

# پتانسیل سنجی انرژی باد برای نصب توربین بادی در استان سیستان و بلوچستان

سید امین رضویه<sup>۱</sup>، احمد صداقت<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان (نویسنده مسئول)

[sa.razavieh@me.iut.ac.ir](mailto:sa.razavieh@me.iut.ac.ir)

[sedaghat@cc.iut.ac.ir](mailto:sedaghat@cc.iut.ac.ir)

## چکیده

در تحقیق حاضر، پتانسیل نصب توربین باد در سه ایستگاه خاش، لوتک و نصرت آباد در استان سیستان و بلوچستان بررسی شده است. این مطالعه با استفاده از داده‌های بادی شامل سرعت و جهت باد در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه در طول سال انجام گرفته است. دانستن توزیع فراوانی سرعت باد یک عامل بسیار مهم برای ارزیابی بادخیزی یک منطقه است که در این تحقیق از تابع توزیع ویبول که در مطالعات بادی پرکاربرد است استفاده شده است. میانگین سرعت باد و چگالی توان متوسط ماهیانه در سه ایستگاه و ارتفاع‌های مختلف بررسی شده و نشان می‌دهند ایستگاه خاش و نصرت آباد برای نصب گسترده توربین بادی مناسب نیستند اما برای استفاده محلی از انرژی باد برای به کارگیری سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی بسیار مناسبند اما ایستگاه لوتک دارای پتانسیل بسیار بالایی برای نصب مزرعه بادی است.

کلمات کلیدی: انرژی باد، توزیع ویبول، سیستان و بلوچستان، گلباد، توربین باد

# Wind potential assessment for installing wind turbine in the province of Sistan and Baluchestan

A.Razavieh<sup>1</sup>, A.Sedaghat<sup>2</sup>

1 – M.Sc. graduate, Department of mechanical engineering, Isfahan University of Technology (IUT) 84156-83111, Isfahan, Iran

2- Assistant professor, Department of mechanical engineering, Isfahan University of Technology (IUT) 84156-83111, Isfahan, Iran

(Corresponding author)

sa.razavieh@me.iut.ac.ir

sedaghat@cc.iut.ac.ir

## Abstract

In the present study, wind potentials in three regions, Khash, Lootak, and Nosratabad are investigated in the province of Sistan and Baluchestan. Annual wind measurements including wind speed and wind directions were made in the three heights of 10, 30, and 40 meters for 10 minutely intervals by meteorological organization of Iran. Wind speed distributions are important for evaluating wind potentials in certain geological regions; therefore, the widely accepted Weibull distribution function is adopted here to model the wind measurement data. Weibull parameters include shape factor,  $k$ , and scale factor,  $c$ , which are calculated together with standard deviation for each three regions at different heights. Higher values of the shape factor,  $k$ , leads to sharper peaks which show less variation in wind speed. The scale factor,  $c$ , is a measure for windy regions. Root mean square (RMSE) is used to assess quality of the fitting Weibull function into the wind measurement data. The average wind speeds are calculated during months of the years 2008 to 2010. It is observed that, the average annual wind speed in Khash station are 3.8, 4.32, and 4.57 m/s for the heights of 10, 30, and 40 meters; respectively. In Lootak station, these values are 4.56, 6.28, and 6.54 m/s, respectively. Nosratabad station posses the annual average wind speed of 4.82 and 5 m/s for the heights of 30 and 40 meters, respectively. The average monthly wind power density is also evaluated for the three stations in different heights. In Khash station, this shows that the annual averaged wind power density of 86 W/m<sup>2</sup> for the height of 10 meters, 114 W/m<sup>2</sup> for the height of 30 meters, and 132 W/m<sup>2</sup> for the height of 40 meters. Similarly, it is observed for Nosratabad that the annual averaged wind power density of 125 W/m<sup>2</sup> in 30 meters height, 144 W/m<sup>2</sup> in 40 meters height can be achieved. Therefore, these stations are categorized as the weak sites for in-grid wind power generation and are recommended for off-grid local use for electricity or mechanical power generation. Further study reveals that Lootak station with the annual averaged wind power density of 157 W/m<sup>2</sup> in 10 meters height, 344 W/m<sup>2</sup> in 30 meters height, and 388 W/m<sup>2</sup> in 40 meters height has possess a good potential for in-grid electrical power generation. Finally, wind rose diagram which indicates wind direction distribution is plotted for the three stations to prevail the dominant wind direction for installing wind turbines.

**Keywords:** Wind energy, Wiebull distribution, Sistan and baluchestan, Wind rose, Wind turbine

## ۱. مقدمه

### ۱.۱. تاریخچه استفاده از انرژی باد

بشر از زمانهای بسیار دور انرژی باد را به شیوه‌های مختلف بکار گرفته است. ایرانیان اولین کسانی بودند که در حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد مسیح برای آرد کردن غلات از آسیاب‌های بادی استفاده کرده‌اند که امروزه آثار آن در نواحی خواف و تایباد در شرق کشور به چشم می‌خورد. همچنین مصریان باستان از نیروی باد برای راندن کشتی‌های خود روی رودخانه نیل استفاده کردند. نصب بادبان به یک محور مرکزی که با استفاده از نیروی باد تولید نیروی چرخشی می‌کرد بعداً انجام گرفت و بشر به وسیله آن توانست نیروی لازم را برای آبکشی به منظور آبیاری، آرد کردن غلات و سرانجام اره کردن چوب بدست آورد. در قرن هفدهم میلادی، مردم هلند طرح پایه آسیابهای بادی را بهبود دادند. همین امر باعث شد تا این کشور در زمره غنی‌ترین و صنعتی‌ترین کشورهای اروپا قرار گیرد. برخی از کشورها آسیاب‌های بادی را برای آسیاب گندم و ذرت، پمپ کردن آب و قطع درختان استفاده کرده‌اند.<sup>[۱]</sup>

### ۲.۱. پتانسیل کشورهای مختلف در مورد انرژی بادی

تولید انرژی باد به طوری که بتوان آن را به عنوان پتانسیل نهایی تعریف کرد، مورد مطالعه قرار گرفته است. در سال ۱۹۸۱ میلادی «انستیتو بین المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی» تخمین زد که امکان بالقوه فنی نهایی باد در جهان برابر ۲۶۰۰۰ TWh در سال است. با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی می‌توان قبول کرد که ۳۳ درصد این مقدار انرژی یعنی ۹۰۰۰ TWh قابل وصول می‌باشد (معادل نیروگاهی به قدرت ۱ TW که ۲۴ × ۳۶۵ ساعت در سال کار کند). از نقشه جهانی باد تخمین زده می‌شود که ۲۷ درصد مساحت خشکی - های کره زمین (تقریباً  $107 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) در معرض وزش باد با سرعت متوسط سالانه بیش از ۵/۱ متر بر ثانیه یا ۱۸/۳ کیلومتر بر ساعت در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین قرار دارد.<sup>[۲]</sup>

جدول ۱ مساحت خشکی‌های زمین را که در معرض وزش باد با سرعت‌های مختلف بیش از ۵/۱ متر بر ثانیه قرار دارند نشان می‌دهد.

