آلمان بوده است (Anonymous, 2005). برخی از مهمترین دلایل بهره‌برداری از انرژی‌های غیرفسیلی را می‌توان افزایش بهره‌برداری از منابع انرژی فسیلی در نتیجه افزایش جمعیت، کاهش ذخایر موجود، افزایش میزان آلودگی

محیط زیست و انتشار گازهای گلخانه‌ای نام برد.

در ایران ظرفیت نصب توربین جهت تولید انرژی برق بادی تا سال ۱۳۸۴ برابر ۴۷/۵۸ مگاوات و به تعداد ۹۲ توربین بوده است. این میزان تا اواسط سال ۱۳۸۷ به ۱۲۸ مگاوات رسید. به طور کلی ظرفیت این توربین‌ها در دامنه بین ۱۳۰ تا ۶۶۰ کیلووات گزارش شده است که بیشترین فراوانی متعلق به توربین‌های ۶۶۰ کیلوواتی است. لازم بذکر است که سهم انرژی برق بادی تولیدی در سال ۱۳۸۴ برابر ۰/۰۴ درصد از برق تولیدی کشور بوده است (Sherbafian, 2008). اطلاعات مربوط به سرعت باد برای مناطق مختلف کشور در ماه‌های مختلف سال توسط اداره هواشناسی گزارش می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی وضعیت کلی باد و ویژگی‌های آن از جمله سمت، سرعت و ثبات آن در استان فارس شهرستان اقلید، تعیین پتانسیل باد و امکان سنجی استحصال انرژی به کمک روش‌های آماری در این زمینه است.

در هواشناسی، باد یک بردار تلقی می‌شود که نظیر هر بردار دیگر دارای جهت و اندازه است. اندازه این بردار بیانگر سرعت باد است. سرعت باد، مسافتی است که باد در واحد زمان

* نویسنده مسئول: pariasefeedpari@ut.ac.ir

باد در کشور چین مورد مطالعه قرار گرفت و تخمین پتانسیل توان بادی در نتیجه برآورد مؤلفه‌های باد نشان از پتانسیل بالای انرژی باد در این منطقه داشت (Wei Zhou, 2005). در بین مطالعات اخیر، تولید الکتریسیته از انرژی باد در کشور ترکیه با رویکردی بر جنبه‌های فنی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار داده شد. توصیف رفتار باد با استفاده از توزیع آماری و بیل اساس این مطالعه را تشکیل داده است (Arsalan, 2010). ارزیابی پتانسیل توان باد جهت تخمین منبع انرژی باد با استفاده از داده‌های ۱۰ دقیقه‌ای و اخذ تصمیمات لازم برای اجرای پروژه استحصال انرژی بادی از اهداف مطالعه دیگری است که در کشور تانزانیا انجام شده است (Alimi et al., 2012). تحقیقات مشابه دیگری در سایر نقاط دنیا انجام شده است. در کشور صحرا در آفریقا به امکان‌سنجی تولید انرژی از باد با استفاده از توزیع و بیل پرداخته شد و نشان داده شد این امکان در فصول تابستان و بهار با میانگین سرعت باد ۲/۵۴ تا ۴/۹۴ متر بر ثانیه بیشتر است (Boudia et al., 2013). در مطالعه دیگری در الجزایر جنوبی امکان‌سنجی انرژی باد و تحلیل و ارزیابی اقتصادی مزرعه بادی انجام گرفت (Diaf et al., 2013). در تحقیقاتی نیز در همین راستا در شهرهای مختلف ایران از قبیل زاهدان، بافت و سرخس، اردبیل، یزد و خراسان جنوبی و شمالی، شوشتر و مراوه تپه انجام شده است که جملگی از توزیع‌های آماری جهت مدلسازی داده‌های هواشناسی مربوط به سرعت باد استفاده کرده‌اند (Zahedi, Omidvar and Dehqan Tazarjani, 2012; Mostafaeipour et al., 2005; Fatehi Peykani, 2009; Saeidi et al., 2011; Soltani et al., 2010; Zakeri et al., 2011; Fard et al., 2011). اخیراً در مطالعه‌ای پتانسیل تولید باد در شهر شوشتر استان خوزستان بررسی شد و در نتیجه تابع توزیع و بیل بهترین مدل جهت مدلسازی داده‌های باد گزارش شد (Biglari et al., 2014). همچنین (Peshgar et al., 2015) پتانسیل استحصال انرژی باد را در منطقه فیروزکوه پیش بینی نمود و این منطقه را جهت احداث نیروگاه بادی مناسب دانست. با توجه به پیشینه تحقیق، مطالعات بیشتری جهت امکان‌سنجی انرژی باد در شهرهای مختلف کشور ایران لازم است تا به زودی شاهد توسعه و اجرایی شدن این مهم در کشور باشیم. در این مطالعه اطلاعات مربوط به سرعت باد برای مناطق مختلف کشور در ماه‌های مختلف سال توسط اداره هواشناسی گزارش می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی وضعیت کلی باد و ویژگی‌های آن از جمله جهت وزش باد، سرعت و ثبات آن در استان فارس شهرستان اقلید، تعیین پتانسیل باد و امکان‌سنجی استحصال انرژی می‌باشد که با توجه به تحقیقات پیشین برای اولین بار از

می‌پیماید و با یک‌گانه‌ی نظیر گره (یک گره معادل ۱/۸۵۲ کیلومتر بر ساعت)، متر بر ثانیه (یک متر بر ثانیه معادل ۳/۶ کیلومتر در ساعت) و کیلومتر بر ساعت (یک کیلومتر در ساعت معادل ۰/۲۷۷ متر در ثانیه) بیان می‌شود (Kaviani and Alijani, 1995).

توزیع‌های آماری متعددی (ویبل (Weibull)، رایلی (Rayleigh)، جانسون (Johnson)، پیرسون (Pearson)، مربع کای (Chi-2)، لوگ نرمال (Lognormal)، گاوسی معکوس (Inverse Gaussian)) جهت تعیین پتانسیل انرژی بادی وجود دارد که محققان بسیاری از توزیع و بیل به دلایل مختلفی استفاده می‌کنند (Keyhani et al., 2010). دلایل زیر را می‌توان برای برتری توزیع و بیل در تجزیه و تحلیل پتانسیل انرژی باد برشمرده (Hennessey, 1977):

الف- توزیع سرعت باد دارای چولگی است که در این توزیع به خوبی مشخص می‌شود.

ب- در مناطقی که قدرت باد حداکثر است، داده‌های سرعت باد دارای بیشترین میانگین و کمترین مقدار پارامتر شکل است.

همچنین مزایایی برای استفاده از این توزیع قابل ذکر است:

الف- توزیع و بیل برای داده‌های سرعت باد دارای خطای کمتر نسبت به توزیع نرمال ریشه دوم است.

ب- با تغییر موقعیت ارتفاع بادسنج، همچنان امکان تخمین پارامترهای توزیع و بیل وجود دارد.

ج- سهولت انجام محاسبات نسبت به سایر توزیع‌ها نظیر توزیع نرمال دومتغیره به دلیل اینکه این توزیع تنها دو پارامتر دارد.

تحقیقات متعددی در خصوص توصیف رفتار باد براساس آمار هواشناسی انجام گرفته است. در مطالعه‌ای از طریق توزیع و بیل، سرعت و جهت باد شبیه‌سازی شده و این نتیجه حاصل شد که با توجه به هیستوگرام باد، توزیع نرمال توزیعی مناسب برای داده‌های سرعت باد نبوده و توزیع و بیل گسترده‌ترین مدل قابل استفاده در زمینه سرعت باد می‌باشد (Skidmore and Tatarko, 1990, 1991; Toure, 2005). در مطالعه‌ای که در سال ۱۹۷۶ صورت گرفت، نتایج حاکی از آن بود که توزیع دو پارامتری و بیل نسبت به توزیع لوگ نرمال برای داده‌های سرعت باد دارای تطابق بهتری است (Justus et al., 1976). در سال ۲۰۰۲، مؤلفه‌های باد و مشخصه‌های توربین بادی در تایوان بررسی شد و در نتیجه این پژوهش در سراسر خط ساحلی تایوان برای استقرار توربین‌های بادی مناسب ارزیابی شد (Tsang-Jung Chang, 2003). در سال ۲۰۰۵، پتانسیل انرژی

گردیده است. لازم به ذکر است داده‌های خام سرعت باد که برحسب نات (Knot) درج می‌شوند با ضرب ۰/۵۱۴ به متر بر ثانیه تبدیل شد چرا که در اکثر منابع و تحقیقات پیشین در این زمینه از واحد متر بر ثانیه استفاده شده است (Omidvar and Dehqan Tazarjani, 2012).

داده‌های جمع‌آوری شده شامل سرعت و جهت باد به گونه‌ای مرتب شدند که جدول فراوانی جهت-سرعت باد که نشانگر فراوانی تعداد وقوع باد با سرعت مشخص می‌باشد، برای هر ماه و در نهایت کل سال‌ها در طول ۱۰ سال رسم گردید. تحقیقات بسیار نشان داده‌اند که سرعت باد در ارتفاعات بالاتر، از رابطه ۱ که یک فرمول تجربی است بدست می‌آید (Anonymous, 1993; Al-Mohamad and Karmeh, 2003).

$$V = V_{mes} \left(\frac{H}{H_{mes}} \right)^{\alpha} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن V سرعت باد در ارتفاع H (موردنظر) و V_{mes} سرعت باد در ارتفاع H_{mes} (ارتفاع مبنا برابر ۱۰ متر) است. α بیانگر ضریب زبری سطح است که به عوارض سطحی، زمان، سرعت باد و دما بستگی دارد (Alimi et al., 2012) و مقدار آن در این تحقیق در بازه ۰/۱۲۸ تا ۰/۱۶۰ فرض شده است (Kwon, 2010). مقدار میانگین برای این ضریب ۰/۱۴ (برای سطوح با زبری کم) و برای زمین‌های صاف، آب یا سطوح یخ زده با کمترین مقدار برابر ۰/۱۰ و برای زمین‌های جنگلی و پوشیده از درختان بیش از ۰/۲۵ می‌باشد (Ramachandra et al., 2005). همانطور که اشاره شد، مقدار ضریب زبری معمولاً حد وسط این بازه و برابر ۰/۱۴۳ لحاظ می‌گردد که در این مطالعه نیز این مقدار مورد استفاده قرار گرفته است.