جدول ۱: مساحت خشکی‌های زمین در معرض وزش باد با سرعت‌های بیش از ۵/۱ متر بر ثانیه<sup>[۱]</sup>

منطقه	کل سطح خشکی $10^3 (\text{km}^2)$	مساحت مطلوب جهت نصب توربین بادی $10^3 (\text{km}^2)$
آمریکای شمالی	۱۹۳۳۹	۷۸۷۶
آمریکای لاتین	۱۸۴۸۲	۳۳۱۰
اروپای غربی	۴۷۴۲	۱۹۶۸
اروپای شرقی	۲۳۰۴۷	۶۷۸۳
خاورمیانه و شمال آفریقا	۸۱۴۲	۲۵۶۶
آفریقای زیر صحرا	۷۲۵۵	۲۲۰۹
اقیانوس آرام	۲۱۳۵۴	۴۱۸۸
چین	۹۵۹۷	۱۰۵۶
آسیای مرکزی و جنوبی	۴۲۹۹	۲۴۳
جمع	۱۰۶۶۶۰	۲۹۱۴۳

### ۳.۱. مزایای استفاده از باد

می‌توان مزایای زیر را در بهره‌برداری از انرژی باد، نام برد:

۱. عدم نیاز توربینهای بادی به سوخت که در نتیجه از میزان مصرف سوخت‌های فسیلی می‌کاهد.
۲. رایگان بودن انرژی باد
۳. توانایی تأمین بخشی از تقاضای انرژی برق
۴. کمتر بودن نسبی قیمت انرژی حاصل از باد در بلند مدت
۵. تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار انرژی
۶. قدرت مانور زیاد جهت بهره‌برداری در هر ظرفیت و اندازه (از چندوات تا چندین مگاوات)
۷. عدم نیاز به آب
۸. عدم نیاز به زمین زیاد برای نصب
۹. ایجاد اشتغال
۱۰. نداشتن آلودگی زیست محیطی<sup>[۳]</sup>

### ۴.۱. آینده انرژی باد در ایران

بازار تأمین انرژی یک بازار رقابتی است که در آن تولید برق در نیروگاههای بادی در مقایسه با نیروگاههای سوخت‌های فسیلی

مختلف در معرض بادهای موسمی و فصلی است که اهم این جریانات بادی عبارتند از: باد ۱۲۰ روزه سیستان (لور)، باد قوس، باد هفتم (گاوکش)، باد نم بی یا باد جنوب، باد هوشاک، بادهای مرطوب و موسمی اقیانوس هند، باد شمال یا گوریچ و باد غربی یا گرد<sup>[۴]</sup>. در شکل‌های ۱ و ۲ محل جغرافیایی استان سیستان و بلوچستان و شهرهای آن نشان داده شده است.



شکل ۱: محل استان سیستان و بلوچستان در ایران



شکل ۲: محل جغرافیایی شهرهای استان سیستان و بلوچستان در ایران

## ۲. روش‌های تحلیل داده‌های بادی منطقه

### ۱.۲. تابع توزیع سرعت باد<sup>۱</sup>

دانستن توزیع فراوانی سرعت باد یک فاکتور بسیار مهم برای ارزیابی پتانسیل انرژی باد برای مناطق بادخیز است. اگر توزیع سرعت باد در هر منطقه بادی مشخص باشد، توان باد و امکان-

برتری‌های نوینی را پیش‌روی کاربران قرار داده است. از برتریهای نیروگاههای بادی این است که در طول مدت زمان عمر خود، سالهای زیادی انرژی را بدون نیاز به هزینه سوخت تولید خواهد کرد، در حالی که هزینه دیگر منابع تولید انرژی در طول این سالها افزایش خواهد یافت.

فعالیت گسترده بسیاری از کشورهای جهان برای تولید الکتریسیته از انرژی باد، سرمشقی برای دیگر کشورهایی است که در این زمینه راه درازی در پیش دارند. بسیاری از منابع اقتصادی در حال رشد، در منطقه آسیا واقع شده‌اند و اقتصاد رو به رشد کشورهای آسیایی از جمله ایران، باعث شده تا این کشورها بیش از پیش به تولید الکتریسیته احساس نیاز کرده و اقدام به تولید الکتریسیته از منابع غیرفسیلی کنند. افزون بر این موارد، نبود شبکه برق سراسری در بسیاری از بخشهای روستایی در کشورهای آسیایی نیز مهر تأییدی بر سیستم‌های تولید الکتریسیته از انرژی باد زده است.

پس در خصوص دورنمای آینده اقتصادی استفاده از انرژی باد در ایران می‌بایست گفت استفاده از این انرژی موجب صرفه جویی فرآورده‌های نفتی بعنوان سوخت می‌شود. صرفه جویی حاصله در درجه اول موجب حفظ فرآورده‌های نفتی گشته که امکان صادرات و مهم‌تر اینکه تبدیل آنرا به مشقات بسیار زیاد پتروشیمی با ارزش افزوده بالا فراهم می‌سازد.

در درجه دوم تولید الکتریسیته از این انرژی، فاقد هرگونه آلودگی زیست محیطی بوده که همین عامل کمک شایانی به حفظ طبیعت سالم محیط زیست بشر نموده و در نتیجه مسیر برای نیل به توسعه پایدار اقتصادی، اجتماعی فراهم می‌گردد. استفاده از انرژی باد در ایران علاوه بر عمران و آبادانی موجبات ایجاد مشاغل جدید شده و بالاخره با بومی‌سازی فن‌آوری انرژی باد اقتصاد کشور رشد بیشتری می‌یابد.