تخمین پتانسیل نظری انرژی باد

منظور از پتانسیل انرژی باد، میزان توانایی باد در تولید انرژی الکتریکی است. با افزایش پتانسیل انرژی باد، میزان برق تولید شده افزایش و در نتیجه کارایی سامانه تبدیل انرژی باد افزایش می‌یابد (Ahmed Shata and Hanitsch, 2006). مطالعات نشان داده است تغییر ۱۰ درصدی در میزان سرعت باد موجب تغییر توان تولید شده از توربین تا ۲۵٪ می‌شود

(Anonymous, 2012). داده‌های سرعت باد در محاسبات پتانسیل سنجی انرژی باد، متغیر تصادفی پیوسته هستند که در یک بازه مشخص، می‌توانند تمام مقادیر ممکن را شامل شود (Karsli and Gecit, 2003). اما به دلیل اینکه جمع‌آوری داده‌ها از ایستگاه‌های هواشناسی با فواصل زمانی سه ساعته انجام گرفته است، تابع توزیع چنین احتمالی یک تابع گسسته خواهد

نرم افزار متلب برای این منظور کمک گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه و روش جمع‌آوری داده

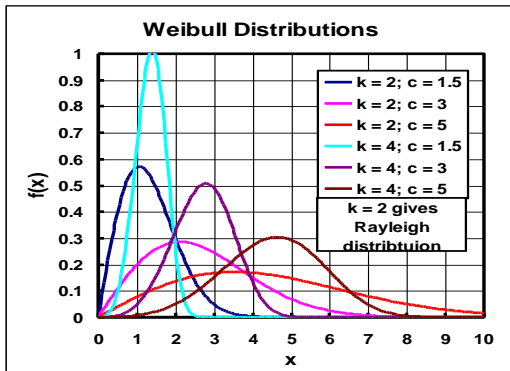
اقلید، یکی از شهرهای شمالی استان فارس ایران می‌باشد. جمعیت این شهرستان بر طبق سرشماری سال ۱۳۹۰، برابر با ۹۳۹۷۵ نفر بوده است. فاصله آن از شیراز، اصفهان، یزد و یاسوج به ترتیب ۲۷۵، ۲۳۰، ۲۱۰ و ۱۸۰ کیلومتر می‌باشد. از شمال به شهرستان آباد، از جنوب به شهرستان‌های مرودشت و سپیدان، از شرق به شهرستان خرمبید و از غرب به استان‌های اصفهان و کهگیلویه و بویراحمد محدود می‌شود. اقلید واقع در طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۳ دقیقه و بلندی ۲۳۰۰ متری از سطح دریا می‌باشد (شکل ۱). شهرستان اقلید جزء مناطق کوهستانی و مرتفع کشور ایران به شمار می‌رود و شهر اقلید بلندترین شهر در استان فارس و ششمین شهر مرتفع کشور است. ارتفاعات آن دنباله سلسله جبال زاگرس بوده و حداکثر ارتفاع آن از سطح دریا ۳۹۴۳ متر بنام کوه بل در جنوب اقلید است. این منطقه دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل می‌باشد. حداکثر درجه حرارت برابر با ۳۷ درجه سانتیگراد و حداقل آن ۲۲- درجه سانتیگراد در سردترین ماه سال است. متوسط بارندگی سالیانه در این شهر بین ۳۳۰-۳۰۰ میلی‌متر است. لازم به ذکر است این شهر یکی از نواحی بادخیز استان بوده و اکثر مواقع سال سرعت باد قابل ملاحظه است. بنابر گزارشات واصله سرعت باد به ۱۶۰ کیلومتر در ساعت نیز رسیده است.



شکل ۱. نقشه ایران، استان فارس و موقعیت شهرستان اقلید

یکی از معیارهای مهم در احداث مکان‌هایی جهت استحصال انرژی باد همچون نیروگاه‌های بادی، اندازه‌گیری سرعت میانگین سالانه و نیز چگالی توان باد است (Zahedi et al., 2005). برای این منظور و انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری، داده‌های سه ساعته متوالی شامل سرعت باد در طول سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ در شهرستان اقلید استان فارس جمع‌آوری

توزیع ویبل با استفاده از رابطه ۴ قابل محاسبه می‌باشد:



شکل ۲. نمودار توزیع ویبل با پارامترهای k و c مختلف

$$F(V) = \int_{x_{\min}}^V f(V) dV = \int_0^{\frac{V}{c}} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV = 1 - e^{-(V/c)^k} \quad \text{Weibull} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در آن $F(V)$ تابع توزیع تجمعی برای مقادیر مشاهده شده سرعت باد است. با در نظر گرفتن $k=2$ ، تابع توزیع تجمعی توزیع رایلی بدست می‌آید که به صورت رابطه ۵ است.

$$F(V) = 1 - e^{-(V/c)^2} \quad \text{Rayleigh} \quad (\text{رابطه ۵})$$

مقدار بیشینه تابع چگالی احتمال (PDF) را محتمل‌ترین نقطه یا در اصطلاح آماری نما (مد) می‌نامند. با مشتق‌گیری از تابع چگالی احتمال توزیع ویبل (رابطه ۳) و سپس برابر صفر قرار دادن آن طبق رابطه ۶ داریم:

$$\frac{df}{dV} = \frac{d}{dV} \left[\frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \right] = \frac{k}{c^k} \left[(k-1)V^{k-2} - V^{k-1} \frac{kV^{k-1}}{c^k} \right] e^{-(V/c)^k} = 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

با فاکتورگیری از عبارت داخل براکت و برابر صفر قرار دادن آن به صورت رابطه ۷ داریم:

$$\left[(k-1)V^{k-2} - V^{k-1} \frac{kV^{k-1}}{c^k} \right] = \frac{V^{k-2}}{c^k} \left[(k-1)c^k - kV^k \right] = 0 \quad (\text{رابطه ۷})$$

با حل معادله فوق، رابطه ۸ برای محاسبه محتمل‌ترین سرعت (نما) برای تابع چگالی احتمال توزیع ویبل (V_{mp}) به دست می‌آید:

$$V_{mp} = c \sqrt[k]{\frac{k-1}{k}} \quad (\text{رابطه ۸})$$

محاسبه پارامترهای تابع توزیع ویبل و رایلی

روش‌های مختلفی برای محاسبه پارامترهای شکل و مقیاس در توابع ویبل و رایلی وجود دارد. روش "برازش حداقل مربعات" یکی از رایج‌ترین این روش‌هاست که با استفاده از معادله

بود که در این شرایط لازم است از یک تابع توزیع پیوسته برای توزیع فراوانی سرعت‌های باد استفاده شود. برای این منظور در مطالعات پیشین، اغلب از تابع توزیع احتمال ویبل و رایلی استفاده شده است (Gupta, 1986; Isaac, ; Salahi, 2004). توزیع رایلی با توجه به تک پارامتری بودن در مقایسه با توزیع ویبل بسیار ساده‌تر است. مقدار چگالی این تابع توزیع به ازای مقادیر مختلف سرعت باد (V) از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$f(V) = \frac{2V}{c^2} e^{-(V/c)^2} \quad 0 \leq V < \infty \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن $f(V)$ احتمال وقوع مقادیر مختلف سرعت باد، c ($c > 1$) پارامتر مقیاس توزیع بر حسب (متر بر ثانیه) و V سرعت باد (برای $V < 0$ مقدار $f(V) = 0$ است) بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد.

تابع چگالی احتمال توزیع ویبل (رابطه ۳) دارای دو پارامتر شامل پارامتر شکل (k) و پارامتر مقیاس (c) است. رابطه تابع چگالی احتمال این توزیع نشان می‌دهد که توزیع رایلی حالت خاصی از این توزیع با در نظر گرفتن پارامتر شکل (k) برابر است (Dahmouni et al., 2011; Kwon, 2010; Kamau et al., 2010; Sherbafian, 2008).

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \quad 0 \leq V < \infty \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن V ، c و k ($k > 0$) به ترتیب سرعت باد، پارامتر مقیاس (میانگین) و پارامتر بدون بعد معروف به پارامتر شکل (واریانس یا چولگی) هستند. لازم به توضیح است که تابع چگالی احتمال توزیع‌های مذکور بیانگر کسری از زمان است که سرعت باد مورد نظر در آن منطقه غالب است. گزارش شده است که توزیع ویبل نسبت به توزیع رایلی از انعطاف بیشتری در رابطه با سرعت‌های نزدیک به صفر برخوردار است (Dundar and Inan, 2001).

همان‌طور که اشاره شد، پارامترهای توزیع ویبل (k و c) در شکل نمودار و چولگی آن مؤثر است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، با افزایش مقدار c برای مقادیر ثابتی از k ، نمودار توزیع پهن‌تر می‌شود. به همین دلیل است که پارامتر c را پارامتر مقیاس می‌نامند که واحد آن نیز متر بر ثانیه (معادل واحد سرعت باد) است. همچنین از نمودارها چنین استنباط می‌شود که با افزایش مقدار k برای مقادیر مشخصی از c ، مقدار ماکزیمم تابع چگالی احتمال افزایش می‌یابد. از این رو پارامتر k به پارامتر شکل شناخته می‌شود. تابع توزیع تجمعی (CDF)

بنابر رابطه ۹، توان باد با متوسط مکعب سرعت باد متناسب است که مقدار آن از رابطه (گشتاور مرتبه سوم تابع توزیع ویبل) قابل برآورد است. بایستی توجه داشت که متوسط مکعب سرعت باد با مکعب متوسط سرعت متفاوت است. روابط ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مقدار \bar{V}^3 را برحسب پارامترهای توزیع ویبل (توزیع رایلی) و ریشه سوم آن را (V_{rmc}) طبق رابطه ۱۲ ارائه می‌دهند (Patel, 1999):

$$(\bar{V}^3)_{Weibull} = c^3 \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$(\bar{V}^3)_{Rayleigh} = c^3 \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$V_{rmc} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن Γ تابع معروف گاما (Gamma function) است (رابطه ۱۳).

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{x-1} du \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

بنابر رابطه ۹، چگالی توان باد (WPD) که عبارت است از توان باد به ازای سطح جاروب شده توسط توربین بادی ($P(V)/A$)، از رابطه ۱۴ بدست می‌آید (Keyhani et al., 2010). در روابط فوق چگالی هوا (کیلوگرم/مکعب متر) در منطقه مورد مطالعه از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود (Keyhani et al., 2010):

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

که در آن P متوسط فشار هوا (Pa)، T متوسط دمای هوا ($^{\circ}\text{K}$)، R ثابت گازها (برابر $287 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$) است. برای منطقه مورد مطالعه در این تحقیق چگالی هوا حدود $1/0.8 \text{ kg m}^{-3}$ محاسبه شد و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. چگالی هوا تابعی از فشار و درجه حرارت است که تغییرات مربوط به آن در محاسبات انرژی باد چندان با اهمیت تلقی نمی‌شود (Jamil, 2001). چگالی هوا با افزایش میزان بخار آب موجود در آن کاهش می‌یابد که در این تحقیق تصحیح لازم برای آن قابل چشم پوشی است (Abbaspour, 1996).

طبق آنچه در این بخش مورد بحث قرار گرفت، با در نظر گرفتن مقادیر ثابت در رابطه ۱۴، معادله نهایی محاسبه توان توربین بادی را می‌توان به صورت رابطه ۱۶ بازنویسی نمود:

$$\bar{P}(V) = 0.3925 D^2 V^2 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

که در آن D قطر روتور یا قطر سطحی از توربین است که تحت تأثیر وزش باد قرار می‌گیرد.

رگرسیون و رابطه خطی بین مقادیر سرعت باد و احتمال وقوع هریک بدست می‌آید. روش "برآورد درست‌نمایی بیشینه" (MLE) نیز یکی دیگر از روش‌های برآورد پارامترهای توزیع است. وقتی بر مجموعه‌ای از داده‌ها عملیات انجام می‌شود یک مدل آماری به دست می‌آید آنگاه درست‌نمایی بیشینه می‌تواند تخمینی از پارامترهای مدل ارائه دهد. در حالت کلی روش MLE در مورد یک مجموعه مشخص از داده‌ها عبارتست از نسبت دادن مقادیری به پارامترهای مدل که در نتیجه آن توزیعی تولید شود که بیشترین احتمال را به داده‌های مشاهده شده نسبت دهد.

پارامترهای توزیع ویبل و رایلی را نیز می‌توان با داشتن داده‌های تصادفی سرعت باد با استفاده از روش برآورد درست‌نمایی بیشینه به آسانی محاسبه نمود. پارامترهای محاسبه شده برای توزیع‌های احتمالی به کمک این روش با توجه به اطلاعات موجود از داده‌های تصادفی محتمل‌ترین حالت می‌باشد که آن‌ها را می‌توان تخمین صحیحی از پارامترها دانست. به کمک نرم‌افزار متلب و با استفاده از دستور wblfit (data) پارامترهای توزیع به کمک روش MLE و برای داده‌های در ارتفاع ۱۰ و ۳۰ و ۴۰ متر محاسبه شد. خروجی این دستور به ترتیب پارامترهای c و k است (Anonymous, 2013).

مقدار توان تئوریک باد

همانطور که پیش از این اشاره شد، توان باد حاصل انرژی جنبشی به ازای واحد جرم باد ($V^2/2$) و دبی جرمی بادی است که در بین تیغه‌های توربین جریان می‌یابد (ρVA). بدیهی است هرچه سرعت وزش باد در منطقه بیشتر شود، پتانسیل انرژی باد برای تولید انرژی الکتریسیته بالاتر خواهد بود. عوامل دیگری نظیر اندازه توربین نیز بر توان خروجی توربین مؤثر است. افزایش اندازه توربین به همراه افزایش اندازه طول پرها موجب افزایش سطح تماس باد با توربین شده و در نتیجه سرعت چرخش پره‌های توربین نیز افزایش می‌یابد. طبق توضیحات فوق، توان توربین را با در نظر گرفتن دو پارامتر سرعت باد و سطح تماس آن با پره می‌توان از رابطه ۹ محاسبه نمود (Fagbenle et al., 2011; Barber et al., 1977; Hennessey, 1977):

$$\bar{P}(V) = \int_{V_{min}}^{V_{max}} P(V) f(V) dV = \int_0^{\infty} \frac{\rho A V^3}{2} f(V) dV = \frac{\rho A}{2} \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV = \frac{\rho A V^3}{2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن \bar{P} ، متوسط ظرفیت توان باد (وات)، ρ چگالی هوا (کیلوگرم/مکعب متر)، A بیانگر سطح جاروب شده π در شعاع روتور r ($r^2 \pi$) (مترمربع)، V سرعت باد (متر بر ثانیه) است.

محاسبه چگالی انرژی باد

در گام بعدی پس از محاسبه چگالی توان باد (WED) (رابطه ۱۴)، مقدار چگالی انرژی باد را می‌توان برای یک منطقه و در یک بازه زمانی (T بر حسب ساعت) به کمک رابطه ۱۷ تخمین زد (Eskin *et al.*, 2008). T برای یک دوره ماهانه (۷۲۰ یا ۷۴۴ ساعت) و یا برای یک دوره سالانه در نظر گرفته می‌شود. با محاسبه این شاخص، می‌توان در مورد وضعیت یک مکان از نظر پتانسیل انرژی باد قضاوت نمود.

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(\frac{k+3}{k} \right) T \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

سایر مشخصات سرعت باد

محتمل‌ترین سرعت باد یا سرعت بیشترین احتمال وقوع باد (V_{mp}) در بخش‌های پیش معرفی شد. سرعت نامی باد یا سرعت بادی که انرژی الکتریکی بیشینه را تولید می‌کند، سرعتی از باد است که پتانسیل تولید بیشترین انرژی را در طول سال دارد. این سرعت با V_{MaxE} یا V_{Emp} نشان داده می‌شود که به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی توربین‌های بادی شمرده می‌شود (Elamouri and Ben Amar, 2008) و از رابطه ۱۸ زیر بدست می‌آید:

$$V_{Emp} = c \left(1 + \frac{2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

هر توربین دارای مشخصه‌های دیگری نیز می‌باشد که عبارتند از: سرعت حداقل (V_i) و سرعت حداکثر (V_0). منظور از V_i کمترین مقدار سرعت بادی است که قادر به تولید برق نمی‌باشد و در واقع سرعت باد برای شروع به بازدهی نیرو توسط توربین است. V_0 نیز بیشترین مقدار سرعت باد را که در سرعت‌های بالاتر از آن مقدار توان تولید شده نسبت به توان بیشینه کاهش می‌یابد، نشان می‌دهد. در حقیقت در سرعت‌های بالا، توربین برای جلوگیری از آسیب طوری طراحی شده است که پره‌ها موازی با جهت وزش باد قرار می‌گیرند و باد مانع از چرخش مناسب پره‌ها می‌شود (متوقف می‌شود) و در نتیجه میزان برق تولیدی و بازده توربین کاهش می‌یابد. سرعت کمینه و سرعت بیشینه در اکثر توربین‌ها به ترتیب ۳ و ۲۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود (Weisser, 2003). سرعت حدی ۳ متر بر ثانیه به دلیل اینکه سرعت حداقل بسیاری از توربین‌های تجاری موجود در کشور است، اهمیت دارد. سرعت حداکثر توربین‌ها نیز بین ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه متغیر است که مقدار آن نمی‌تواند از ۲۵ متر بر ثانیه تجاوز کند. با داشتن اطلاعات سرعت حداقل و حداکثر می‌توان احتمال رخداد سرعت باد را بین دو مقدار (v_1 و v_2) با استفاده از رابطه ۱۹ بدست آورد

(Wei Zhou and *et al.*, 2005).

$$P(v_1 < v < v_2) = \exp \left[- \left(\frac{v_1}{C} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{v_2}{C} \right)^k \right] \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

تحقیقات نشان داده است که عملکرد اقتصادی توربین‌های بادی مستلزم کارکرد حداقل ۴۰۰۰ ساعت در سال است (کاوپانی، ۱۳۷۴). همانطور که در رابطه بالا دیدیم، توان نامی را می‌توان بر حسب سرعت نامی محاسبه کرد. بنا بر توضیحات فوق اهمیت سرعت مناسب توربین در بازه V_i تا V_0 جهت محاسبه صحیح توان توربین مهم و اساسی است.

روش‌های متعددی برای محاسبه ساعات موجودیت باد در یک منطقه وجود دارد که اغلب وقت‌گیر هستند (Omidvar and Dehqan Tazarjani, 2012). به کمک رابطه ۲۰ می‌توان ساعات موجودیت باد در یک مکان را به گونه ساده‌تری برآورد کرد.

$$WE_{\left(\frac{h}{yr}\right)} = \left(\frac{\sum f_i}{N} \right) \times t \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

در این رابطه WE برابر میزان موجودیت باد (ساعت در سال)، f_i مقادیر فراوانی رده‌های سرعت باد، N طول دوره آماری مورد مطالعه (سال) و در نهایت t فاصله زمانی بین برداشت‌های داده‌های باد (ساعت) است (Omidvar and Dehqan Tazarjani, 2012).

انحراف معیار یکی از رایج‌ترین معیارهای پراکندگی داده‌های آماری محسوب می‌شود (Alizadeh, 2006; Rezaei and Mirmohammadi Meiboudi, 2005). در این بررسی، انحراف معیار بیان‌کننده میزان تغییرات سرعت باد است که در حقیقت ثبات باد را در مکان مورد مطالعه نشان می‌دهد. بنابراین هرچه مقدار این پارامتر کمتر به سمت صفر باشد، پراکندگی در اطراف میانگین کمتر و داده‌ها همگن‌تر هستند؛ لذا سرعت‌های ناگهانی و شدید باد کمتر بوجود می‌آید (Omidvar and Dehqan Tazarjani, 2012).