در پروژه تعیین پتانسیل باد ایران، ۲۶ منطقه کشور شامل ۴۵ سایت مورد مطالعه قرار گرفت که بر اساس نتایج این پروژه، ایران کشوری با باد متوسط است ولی برخی از مناطق آن دارای باد مناسب و مداومی برای تولید برق می‌باشد. توان بالقوه انرژی باد در سایت‌های مطالعه شده حدود ۶۵۰۰ مگا وات بوده و اکثر نقاط دارای پتانسیل در مناطق شرق کشور واقع شده-<sup>[۳]</sup> اند.

استان سیستان و بلوچستان امروزه به عنوان یکی از خشک‌ترین مناطق ایران به شمار می‌رود. میزان بارندگی از شرق به غرب استان افزایش می‌یابد و در نواحی ساحلی استان میزان رطوبت نسبی بسیار بالاست. استان سیستان و بلوچستان از جهات

<sup>1</sup> Wind speed distribution function

کارهای انجام شده نشان می‌دهد که ضریب شکل در توزیع ویبول در بیشتر مناطق بادخیز دنیا بین ۱/۲ تا ۲/۷۵ می‌باشد.<sup>[۱۶-۶]</sup>

برای محاسبه مقادیر  $k$  و  $c$  یک راه‌حل ثابت وجود ندارد و متدهای مختلفی برای محاسبه این ضرایب با استفاده از  $\bar{U}$ ،  $\sigma_U$  و  $\Gamma(x)$  وجود دارد.

(۱) روش نیمه تجربی جستوس<sup>۷</sup>

$$k = \left( \frac{\sigma_U}{\bar{U}} \right)^{-1.086} \quad (۵)$$

$$c = \left( \frac{\bar{U}}{\Gamma(1 + 1/k)} \right) \quad (۶)$$

(۲) روش گرافیکی<sup>۸</sup>

مقادیر ضریب شکل  $k$  و ضریب مقیاس  $c$  توسط برازش منحنی بین داده‌های بادی قابل محاسبه است. در تحقیق حاضر این کار توسط نرم‌افزار متلب<sup>۹</sup> انجام شده است. تابع ویبول با دو متغیر ضریب شکل و ضریب مقیاس به نرم افزار داده شده و این دو متغیر به گونه‌ای تعیین می‌شوند که پارامتر RMSE (که در بخش ارزیابی توزیع ویبول توضیح داده می‌شود) بین تابع و مقادیر واقعی حداقل شود.

تابع توزیع ویبول نسبت به توابع توزیع دیگر دارای مزایایی می‌باشد. از میان این مزایا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) انعطاف پذیری (۲) وابستگی به تنها دو پارامتر (۳) سادگی محاسبه پارامترها (۴) هنگامی که پارامترها تخمین زده شدند تابع ویبول به خوبی میان داده‌ها برازش می‌شود.<sup>[۱۵]</sup>

اشکال اساسی تابع توزیع ویبول برای سرعت‌های صفر و یا خیلی کم این است که احتمال وزش باد با سرعت‌های مذکور را به دقت نشان نمی‌دهد. برای تعیین پتانسیل نصب توربین‌های تجاری، ارائه احتمال وزش باد در این سرعت‌ها غیر ضروری است زیرا این توربین‌ها در سرعت‌هایی خیلی بیشتر از سرعت‌های باد آرام شروع به کار می‌کنند و بنابراین اثرات احتمالات در سرعت‌های پایین قابل صرف‌نظر است (سرعت شروع عملکرد توربین‌های تجاری بین ۲/۵ تا ۳/۵ متر بر ثانیه است)<sup>[۹]</sup>. همچنین از آنجایی که انرژی باد با مکعب سرعت رابطه دارد در سرعت‌های باد نزدیک صفر، توان باد بسیار کم و قابل صرف‌نظر است.

سنجی اقتصادی سایت به راحتی قابل محاسبه است. اطلاعات بادی به دست آمده دارای دامنه گسترده‌ای است بنابراین در تحلیل انرژی باد، لازم است تا تنها چند پارامتر کلیدی برای توضیح دامنه وسیع داده‌های بادی داشته باشیم.<sup>[۵]</sup>

ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش برای روند اشاره شده استفاده از تابع توزیع است. توابع ریاضی زیادی وجود دارند که می‌توانند برای مدل کردن منحنی سرعت باد به کار روند. در مطالعات توان باد، معمولاً از توابع چگالی احتمال ویبول<sup>۲</sup> و رایلی<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. در این مطالعه تنها از تابع ویبول استفاده شده است زیرا رایلی تنها زیر مجموعه‌ای از آن است.

تعیین تابع چگالی احتمال ویبول احتیاج به محاسبه دو ضریب دارد: ضریب بدون بعد شکل<sup>۴</sup> و ضریب مقیاس<sup>۵</sup>. تمامی این ضرایب تابعی از  $\bar{U}$ ،  $\sigma_U$  و  $\Gamma(x)$  می‌باشند که  $\sigma_U$  انحراف معیار است و با توجه به رابطه زیر قابل محاسبه است که در آن  $N$  تعداد داده‌های ثبت شده می‌باشد.

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2} \quad (۱)$$

$\bar{U}$  متوسط سرعت باد است و توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N U_i \right] \quad (۲)$$

و  $\Gamma(x)$ ، تابع گام<sup>۶</sup> است که توسط انتگرال زیر تعریف می‌شود.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (۳)$$

در نهایت تابع چگالی احتمال ویبول توسط رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$P(U) = \left( \frac{k}{c} \right) \left( \frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{U}{c} \right)^k \right) \quad (۴)$$

به طور اساسی ضریب شکل  $c$  نشان می‌دهد که چه مقدار یک منطقه بادخیز است در حالیکه ضریب مقیاس  $k$  نشان می‌دهد که تابع توزیع سرعت باد تا چه اندازه به صورت قله‌ای می‌باشد، به این معنا که هر اندازه مقادیر سرعت باد به یک مقدار خاص نزدیک‌تر باشد مقدار  $k$  بزرگتر می‌شود. یک مطالعه روی

<sup>۲</sup> Weibull

<sup>۳</sup> Rayleigh

<sup>۴</sup> Shape factor

<sup>۵</sup> Scale factor

<sup>۶</sup> Gamma function

<sup>۷</sup> Justus

<sup>۸</sup> Graphical method

<sup>۹</sup> MATLAB

جدول ۲: مقایسه بین ضرایب ویبول محاسبه شده توسط روش گرافیکی و روش جستوس در سه ایستگاه استان سیستان و بلوچستان در ارتفاع‌های مختلف

ایستگاه	ارتفاع (m)	متوسط سالیانه سرعت باد (m/s)	انحراف معیار (m/s)	روش گرافیکی				روش نیمه تجربی جستوس			
				ضریب شکل	ضریب مقیاس	RMSE	R2	ضریب شکل	ضریب مقیاس	RMSE	R2
خاش	۱۰	۳/۸۰	۲/۹۲	۱/۳	۴/۴۲	۰/۱۳۳۶	۰/۹۳۱۴	۱/۳۳	۴/۱۳	۰/۱۳۷۷	۰/۹۳۱۵
	۳۰	۴/۳۲	۳/۱۶	۱/۳۲	۴/۹۶	۰/۱۰۴۹	۰/۹۴۸۸	۱/۴۰	۴/۷۴	۰/۱۱۴۲	۰/۹۴۸۸
	۴۰	۴/۵۷	۳/۳۱	۱/۳۵	۵/۲۳	۰/۱۰۹۴	۰/۹۴۵۴	۱/۴۲	۵/۰۲	۰/۱۱۵۳	۰/۹۴۵۵
لوتک	۱۰	۴/۵۶	۳/۳۸	۱/۴۰	۴/۹۲	۰/۲۱۵۴	۰/۸۲۷۷	۱/۳۸	۴/۹۹	۰/۲۱۴۸	۰/۸۲۷۶
	۳۰	۶/۲۸	۴/۲۰	۱/۵۷	۶/۵۴	۰/۱۵۹۳	۰/۸۷۱۲	۱/۵۵	۶/۹۸	۰/۱۶۳۱	۰/۸۷۱۰
	۴۰	۶/۵۴	۴/۳۷	۱/۶۰	۶/۶۷	۰/۱۱۸۱	۰/۹۱۴۹	۱/۵۵	۷/۲۷	۰/۱۲۷۶	۰/۹۱۴۷
نصرت آباد	۳۰	۴/۸۲	۲/۹۱	۱/۸۲	۵/۶۶	۰/۰۷۳۷	۰/۹۷۰۱	۱/۷۳	۵/۴۱	۰/۰۸۶۵	۰/۹۷۰۳
	۴۰	۵/۰۰	۳/۰۷	۱/۸۱	۵/۷۷	۰/۰۶۸۷	۰/۹۷۴۰	۱/۷۰	۵/۶۰	۰/۰۸۰۰	۰/۹۷۴۱

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{(y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

در این روابط، N تعداد کل نتایج مشاهداتی،  $y_i$  مقدار واقعی  $y$ ،  $x_i$  مقادیر محاسبه شده توسط رابطه ارایه شده برای همان مقدار  $y$  و  $\bar{y}$  مقدار متوسط مقادیر  $y_i$  است.

### ۳. نتایج

#### ۱.۳. نتایج توزیع ویبول

جدول ۲ ضرایب ویبول را برای ایستگاه‌های خاش، لوتک و نصرت‌آباد برای سه ارتفاع مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از این جدول پیداست متوسط سالیانه ضریب شکل k بین ۱/۳ و ۱/۸۲ و متوسط سالیانه ضریب مقیاس بین ۴/۴۲ و ۶/۶۷ می‌باشد. بالاترین سرعت باد در لوتک و ارتفاع ۴۰ متر و پایین‌ترین سرعت باد در خاش و ارتفاع ۱۰ متر وجود دارد. کمترین میزان انحراف معیار  $\sigma_U$  در تمامی ارتفاع‌ها در نصرت‌آباد رخ می‌دهد و این نشان می‌دهد سرعت‌های باد ثبت شده به میانگین سرعت باد در آن منطقه نزدیک است.

با توجه به معیارهای ارزیابی، روش گرافیکی نتایج بهتری را نسبت به روش جستوس ارایه می‌دهد. بیشترین میزان خطای RMSE در لوتک و ارتفاع ۱۰ متر با مقدار ۲/۱۵٪ رخ داده است.

شکل‌های ۳ تا ۵ چگالی توزیع واقعی سرعت باد و چگالی توزیع ویبول با استفاده از دو روش گرافیکی و جستوس را برای سه ایستگاه خاش، لوتک و نصرت‌آباد در ارتفاع ۴۰ متر نشان می‌دهد. لوتک دارای فراوانی بیشتری در سرعت‌های بالا است.

اطلاعات بادی استفاده شده در این تحقیق شامل مقادیر سرعت باد با فواصل زمانی ۱۰ دقیقه در سه ارتفاع ۱۰ متر، ۳۰ متر و ۴۰ متر بالای سطح زمین برای سه منطقه خاش، لوتک و نصرت‌آباد می‌باشد. اطلاعات یاد شده توسط سازمان انرژی‌های نو جمهوری اسلامی ایران<sup>[۱۷]</sup> برای فاصله زمانی دسامبر ۲۰۰۶ تا نوامبر ۲۰۰۷ در ایستگاه خاش و نصرت‌آباد و اکتبر ۲۰۰۸ تا سپتامبر ۲۰۰۹ در ایستگاه لوتک اندازه‌گیری شده است.