از آنجایی که سرعت‌های باد پیشامدهای تصادفی تلقی می‌گردند، انتظار آن است که یک توزیع احتمال را بتوان با آن‌ها برزش داد که لازم است توزیع موردنظر به خوبی با داده‌ها برازش داشته باشد. در اغلب مطالعات صورت گرفته توزیع سرعت باد بدون بررسی برازش و اعتبار سنجی فرض، با توزیع ویبل سنجیده می‌شود. بی شک، بدون استفاده از ابزارهای نکویی برازش نمی‌توان در این مورد نظر قطعی داد (Fatehi Peykani, 2009). لذا در این تحقیق به جهت ارائه تصمیم با قابلیت اعتماد نسبت به خطای مدل، آزمون نکویی برازش برای توزیع‌های ویبل و رایلی اجرا می‌گردد. در عمل، سرمایه‌گذاری جهت انجام پروژه‌های بادی را نمی‌توان براساس تصمیمات با

نتایج و بحث

با توجه به این مسأله که توان حاصل از انرژی باد در واحد سطح (چگالی انرژی باد) و همچنین جهت این وزش‌ها از عوامل مهم و تعیین کننده در تعیین پتانسیل انرژی باد در یک منطقه و تعیین مناسب‌ترین محل در نصب توربین است و دانستن سرعت و جهت باد به صورت ساعتی به منظور یافتن فراوانی سرعت باد و در نهایت پتانسیل تولید انرژی ضروری است. در این تحقیق با بهره‌گیری از داده‌های اخذ شده از ایستگاه هواشناسی شهرستان اقلید در استان فارس برای سرعت باد در طی ۱۰ سال (سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ میلادی) به پتانسیل سنجی میزان انرژی باد پرداخته شد. همچنین از مدل‌های متعددی نظیر ویبل و رایلی به منظور بیان توزیع سرعت باد استفاده شد. نتایج جزئی‌تری از این محاسبات در ادامه تشریح می‌گردد.

اوضاع کلی باد منطقه

به منظور درک وضعیت کلی باد در ایستگاه مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰ متری، نمودار میانگین سرعت باد برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ رسم گردید (شکل ۳). این نمودارها روند تغییر سرعت باد را در سال‌های مختلف نشان می‌دهد. به طور کلی سرعت باد در بازه ۰/۶ تا ۷ متر بر ثانیه متغیر است. مقدار متوسط سرعت باد در طول دوره آماری نیز حدود ۲/۹۶ متر بر ثانیه است. نکته‌ای دیگری که از شکل ۳ برمی‌آید این است که کمترین سرعت‌های وزش باد متعلق به ماه‌های گرم سال است. برعکس بیشترین سرعت باد برای ماه‌های فوریه و مارس حادث می‌شود که از ماه‌های سرد سال محسوب می‌شوند.

درجه اطمینان پایین اجرا نمود. در این مطالعه از آزمون‌های نکویی برازش لیلی‌فورس (Lilliefors test) و برازش منحنی در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شد که در ادامه بیشتر در خصوص این روش‌ها توضیح داده خواهد شد. همچنین در این تحقیق اعتبار سنجی روش برازش منحنی با استفاده از پارامترهای آماری نظیر ضریب تبیین (R^2)، مجموع مربعات خطا (SSE) و کمترین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب به شرح زیر صورت گرفت:

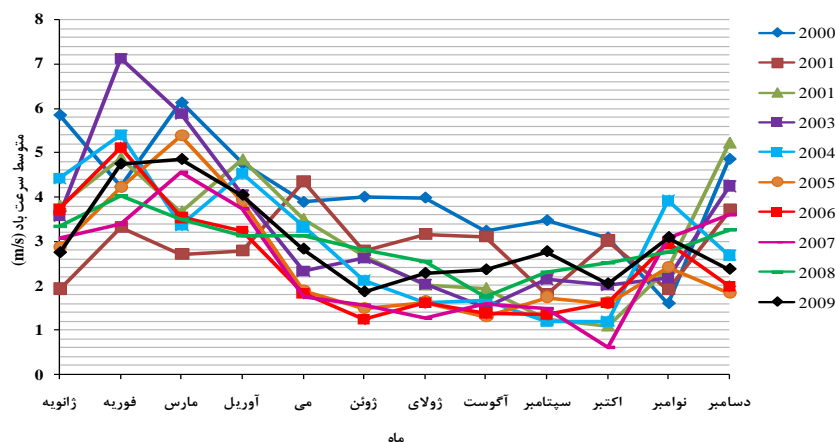
$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(\hat{x}_i - \bar{x})]^2}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2]} \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

که x_i مقدار مشاهده شده، \hat{x}_i مقدار پیش بینی شده و \bar{x} برابر میانگین مقادیر مشاهده شده می‌باشد.

به منظور نمایش جهت وزش باد در منطقه از نمودارهای گلباد ۱۶ جهته در ماه‌های مختلف برای ۱۰ سال رسم شد. هدف از رسم این‌گونه نمودارها، انتخاب مناسب‌ترین توربین با توجه به وضعیت بادهای منطقه است. به همین دلیل از داده‌های جهت باد غالب در منطقه برای ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین که از ایستگاه هواشناسی اخذ شد، استفاده شده است. نمودار گلباد سالانه درصد و جهت باد را در جهات ۱۶ گانه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است جهت انجام محاسبات ریاضی و آنالیز داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای Microsoft Office Excel 2007 و MATLAB 2013 استفاده شده است.



شکل ۳- متوسط سرعت باد در ماه‌های مختلف در ارتفاع ۱۰ متری طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۹

سرعت باد نشان دهنده ثبات باد در یک منطقه است. مقادیر ماهانه و سالانه انحراف معیار سرعت‌های باد در ارتفاع ۱۰ و ۴۰

جدول ۱ میزان انحراف معیار داده‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در بخش قبل اشاره شد، انحراف معیار داده‌های

در این سال متفاوت است که این تغییر نیز می‌تواند به دلیل شرایط آب و هوایی خاص سال باشد. همچنین می‌توان از روی نمودار ساعاتی از روز را که کمترین و بیشترین سرعت باد وجود دارد مشخص نمود.

در فاصله ساعات ۱۲ شب تا ۶ صبح کمترین سطح وزش باد و برای سال‌های ۹ صبح تا ۳ بعداز ظهر بیشترین سرعت باد مشاهده شد.

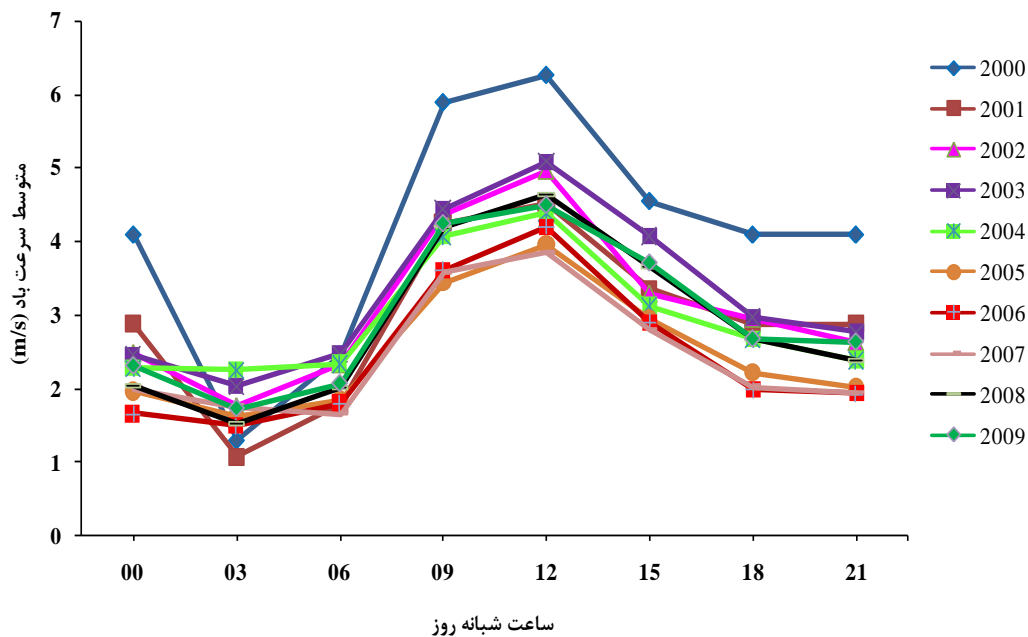
توزیع سرعت باد در ساعات شبانه روز برای دوره آماری مورد مطالعه در شکل ۵ رسم شده است. این نمودار با هدف تحلیل بهتر جهت استحصال بهینه‌تر از باد در تولید انرژی رسم می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشینه سرعت باد در ساعات روز (ساعت ۹ الی ۱۲ صبح) برابر ۴/۶ و ۴/۲ متر بر ثانیه و کمترین مقدار آن در ساعات نیمه شب (ساعت ۳ و ۶ صبح) برابر ۱/۶ و ۲/۴ متر بر ثانیه است. بدیهی است که این نمودار به صورت نمودار چندجمله‌ای است که در ساعات ظهر و بعدازظهر به اوج خود می‌رسد. این نتیجه نیز با در نظر گرفتن اختلاف دما قابل توجیه منطقی می‌باشد. از این رو همواره در اغلب نقاط زمین بادهای طوفانی و متلاطم در روزها و در شب اوضاع باد آرام‌تر است. با این توصیف، پتانسیل تولید انرژی بادی در روز بیشتر و در مقابل بخش اعظم الکتریسیته مصرفی در ساعات شب است که این خود از مزایای این پدیده محسوب می‌شود.

متری در جدول آورده شده است. با توجه به این جدول در ماه آگوست در هر دو ارتفاع مقدار انحراف معیار کمترین مقدار را داراست که بیانگر همگنی داده‌های سرعت باد و نبود سرعت‌های ناگهانی و شدید در این ماه است. همچنین با توجه به میانگین انحراف معیار در کلیه ماه‌های سال با افزایش ارتفاع ثبات وزش باد کاهش می‌یابد.