#### ۲.۲. ارزیابی توزیع ویبول

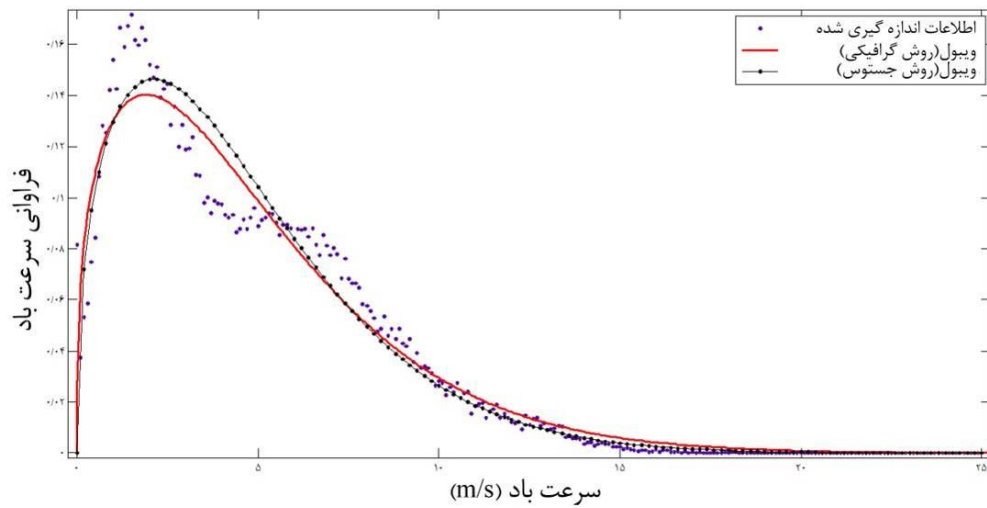
ارزیابی یک مدل آماری نشان می‌دهد تا چه اندازه تابع توانسته به داده‌های اندازه‌گیری شده برازش شود. متاسفانه روش‌های استاندارد خاصی برای ارزیابی برازش وجود ندارد در نتیجه روش‌های متفاوتی برای این کار به وجود آمده‌اند. در تحقیق حاضر از روش RMSE<sup>۱۰</sup> که یکی از روش‌های معروف است استفاده شده است.

پارامتر RMSE میزان انحراف بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. این پارامتر باید تا حد امکان نزدیک صفر باشد و به این صورت محاسبه می‌شود.

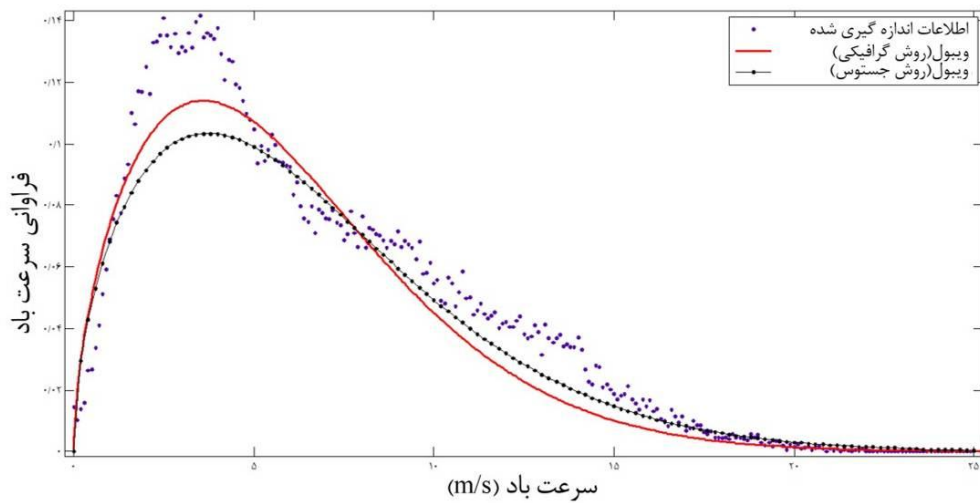
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (7)$$

روش دیگر برای ارزیابی تابع ویبول استفاده از پارامتر R2 می‌باشد. این پارامتر باید تا حد امکان نزدیک یک باشد و به این صورت محاسبه می‌شود.

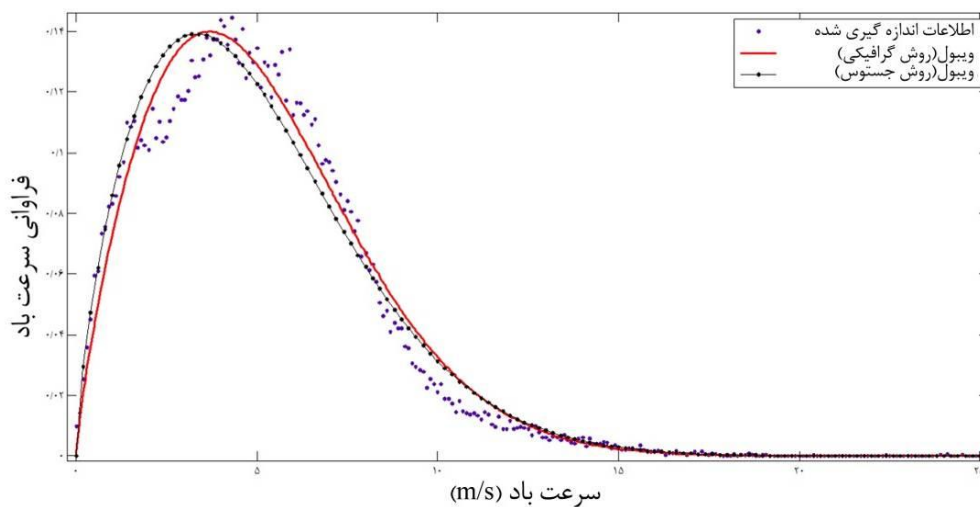
<sup>10</sup> Root mean square error



شکل ۳: مقایسه چگالی احتمال واقعی و چگالی احتمال توزیع ویبول برای ایستگاه خاش در دوره آماری - ارتفاع ۴۰ متر



شکل ۴: مقایسه چگالی احتمال واقعی و چگالی احتمال توزیع ویبول برای ایستگاه لوتک در دوره آماری - ارتفاع ۴۰ متر