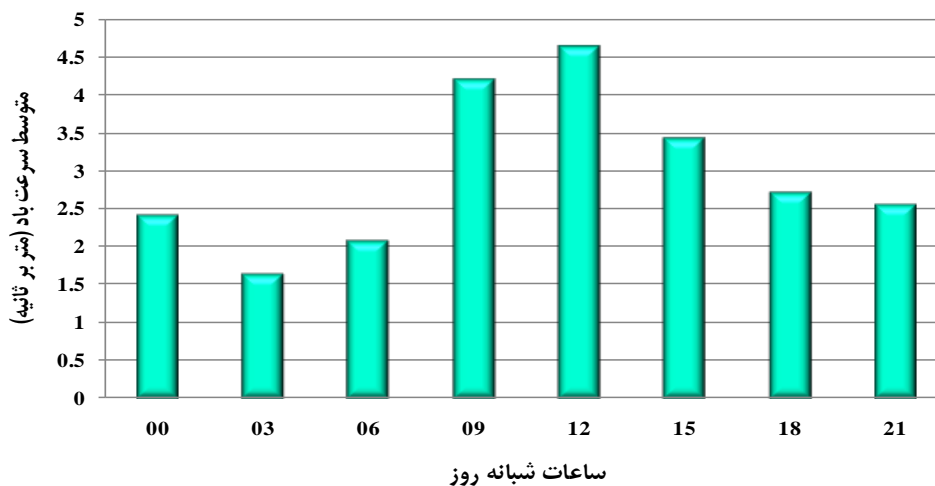
براساس رابطه ۱۹ احتمال وزش باد با سرعت بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه (سرعت‌های فرضی حداقل و حداکثر برای اکثر توربین‌های تجاری موجود در کشور) در ارتفاع ۱۰ و ۴۰ متر برای ایستگاه مورد نظر به ترتیب ۳۶/۴ و ۴۳/۶ درصد از کل ساعات موجودیت باد (۱۰۹۶/۲ ساعت در سال) محاسبه شد. با این محاسبات، می‌توان ادعا نمود که عملکرد اقتصادی توربین بادی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب حدود ۳۹۹ و ۴۷۷/۹۴ ساعت در سال است. لازم به توضیح است مجموع ساعات موجودیت باد در منطقه با استفاده از رابطه ۲۰ محاسبه شد که پارامترهای آن $(\sum f_i$ و N و t) به ترتیب برابر ۳۶۵۴، ۱۰ و ۳ بوده و بدین ترتیب کل ساعات موجودیت باد در ایستگاه مورد نظر برابر ۱۰۹۶/۲ ساعت در سال برآورد شد. تغییرات سرعت باد روزانه در شکل ۴ نمایش داده شده است. روند مشابه برای میانگین سرعت باد در ساعات مختلف در طول سال‌های مورد بررسی مشهود است. همانطور که مشخص است روند تغییرات برای سال ۲۰۰۰ نیز فقط با اندکی بیشتر بودن سطح سرعت باد

جدول ۱. انحراف معیار ماهانه و سالانه سرعت‌های باد در ارتفاع ۱۰ و ۴۰ متری از سطح زمین برای ایستگان اقلید

ماه	انحراف معیار سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)	انحراف معیار سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)
ژانویه	۳/۵۶۷۲	۴/۳۳۱۲
فوریه	۳/۸۹۷۷	۴/۷۳۲۵
مارس	۳/۲۴۸۳	۳/۹۴۴۱
آوریل	۲/۸۳۳۰	۳/۴۳۹۸
می	۱/۹۹۷۸	۲/۴۲۵۸
ژوئن	۱/۲۹۳۵	۱/۵۷۰۶
ژولای	۱/۱۹۹۷	۱/۴۵۶۷
آگوست	۰/۹۴۳۰	۱/۱۴۵۰
سپتامبر	۱/۲۲۳۸	۱/۴۸۵۹
اکتبر	۱/۵۳۹۶	۱/۸۶۹۴
نوامبر	۲/۶۸۰۹	۳/۲۵۵۲
دسامبر	۳/۵۴۱۷	۴/۳۰۰۳
مجموع سال‌ها	۲/۳۳۰۵	۲/۸۲۹۷



شکل ۴. نمودار تغییرات روزانه سرعت باد در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۹ در ایستگاه اقلید



شکل ۵. توزیع سرعت باد در ساعات شبانه روز برای دوره آماری

جدول ۲ ارائه شده است. محتمل‌ترین سرعت باد بین ۰/۴۷۵ و ۱/۹۷۶ تغییر می‌کند. متوسط سرعت نامی در ایستگاه مورد مطالعه حدود ۷/۸۱ متر بر ثانیه است. این رقم بدین معناست که چنانچه در ایستگاه استفاده از انرژی باد مدنظر باشد، بهتر است به سازندگان توربین بادی توصیه شود که حداکثر بار خروجی توربین بادی در این سرعت بدست آید. چراکه غالباً سرعت‌های بالا در ایستگاه داده‌برداری در این تحقیق، در محدوده سرعت نامی مشاهده می‌شود. مقادیر سرعت پیش‌بینی شده به تفکیک سال‌ها در دو ستون آخر جدول ۲ آورده شده است.

محاسبه پارامترهای توزیع‌های آماری

پارامترهای توزیع ویبل و رایلی با استفاده از روش برآورد درست‌نمایی بیشینه در نرم افزار متلب محاسبه شد که نتایج حاصل برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ در جدول ۲ آمده است. با توجه به این جدول، کمترین میزان پارامتر k مربوط به سال ۲۰۰۵ (برابر ۱/۱) و بیشترین مقدار آن در سال ۲۰۰۸ (۲/۰۹۴) محاسبه شد. مقدار متوسط پارامتر k برای کل دوره آماری برابر ۱/۴۸ است. مقدار پارامتر c نیز حداکثر ۴/۵ و حداقل ۲/۷۶ متر بر ثانیه و با میانگین ۳/۲۳ متر بر ثانیه بدست آمد. مقادیر محتمل‌ترین سرعت باد (V_{mp}) و سرعت نامی باد (V_{Emp}) در

جدول ۱. مؤلفه‌های انرژی باد در ایستگاه اقلید در ارتفاع ۱۰ متری برای سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۰۰

سال	k (-)	c (m/s)	V_{mp} (m/s)	V_{Emp} (m/s)	$P (v < 2.5 < 3) (\%)$	\bar{V} (اندازه‌گیری شده)	ویبل \bar{V} (پیش‌بینی شده)	رایلی \bar{V} (پیش‌بینی شده)
۲۰۰۰	۱/۵۱۰	۴/۵۲۵	۱/۶۸۷	۱۰/۳۷۶	۵۸/۴۱۷	۴/۰۸۴	۴/۲۲۵	۴/۰۳۹
۲۰۰۱	۱/۴۷۵	۳/۱۶۹	۱/۱۲۶	۹/۰۵۲	۳۹/۷۵۰۴	۲/۸۷۷	۳/۰۳۵	۲/۸۵۰
۲۰۰۲	۱/۴۵۵	۳/۳۸۸	۱/۱۸۷	۷/۳۰۵	۴۳/۲۶۱	۳/۱۰۳	۳/۲۳۰	۳/۰۳۹
۲۰۰۳	۱/۴۲۱	۳/۶۱۸	۱/۳۶۰	۸/۰۴۵	۴۶/۴۶۵	۳/۲۹۹	۳/۴۶۲	۳/۲۲۸
۲۰۰۴	۱/۲۴۶	۳/۲۳۳	۰/۷۴۰	۸/۲۱۳	۳۳/۴۱۴	۲/۹۴۵	۳/۲۶۳	۲/۸۸۹
۲۰۰۵	۱/۱۱۱	۲/۷۶۲	۰/۵۱۱	۹/۷۹۷	۴۰/۰۷۴	۲/۵۱۳	۳/۰۴۸	۲/۴۹۷
۲۰۰۶	۱/۳۰۱	۲/۶۲۸	۰/۴۷۵	۸/۰۱۸	۳۰/۴۷۹	۲/۴۵۸	۲/۶۸۱	۲/۳۸۹
۲۰۰۷	۱/۳۷۷	۲/۶۳۷	۰/۸۴۸	۶/۸۱۰	۳۰/۲۹۷	۲/۴۶۳	۲/۶۳۷	۲/۳۹۹
۲۰۰۸	۲/۰۹۴	۳/۰۸۰	۱/۶۵۷	۵/۵۴۶	۳۸/۸۱۴	۲/۹۰۴	۲/۷۵۶	۲/۷۸۰
۲۰۰۹	۱/۸۴۵	۳/۲۸۷	۱/۹۷۶	۵/۲۴۲	۴۲/۹۶۴	۲/۹۹۴	۲/۹۷۷	۲/۹۳۶
کل سال‌ها	۱/۴۸۳۶	۳/۲۳۲	۰/۳۶۳	۷/۸۱۰	۴۰/۳۹۳	۲/۹۶۴	۳/۱۳۱	۲/۹۰۴

(۲۰۰۹-۲۰۰۰) حاصل از اندازه‌گیری ایستگاه هواشناسی و آلفا (alpha) سطح معنی‌داری آزمون (۵٪ و ۱٪) است. آرگومان (متغیر ورودی) 'distr'، توزیع آماری موردنظر را مشخص می‌کند که در این تحقیق توزیع ویبل و رایلی بودند. با استفاده از رابطه بین توزیع مقدار حدی و ویبل ($\log(W) = EV$)، می‌توان آزمون را برای توزیع ویبل با استفاده از دستور lillietest انجام داد (Anonymous, 2013). با استفاده از این آزمون و محاسبه پارامتر h، این نتیجه حاصل شد که سرعت‌های مشاهده شده باد در ایستگاه مورد بررسی با توزیع ویبل همگون هستند.

$$h = \text{lillietest}(\log(\text{داده‌های سرعت باد مشاهده شده}), 0.05, 'ev')$$

$$h = 0$$

روش دیگری برای آزمون نکویی برازش داده‌ها وجود دارد که برازش منحنی نامیده می‌شود. هدف از انجام این آزمون تعیین برازش مناسب داده‌های سرعت باد با توزیع ویبل و رایلی است. به این منظور از ابزار "cftool" در نرم‌افزار متلب استفاده شد. خروجی بکارگیری این ابزار برای داده‌های فراوانی سرعت باد در ارتفاع‌های ۱۰ و ۴۰ متری از سطح زمین برای سال‌های مورد مطالعه در این تحقیق به شرح جدول ۳ است. همچنین شکل‌های ۷-۶ نمودار برازش هر یک از ارتفاع‌های ۱۰ و ۴۰ متر را برای داده‌های سرعت باد نشان می‌دهد. همانطور که از جدول ۳ پیداست بهترین نتایج برای توزیع ویبل و در ارتفاع ۱۰ متری بدست آمد که بیشترین ضریب تبیین (R^2)، کمترین میزان مجموع مربعات خطا (SSE) و کمترین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) حاصل شد. این نتیجه‌گیری مشابه نتایج حاصل از مطالعه داده‌های سرعت باد بیست ساله (۲۰۰۹-۲۰۰۰) ده ایستگاه سینوپتیک در کشور عربستان بود که در سال ۱۹۹۴ انجام شد و نشان داد که داده‌های سرعت باد تطابق بسیار خوبی