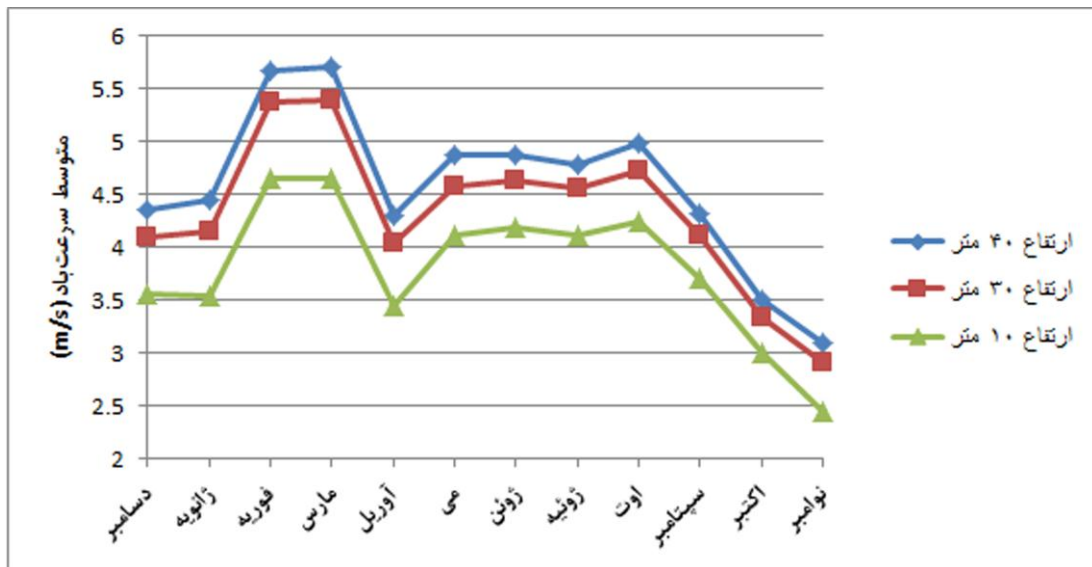


شکل ۵: مقایسه چگالی احتمال واقعی و چگالی احتمال توزیع ویبول برای ایستگاه نصرت آباد در دوره آماری - ارتفاع ۴۰ متر

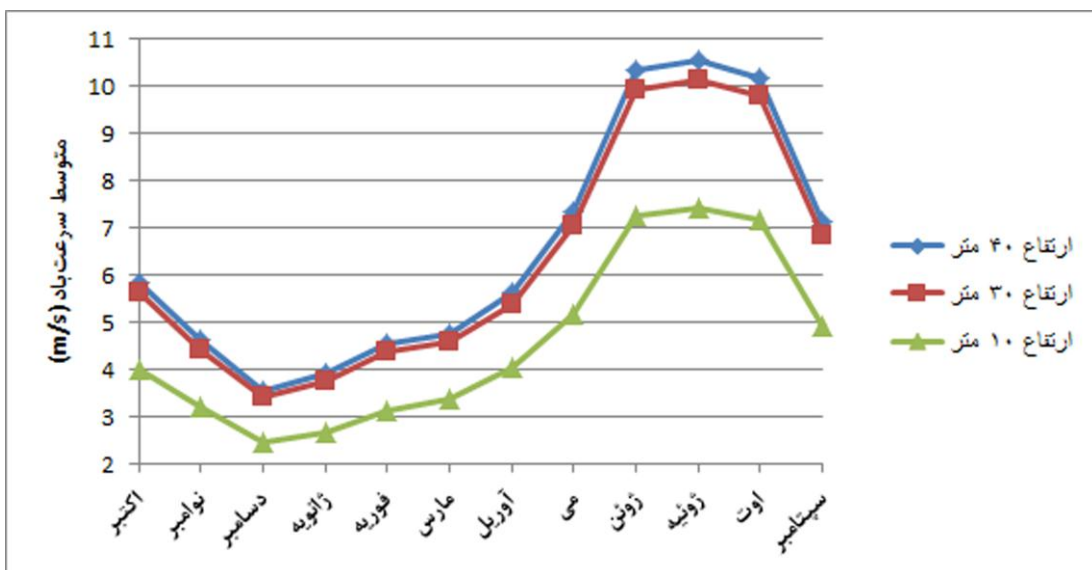
### ۲.۳. بررسی سرعت باد متوسط ماهیانه

در شکل‌های ۶ تا ۸ سرعت متوسط ماهیانه برای سه ایستگاه در ارتفاع‌های مختلف آورده شده است. همانطور که از نتایج آشکار است در ایستگاه خاش، باد با سرعت بیشتری در ماه‌های مارس و فوریه می‌وزد درحالی‌که در ایستگاه لوتک ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت بادخیزترین ماه‌هاست و در ایستگاه نصرت‌آباد ماه مارس دارای بیشترین سرعت باد است. همانطور که از جدول ۲ نمایان است در ایستگاه خاش متوسط سالیانه سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر ۳/۸۰ متر بر ثانیه، در ارتفاع ۳۰ متر ۴/۳۲ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۴۰ متر ۴/۵۷ متر بر ثانیه و در ایستگاه لوتک متوسط سالیانه

سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر ۴/۵۶ متر بر ثانیه، در ارتفاع ۳۰ متر ۶/۲۸ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۴۰ متر ۶/۵۴ متر بر ثانیه است. در ایستگاه نصرت‌آباد متوسط سالیانه سرعت باد در ارتفاع ۳۰ متر ۴/۸۲ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۴۰ متر ۵/۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. به طور استاندارد بادهای با سرعت کمتر از ۰/۲ متر بر ثانیه را باد آرام می‌گویند. بر این اساس در طول سال درصد باد آرام در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر در ایستگاه خاش به ترتیب: ۰/۸۴٪، ۰/۹٪ و ۱/۷٪ و در ایستگاه لوتک ۰/۴۲٪، ۰/۳۴٪ و ۰/۳۴٪ می‌باشد. همچنین در ایستگاه نصرت‌آباد درصد باد آرام به ترتیب ۰/۹٪ و ۰/۵۱٪ در ارتفاع‌های ۳۰ و ۴۰ متر می‌باشد.