ارزیابی توزیع‌های آماری به کمک آزمون نکویی برازش منحنی در طی این تحقیق، احتمال تجربی مقادیر گسسته سرعت باد با توزیع ویبل و رایلی جایگزین شدند. صحت این عمل را می‌توان با آزمون‌های مختلف نکویی برازش ارزیابی کرد. آزمون‌هایی چون کی-دو (Chi-square)، آزمون اندرسون-دارلینگ (Anderson-Darling)، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) و آزمون لی‌لی‌فورس از این جمله اند. کلیه این آزمون‌ها در جهت تعیین اینکه آیا نمونه مستخرج از جامعه از توزیع مشخصی تبعیت می‌کند، به کار می‌رود. با استفاده از این آزمون‌ها می‌توان صحت جایگزینی احتمال تجربی داده‌ها را با توزیع مورد نظر سنجید. در این مطالعه برای آزمون نکویی برازش فرض‌های زیر مطرح شدند:

$$H_0 = 0: \text{سرعت‌های مشاهده شده باد در ایستگاه‌های مورد}$$

بررسی، دارای توزیع ویبل هستند؛

$$H_1 = 1: \text{سرعت‌های مشاهده شده باد در ایستگاه‌های}$$

مورد بررسی، دارای توزیع ویبل نیستند.

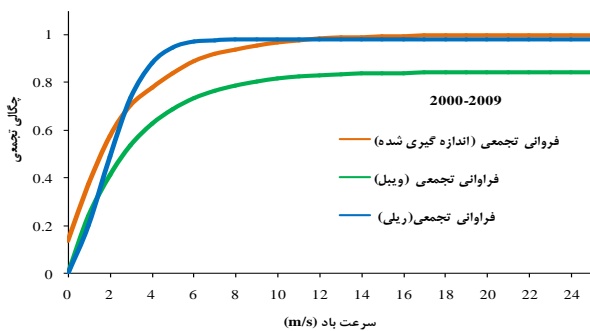
این آزمون با تقسیم داده‌ها به دو گروه و برآورد مقادیر مشاهده شده و مورد انتظار برای هر یک و در نهایت محاسبه آماره آزمون فرض صورت می‌گیرد. کلیه این آزمون‌ها در نرم‌افزار متلب قابل استفاده می‌باشند که در این تحقیق از آزمون لی‌لی‌فورس با توجه به توزیع مورد نظر و اندازه جامعه استفاده گردید. از دستور $h = \text{lillietest}(x, \alpha, \text{distr})$ برای این منظور استفاده شده که در آن h پارامتر فرض‌های آزمون است. آزمون، مقدار صحیح $h=1$ را در صورتی که فرض مخالف در سطح ۵٪ قبول شود و $h=0$ را اگر آزمون فرض صفر را در سطح ۵٪ بپذیرد، محاسبه می‌کند. x معرف داده‌های مورد آزمون و در اینجا مقادیر فراوانی سرعت باد در طی سال‌های مختلف

تغییراتی است که بیشترین تطابق در مناطق با کمترین درصد وقوع باد آرام اتفاق می‌افتد (Edgar and Obrien, 1986). در تحقیق حاضر نیز با توجه شکل‌های ۶-۷ تطابق دو توزیع با داده‌های اندازه‌گیری شده در سرعت‌های بالاتر بیشتر است.

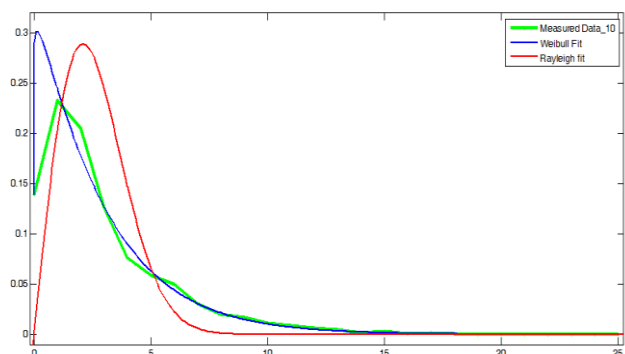
با توزیع ویبل دارند (Rehman et al., 1994). در سال ۱۹۸۳ جهت بررسی تطابق داده‌های سرعت باد بر روی اقیانوس‌های هند، آتلانتیک و آرام با توزیع ویبل، مشخص گردید که علی‌رغم تطابق این توزیع با داده‌های باد، میزان این تطابق دارای

جدول ۲. اعتبار سنجی توزیع آماری ویبل و رایلی در ارتفاع ۱۰ و ۴۰ متری

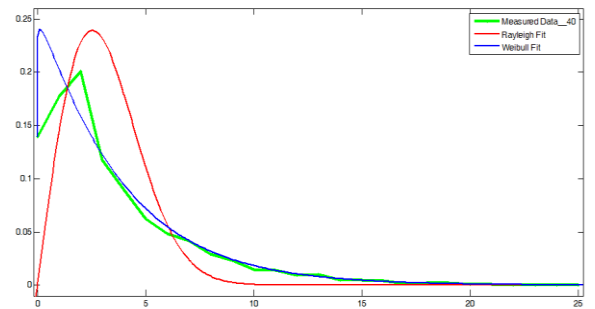
RMSE		SSE		Adjusted R ²		R ²		پارامترهای آماری
۴۰	۱۰	۴۰	۱۰	۴۰	۱۰	۴۰	۱۰	ارتفاع توربین از سطح زمین (متر)
۰/۰۱۰۶	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۲۷۱	۰/۰۰۱۱۶	۰/۹۶۷	۰/۹۸۹	۰/۹۶۸	۰/۹۸۹	ویبل
۰/۰۴۳۲	۰/۰۴۴۱	۰/۰۴۶۶	۰/۰۴۸۶	۰/۴۴۹	۰/۵۴۸	۰/۴۴۹	۰/۵۴۸	رایلی



شکل ۸. مقایسه احتمال توزیع تجمعی داده‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده با توزیع ویبل و رایلی در ارتفاع ۱۰ متری



شکل ۶. برازش داده‌های فراوانی سرعت باد اندازه‌گیری شده با توزیع ویبل و رایلی در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین



شکل ۷. برازش داده‌های فراوانی سرعت باد اندازه‌گیری شده با توزیع ویبل و رایلی در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین

چگالی انرژی و توان توربین بادی

قدرت حاصل از انرژی باد در واحد سطح (چگالی انرژی باد) در تعیین مکان‌یابی احداث سایت و همچنین پتانسیل سنجی انرژی باد اهمیت بسزایی دارد. این فاکتور و همچنین چگالی توان باد برای ایستگاه مورد مطالعه به ترتیب ۶۵۷/۶۷ کیلووات ساعت بر مترمربع (kWh m⁻²) و ۷۹ وات بر مترمربع (W m⁻²) برای سری زمانی سال‌های مختلف (۲۰۰۹-۲۰۰۰) در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین محاسبه گردید. نتایج جزئی‌تر حاصل از این بررسی بر حسب سطوح سرعت باد در جدول ۴ آمده است. با توجه به این نکته که برآورد فراوانی سرعت باد توسط هر دو توزیع ویبل و رایلی به خوبی صورت گرفت، توان و انرژی باد نیز در این بخش به خوبی برآورد گردید که در این بخش تنها مقدار آن برای سرعت‌های باد مختلف در ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری گزارش می‌شود. انرژی حاصل از سرعت وزش باد برای یک دوره زمانی عبارت است از مساحت جاروب شده زیر سطح منحنی توان ضربدر تعداد روزهای مورد نظر برای دوره زمانی. همانطور که در ردیف انتهایی جدول آمده است، با افزایش ارتفاع، انرژی و توان قابل استحصال افزایش می‌یابد بنابراین برای توصیه به سازندگان توربین بادی همواره ارتفاع ۴۰ متر به بالا از سطح زمین توصیه می‌شود. در درجه بندی نواحی براساس توان باد

از طریق رابطه ۴ که توسط آن فراوانی تجمعی باد برای توزیع ویبل و رایلی محاسبه می‌شود، احتمال وقوع تجمعی سرعت‌های بادهای مختلف در فاصله سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۹ بدست آمد و از طریق نمودار با احتمال وقوع تجمعی حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. شکل ۸ که تنها برای ارتفاع ۱۰ متری زمین رسم شده است، نشان می‌دهد که در سرعت‌های بالاتر از ۱۰ متر بر ثانیه توزیع رایلی با فراوانی تجمعی باد تطابق کامل دارد و فراوانی تجمعی وقوع سرعت‌های مختلف باد حدود ۱۰٪ است. در مقابل در سرعت‌های کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه توزیع ویبل با فراوانی‌های تجمعی سرعت‌های باد بیشترین تطابق را دارد.

برخوردار نیست. همچنین با دقت در جدول در می‌یابیم که برای سرعت‌های تقریبی ۱۴-۷ متر بر ثانیه میزان چگالی توان و متعاقباً چگالی انرژی باد به بیشترین مقدار خود می‌رسد، در حالی که در سرعت‌های ۰ و ۲۵ متر بر ثانیه هر دو پارامتر به صفر کاهش می‌یابد.