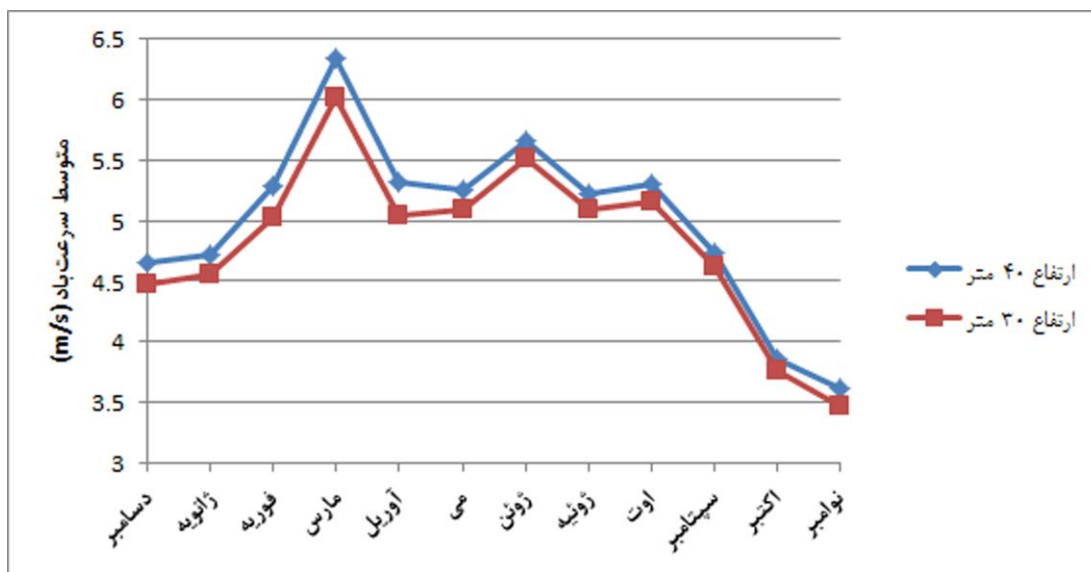


شکل ۶: تغییرات سرعت باد متوسط ماهانه در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۶ تا نوامبر ۲۰۰۷ در سه ارتفاع مختلف- ایستگاه خاش

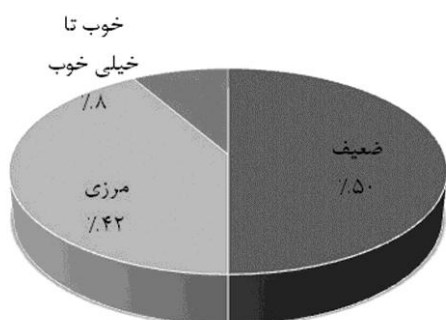


شکل ۷: تغییرات سرعت باد متوسط ماهانه در بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۸ تا سپتامبر ۲۰۰۹ در سه ارتفاع مختلف- ایستگاه لوتک

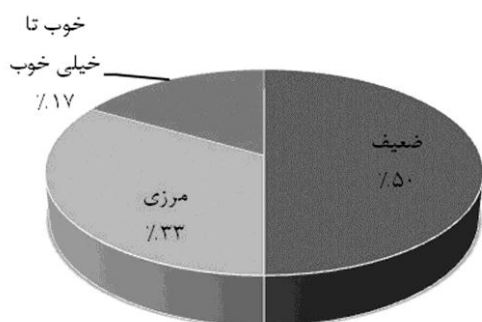




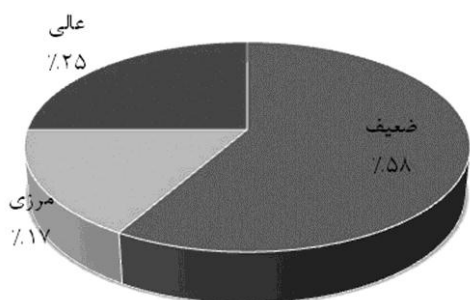
شکل ۸: تغییرات سرعت باد متوسط ماهانه در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۶ تا نوامبر ۲۰۰۷ در دو ارتفاع مختلف- ایستگاه نصرت آباد



شکل ۱۰: ارزیابی بادخیزی ایستگاه خاش در ارتفاع ۳۰ متر

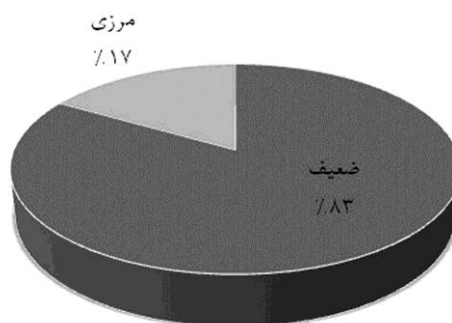


شکل ۱۱: ارزیابی بادخیزی ایستگاه خاش در ارتفاع ۴۰ متر



شکل ۱۲: ارزیابی بادخیزی ایستگاه لوتک در ارتفاع ۱۰ متر

پتانسیل انرژی بادی برای نصب توربین بادی در سرعت متوسط کمتر از ۴/۵ متر بر ثانیه ضعیف، ۴/۵ تا ۵/۴ متر بر ثانیه ضعیف، ۵/۴ تا ۶/۷ متر بر ثانیه خوب تا عالی ارزیابی می‌شود. [۵] در شکل‌های ۹ تا ۱۶ میزان بادخیزی سه ایستگاه خاش، لوتک و نصرت آباد در ارتفاع‌های مختلف بر اساس معیار ذکر شده طبقه‌بندی شده است. همانطور که از نتایج آشکار است ایستگاه لوتک دارای پتانسیل مناسب‌تری برای نصب توربین بادی می‌باشد.



شکل ۹: ارزیابی بادخیزی ایستگاه خاش در ارتفاع ۱۰ متر

### ۳.۳. بررسی تغییرات چگالی توان متوسط ماهیانه

محاسبه چگالی توان باد برای تعیین پتانسیل یک منطقه برای نصب توربین بادی بسیار مهم است زیرا مشخص می‌کند آن منطقه چه مقدار انرژی بر واحد زمان و واحد مساحت جارو شده<sup>۱۱</sup> توسط پره‌های توربین برای تبدیل به الکتریسیته فراهم می‌کند.<sup>[۱۱]</sup> همانطور که در بسیاری از منابع آمده است توان باد با مکعب سرعت رابطه دارد و توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$P(U) = \frac{1}{2} \rho A \bar{U}^3 \quad (9)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی هوا در ارتفاع سطح دریا و دمای  $15^\circ C$ ،  $\bar{U}^3$  متوسط مکعب سرعت باد و  $A$  مساحت جارو شده می‌باشد. چگالی هوا ثابت نیست و تابعی از درجه حرارت و فشار است که این عوامل با ارتفاع تغییر می‌کند. بنابراین جهت تعیین پتانسیل باد در منطقه‌ای با ارتفاع  $Z$  از سطح دریا بایستی چگالی هوا در آن منطقه توسط رابطه زیر محاسبه شود<sup>[۱۲]</sup>

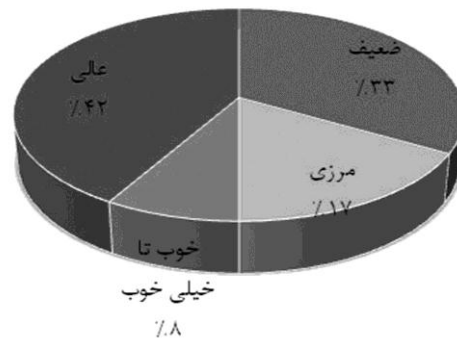
$$\rho = \frac{\rho_0 T_0}{T} \left(1 - \frac{\Gamma Z}{T_0}\right)^{\frac{g}{\Gamma R}} \quad (10)$$

که در آن  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  شتاب ثقل،  $R = 287 \text{ J/K.kg}$  ثابت هوا، دما بر حسب کلون،  $T_0 = 288 \text{ K}$  (۲۷۳+۱۵)،  $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$  چگالی هوا در سطح دریا و  $\Gamma$  تغییرات دمای عمودی است که معمولاً برابر  $6.5 \text{ K/km}$  در نظر گرفته می‌شود. ارتفاع از سطح دریا و متوسط دمای سالیانه ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است.