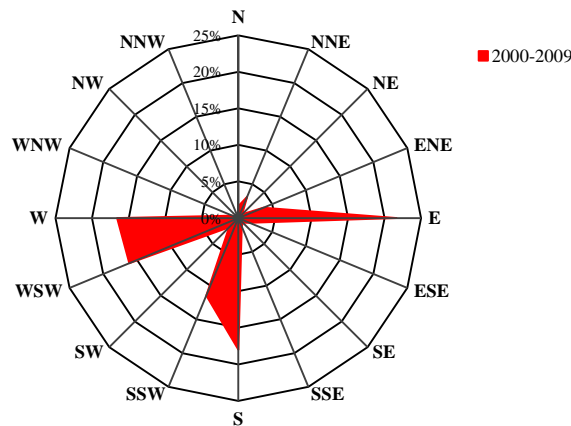
موجود در ارتفاع ۱۰ متری زمین، مکان‌ها با توان بادی معادل ۲۰۰ تا ۲۵۰ وات بر مترمربع برای نصب نیروگاه‌های بادی مناسب ذکر شده است (Jamil, 2001). بنابراین با توجه به چگالی مناسب‌تر توان باد در ارتفاع ۴۰ متری به بالا و همچنین سایر مؤلفه‌های محاسبه شده، برای ایستگاه اقلید فارس، این ایستگاه از پتانسیل نسبتاً خوبی در جهت استفاده از انرژی باد

جدول ۳. چگالی توان و انرژی باد در منطقه اقلید

چگالی انرژی باد ($\text{kWh m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)			چگالی توان باد ($\text{W m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)			سرعت باد (m/s)
۴۰ (m)	۳۰ (m)	۱۰ (m)	۴۰ (m)	۳۰ (m)	۱۰ (m)	
۰/۲۶۴۹	۰/۳۳۳۸	۰/۴۱۱۶	۰/۰۹۵۵	۰/۱۱۰۶	۰/۱۲۵۹	۱
۳/۹۴۴۸	۳/۴۱۱۷	۴/۵۱۰۷	۰/۸۶۹۲	۰/۷۵۰۹	۰/۸۸۹۱	۲
۹/۵۳۳۸	۱۰/۶۹۲۸	۱۱/۴۲۶۰	۱/۷۱۲۲	۱/۸۸۳۹	۱/۸۴۷۴	۳
۱۹/۷۲۰۹	۲۰/۱۹۳۳	۱۸/۱۵۸۷	۳/۱۰۳۱	۳/۱۲۲۰	۲/۶۴۸۳	۴
۲۹/۰۷۹۶	۲۹/۵۵۴۹	۲۹/۲۸۲۴	۴/۲۱۳۰	۴/۲۱۳۰	۳/۹۷۱۷	۵
۴۱/۱۶۲۹	۴۱/۵۴۵۹	۴۵/۶۳۴۴	۵/۶۱۹۷	۵/۵۸۷۷	۵/۸۴۱۶	۶
۵۹/۶۷۱۸	۵۸/۸۷۳۲	۴۵/۴۵۳۵	۷/۷۵۷۶	۷/۵۵۴۸	۵/۶۲۶۶	۷
۶۳/۷۵۱۵	۵۶/۴۲۲۸	۴۶/۲۲۷۱	۸/۰۲۲۷	۷/۰۳۸۸	۵/۵۹۹۲	۸
۷۴/۶۵۶۸	۶۳/۵۳۶۷	۵۵/۲۱۸۷	۹/۱۵۹۹	۷/۷۵۹۰	۶/۵۷۱۸	۹
۶۴/۸۵۲۲	۸۰/۱۸۱۴	۵۴/۰۵۰۴	۷/۸۳۴۷	۹/۶۰۸۵	۶/۳۵۴۷	۱۰
۸۵/۹۶۶۴	۷۳/۱۵۶۴	۵۷/۴۲۹۳	۱۰/۲۳۱۲	۸/۶۵۷۱	۶/۶۸۷۸	۱۱
۷۳/۶۸۳۰	۷۶/۳۰۰۸	۵۵/۲۰۵۸	۸/۶۸۴۹	۸/۹۴۰۴	۶/۳۸۴۲	۱۲
۱۰۰/۲۰۲۳	۶۴/۱۶۱۶	۵۰/۷۸۸۷	۱۱/۶۹۱۷	۷/۴۶۹۷	۵/۸۴۴۲	۱۳
۶۲/۸۹۰۶	۸۰/۶۵۱۲	۲۴/۷۱۶۴	۷/۳۰۱۳	۹/۳۲۹۴	۲/۸۳۸۶	۱۴
۷۷/۷۴۰۶	۶۹/۳۱۳۵	۵۲/۲۸۶۹	۸/۹۸۰۳	۷/۹۸۲۵	۵/۹۸۵۲	۱۵
۷۸/۹۵۰۸	۲۶/۳۲۴۱	۲۱/۱۷۵۵	۹/۰۸۲۳	۳/۰۲۷۴	۲/۴۲۱۳	۱۶
۳۱/۶۰۹۶	۶۳/۳۲۳۹	۳۱/۷۹۲۷	۳/۶۳۱۳	۷/۲۶۲۶	۳/۶۳۰۳	۱۷
۶۷/۷۰۷۹	۷۵/۳۷۵۸	۱۵/۱۰۴۱	۷/۷۵۹۰	۸/۶۲۱۱	۱/۷۲۳۷	۱۸
۶۲/۰۵۴۵	۱۷/۷۳۹۶	۸/۸۸۴۴	۷/۰۹۷۵	۲/۰۲۷۸	۱/۰۱۳۶	۱۹
۳۱/۰۴۴۴	۴۱/۴۲۶۶	۰	۳/۵۴۷۸	۴/۷۳۰۴	۰	۲۰
۳۵/۹۶۷۳	۲۳/۹۹۱۴	۱۱/۹۹۹۰	۴/۱۰۷۰	۲/۷۳۸۰	۱/۳۶۶۸	۲۱
۲۷/۵۸۴۵	۱۳/۷۹۶۰	۰	۳/۱۴۸۱	۱/۵۷۴۰	۰	۲۲
۱۵/۷۶۴۱	۰	۰	۱/۷۹۸۶	۰	۰	۲۳
۰	۱۷/۹۱۵۹	۱۷/۹۱۵۹	۰	۲/۰۴۳۵	۲/۰۴۳۰	۲۴
۲۰/۲۵۰۰	۰	۰	۲/۳۰۹۷	۰	۰	۲۵
۱۳۸/۰۵۵۰	۱۰۰۸/۲۳۳۲	۶۵۷/۶۷۲۳	۱۳۸	۱۲۲	۷۹	مجموع سال‌ها

جدول ۴. طبقه‌بندی توان باد براساس PNL (Saeidi et al., 2011)

سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متر (m s^{-1})	توان بادی در ارتفاع ۵۰ متر (W m^{-2})	سرعت باد در ارتفاع ۳۰ متر (m s^{-1})	توان بادی در ارتفاع ۳۰ متر (W m^{-2})	سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر (m s^{-1})	توان بادی در ارتفاع ۱۰ متر (W m^{-2})	شماره دسته‌بندی
$5/6 \geq$	$200 \geq$	$5/1 \geq$	$160 \geq$	$4/4 \geq$	$100 \geq$	۱
$6/4 \geq$	$330 \geq$	$6/0 \geq$	$240 \geq$	$1/5 \geq$	$150 \geq$	۲
$7/0 \geq$	$400 \geq$	$6/5 \geq$	$320 \geq$	$5/6 \geq$	$200 \geq$	۳
$7/5 \geq$	$500 \geq$	$7 \geq$	$400 \geq$	$6/0 \geq$	$250 \geq$	۴
$8/0 \geq$	$600 \geq$	$7/5 \geq$	$480 \geq$	$6/4 \geq$	$300 \geq$	۵
$8/8 \geq$	$800 \geq$	$8/2 \geq$	$640 \geq$	$7/0 \geq$	$400 \geq$	۶
$11/9 \geq$	$2000 \geq$	$11/0 \geq$	$1600 \geq$	$9/4 \geq$	$1000 \geq$	۷



شکل ۱. گلباد و جهت باد در سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۰۰ در ایستگاه اقلید

در این مطالعه، بکارگیری توربین‌های بادی با ظرفیت کمتر در ابعاد کوچک‌تر و برای روستاها و جوامع کوچک توصیه می‌شود. مقایسه توربین‌های با ابعاد کوچک در مدل‌های مختلف و موجود در بازار از جنبه توان تولیدی و عملکرد اقتصادی در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد.

گلباد انرژی باد

آخرین مورد این تحقیق، رسم گلبادهای ۱۶ جهته در ماه‌های مختلف در طول ده سال است که در آن درصد مربوط به باد غالب و جهت آن مشخص شده است (شکل ۹). براساس این نمودار ۲۲٪، ۱۸٪ و ۱۷٪ از بادهای منطقه دارای بیشترین فراوانی به ترتیب در جهات شرق، جنوب و غرب می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مطالعه پتانسیل انرژی باد قابل استحصال در منطقه در طول سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۰۰ میلادی مورد تحلیل قرار گرفت. برای این منظور از تابع توزیع ویبیل و رایلی برای برآورد سرعت-های باد به کمک داده‌های اخذ شده از ایستگاه هواشناسی استفاده شد. همچنین صحت انجام این کار با روش‌های نکویی برازش سنجیده شد و نتایج برازش منحنی نشان داد که داده‌های سرعت باد با توزیع ویبیل همخوانی دارند. نتایج تحلیل سرعت باد نشان داد در طول دوره مورد بررسی سرعت باد در بازه ۰/۶ تا ۷ متر بر ثانیه متغیر است. مقدار متوسط سرعت باد در طول دوره آماری نیز حدود ۲/۹۶ متر بر ثانیه گزارش شد. همچنین کمترین سرعت‌های وزش باد در ماه‌های گرم سال مشاهده شد. آنالیز ماهانه و سالانه انحراف معیار نشان داد سرعت باد در ماه آگوست کمترین مقدار را داراست که بیانگر همگنی داده‌های سرعت باد و نبود سرعت‌های ناگهانی و شدید در این ماه است. بررسی سرعت باد در طول ساعات شبانه روز نشان داد در فاصله ساعات ۰۰ تا ۰۶ کمترین سطح وزش باد و

به نتایج گفته شده، پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

با توجه به روش تحلیل داده‌ها در این تحقیق، استفاده از سایر توزیع‌های احتمالی همچون توزیع‌های لوگ لجستیک، بتا، بر، پارتو، چوله نرمال و ... برای تعیین دقیق توزیع آماری مناسب به منظور توصیف وضعیت باد در مناطق مختلف توصیه می‌گردد.

بکارگیری روش‌های مختلف نکویی برازش در جهت تعیین بهترین مدل آماری فراوانی سرعت باد مؤثر است که امروزه برنامه‌های نرم‌افزاری متنوعی با دقت‌های متفاوت این آزمون‌ها را اجرا می‌کنند.

به دلیل وسعت زیاد منطقه توصیه می‌گردد پیش‌بینی سرعت باد در سایر ایستگاه‌های همجوار نیز صورت گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه شود.

پیش‌بینی سرعت باد برای دوره‌های آتی پس از احداث سایت انرژی بادی به کمک روش‌های مدلسازی نیز پیشنهاد می‌گردد.

جهت تکمیل مطالعات آینده و افزایش صحت تصمیمات، ترسیم و تحلیل منحنی‌های قدرت-تداوم، سرعت-تناوب لازم و ضروری است. همچنین چنانچه داده‌های با دقت بیشتر و فواصل زمانی کمتر (بر حسب دقیقه) استفاده شود، نتایج مطالعه بسیار دقیق‌تر خواهد بود. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود که دولت با اختصاص اعتباراتی امکان ثبت اینگونه اطلاعات در جهت استفاده بهینه از این منبع تجدیدپذیر انرژی را فراهم آورد.

مطالعه بر روی توجیه اقتصادی طرح احداث سایت توربین بادی برای استحصال انرژی با توجه به هدف بهره‌برداری از انرژی بادی در هر یک از مصارف صنعتی، کشاورزی، مسکونی و غیره در ادامه اینگونه این تحقیقات توصیه می‌شود. در نظر داشتن توان عملی توربین‌های بادی با احتساب بازده آن‌ها در انتخاب توربین‌های بادی می‌بایست در نظر گرفته شود.

REFERENCES

- Abbaspour, M. (1996). An examination, economical comparison and feasibility study on wind powerhouses in Iran. In: *Proceedings of Congress on Development of Renewable energy utilization*, Tehran, Abij Pub. (In Farsi)
- Ahmed Shata, A. S. & Hanitsch, R. (2006) Evaluation of Wind Energy Potential and Electricity Generation on the Coast of Mediterranean Sea in Egypt. *Journal of Renewable Energy*, 31, 1183–1202.
- Alimi, S. E., Maatallah, T., Dahmouni, A. W. & Nasrallah, S. B. (2012) Modeling and investigation of the wind resource in the gulf of Tunis, Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (8), 5466–5478.
- Alizadeh, A. (2006). *Weather and continent* (9th Ed.) Mashhad: Ferdousi Mashhad Universty Pub.
- Al-Mohamad, A. & Karmeh, H. (2003) Wind energy potential in Syria. *Renewable Energy*, 28(7), 1039-1046.
- Anonymous, (1993) *A survey and research on wind power houses*. Power Research Center, report one, part one, Tehran, November 1993. ((In Farsi)
- Anonymous, (2005) *IEA Energy Statistics manual (OECD/IEA)*, International Energy Agency, Power Ministry of Islamic Republic of Iran, pp. 129, from: www.iea.org/.../statistics_manual_farsi.pdf. (in Farsi)
- Anonymous, (2012) *Statistical Center of Iran*, from: http://www.amar.org.ir/Portals/2/pdf/jamiat_shah_restan_keshvar.pdf. (In Farsi)
- Anonymous, (2013) *Statistics Toolbox, User's Guide R2013b*, from: <http://www.mathworks.com>.
- Anonymous, (2013). *U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy*, from: <http://energy.gov/eere/renewables/wind>.
- Arsalan, O. (2010). Technoeconomic analysis of electricity generation from wind energy in Kutahya, Turkey. *Energy*, 35 (1), 120–131.
- Barber, D. A, Court, A. & Hewson, E. W. (1977) *Wind characteristics. Wind Energy over the United States*. Final Report. Wind Energy Mission Analysis, ERDA Contract AT (04-3)1075, Lockheed-California Company, chapter 3.
- Biglari, M., Assareh, E.A., Nedaei, M. & Poltangari, I. (2014) Feasibility study and economic evaluation of wind energy in north of Khuzestan province: case study of shush-tar, *Iranian Journal of Energy*, 17(1), 91-110.
- Boudia, S. M., Benmansour, A., Ghellai, N., Benmedjahed, M. & Hellal M. A. T. (2013) Temporal assessment of wind energy resource at four locations in Algerian Sahara. *Energy Conversion and Management*, 76, 654–664.
- Chang, T. J., Wua, Y. T., Hsua H. Y., Chub, C. R. & Liaoa, C. M. (2003). Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. *Renewable Energy*, 28 (6), 851-871.
- Dahmouni, A.W., BenSalah, M., Askri, F., Kerkeni, C. & Ben Nasrallah, S. (2011) Assessment of wind energy potential and optimal electricity generation in Borj-Cedria, Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (1), 815-820.
- Diap, S., Notton, G. & Diap, D. (2013) Technical and economic assessment of wind farm power generation at Adrar in Southern Algeria. *Energy Procedia*, 42, 53-62.
- Dundar, C. & Inan, D. (2001) Wind energy potential of Cesme, Turkey. *Solar world congress*, August, Taejon, Korea.
- Edgar, G. P. & Obrien, J. J. (1986) Weibull statistics of wind speed over the ocean. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 25, 324-332.
- Elamouri, M. & Ben Amar, F. (2008) Wind energy potential in Tunisia, *Renewable Energy*, 33 (4), 758-768.
- Fagbenle, R. O., Katende, J., Ajayi, O. O. & Okeniyi, J. O. (2011) Assessment of wind energy potential of two sites in North-East, Nigeria. *Renewable Energy*, 36 (4), 1277-1283.
- Fatehi Peykani, H. (2009) An statistical study for wind distribution fitting. In: *Proceedings of 7th National Energy Congress*, 22-23 Dec., Tehran, Iran.
- Gupta B. K. (1986) Weibull parameters for Annual and Monthly Wind Speed Distributions for 5 locations in India. *Journal of Solar Energy*, 37 (6), 469–471.
- Hennessey, J. P. (1977) Some Aspects of Wind Power Statistics. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 16, 119–128.

- Ilinca, A., McCarthy, E., Chaumel, J.L. & Rétiveau, J.L. (2003) Wind potential assessment of Quebec Province. *Renewable Energy*, 28, 1881-97.
- Jamil, M. (2001). *Wind Energy density*. Nivar Journal, No. 42 and 43. (In Farsi)
- Justus, C. G., Hargraves, W. R. & Raclin A. (1976) Nationwide assessment of potential output from wind powered generators. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 15, 673-678.
- Kamau, J. N., Kinyua, R. & Gathua, J. K. (2010) 6 years of wind data for Marsabit, Kenya average over 14 m/s at 100 m hub height; An analysis of the wind energy potential. *Renewable Energy*, 35, 1298-1302.
- Karsli, V. M. & Gecit, C. (2003) An investigation on wind power potential of Nurdag-Gaziantep, Turkey. *Renewable Energy*, 28, 823-830.
- Kaviani, M., Alijani, B. (1995). *Principles of water and meteorology*. Tehran: SAMT. (In Farsi)
- Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M. & Abbaszadeh, R. (2010) An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy*, 35 (1), 188-201.
- Kwon, S.D. (2010) Uncertainty analysis of wind energy potential assessment. *Applied Energy*, 87(3), 856-865.
- 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.
- Omidvar, K. & Dehqan Tazarjani, M. (2012) A potential survey and evaluating wind power characteristics at isometropia stations of Yazd province. *Geographical Research Journal*, 27(2), 149-168. (In Farsi)
- Patel, M. R. (1999) *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press LLC. 68-70.
- Pishgar Komleh, S.H., Keyhani A. & Sefeedpari, P. 2015. Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkoo county of Iran). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 313-322.
- Ramachandra, T. V., Rajeev, K. J., Krishna, S. V. & Shruthi, B. V. (2005) Wind energy potential assessment spatial decision support system. *Energy Education Science and Technology*, 14(2), 61-80.
- Rehman S., Halvani, T. & Husain. T. (1994) Weibull parameters for wind speed distribution in Saudi Arabia. *Solar Energy*, 53(6), 473-479.
- Rezaei, A. & Mirmohammadi Meiboudi, A. M. (2005) *Statistics and Probability (Application in Agriculture)* (first ed.). Isfahan: Jihad-e-Daneshgahi of Isfahan University of Technology. (In Farsi)
- Saeidi, D., Mirhosseini, M., Sedaghat, A. & Mostafaeipour, A. (2011) Feasibility study of wind energy potential in two provinces of Iran: North and South Khorasan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3558-69.
- Salahi, B. (2004) A potential survey on wind energy and real probability fitting of wind incidence using Weibull distribution function in isometropia stations of Ardabil province. *Geographical Researches*, 72. (In Farsi)
- Sherbafian, N., 2008. Evaluating wind power potential and its effect on economy. *Quarterly Energy Economics Review*, 5 (17), 113-140. (In Farsi)
- Skidmore, E. L. & Tatarko, J., (1991) *Wind in the Great Plains: Speed and direction distributions by month*. p. 245-263. In: J.D. Hanson, M.J. Shaffer, D.A. Ball, and C.V. Cole (eds). *Sustainable Agriculture for the Great Plains*, Symposium Proceedings, USDA, ARS, ARS-89, 255 p.
- Skidmore, E.L & Tatarko, J. (1990) *Stochastic wind simulation for wind erosion modeling*. Trans. ASAE. 33, 1893.
- Soltani, S., Gholamian, S. & Farahani, K. (2010) Surveying of Wind Potential at Amir Abad Port with the Aim of Construction of a Wind Power Plant (Farm), *Iranian Journal of Energy*, 13(3), 100-116.
- Toure, S. (2005) Investigations on the eigen-coordinates method for the 2-parameter Weibull distribution of wind speed. *Renewable Energy*, 30 (4), 511-521.
- Weisser, D. (2003) A wind energy analysis of Granada: an estimation using the Weibull density function, *Renewable Energy*, 28 (11), 1803-1812.
- Zahedi, M., Salahi, B., Jamil, M. (2005). Estimating wind density and power for utilizing its generated energy in Ardabil province. *Geographical researches*, 35, 41-55. (In Farsi)
- Zakeri Fard, R., Abdi, H. & Khonakdari, T. (2011) Feasibility Study of Construction of a 10 MW Wind Power Plant in Moraveh Tappeh, *Iranian Journal of Energy*, 14(1), 55-77.