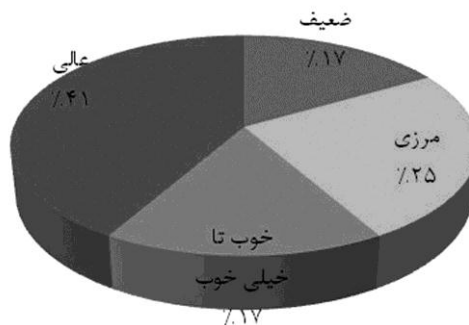
جدول ۳: ارتفاع از سطح دریا و متوسط دمای سالیانه ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	دمای متوسط سالیانه (سانتیگراد)
خاش	۱۴۰۹	۲۰/۸
لوتک	۴۶۵	۲۳/۶
نصرت آباد	۱۱۰۵	۲۱/۸

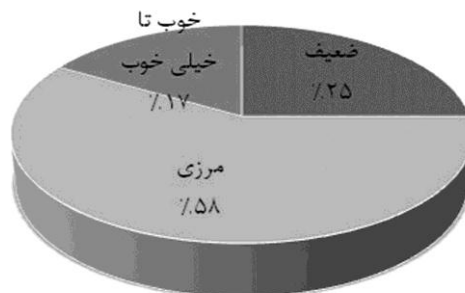
<sup>۱۱</sup>Swept area



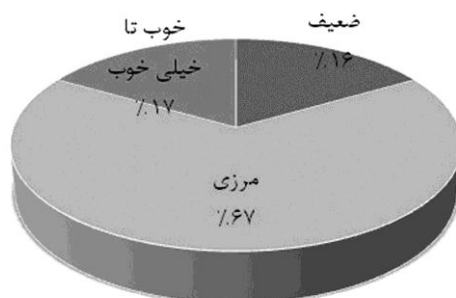
شکل ۱۳: ارزیابی بادخیزی ایستگاه لوتک در ارتفاع ۳۰ متر



شکل ۱۴: ارزیابی بادخیزی ایستگاه لوتک در ارتفاع ۴۰ متر



شکل ۱۵: ارزیابی بادخیزی ایستگاه نصرت‌آباد در ارتفاع ۳۰ متر



شکل ۱۶: ارزیابی بادخیزی ایستگاه نصرت‌آباد در ارتفاع ۴۰ متر

آورده شده است. چگالی توان متوسط سالیانه در ایستگاه خاش ۸۶ وات بر مترمربع در ارتفاع ۱۰ متر، ۱۱۴ وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متر و ۱۳۲ وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متر است. همچنین چگالی توان متوسط سالیانه در ایستگاه نصرت آباد ۱۲۵ وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متر و ۱۴۴ وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متر است. در ایستگاه لوتک چگالی توان متوسط سالیانه ۱۵۷ وات بر مترمربع در ارتفاع ۱۰ متر، ۳۴۴ وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متر و ۳۸۸ وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متر است.

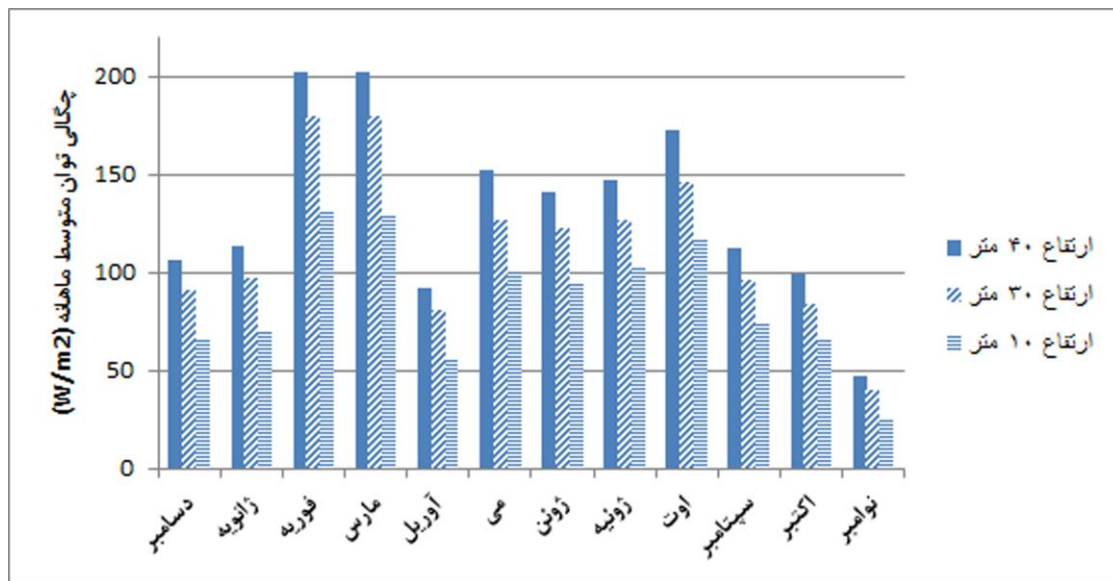
با استفاده از معادله ۱۰ متوسط سالیانه چگالی هوا برابر  $1.013 \text{ kg/m}^3$  برای ایستگاه خاش،  $1.125 \text{ kg/m}^3$  برای ایستگاه لوتک و  $1.048 \text{ kg/m}^3$  برای ایستگاه نصرت آباد برآورد شده است.

بنابراین چگالی توان باد یک شاخصه بهتر نسبت به سرعت باد می‌باشد. چگالی متوسط توان باد بر مبنای سرعت توسط رابطه زیر بیان می‌شود<sup>[۱۸]</sup>:

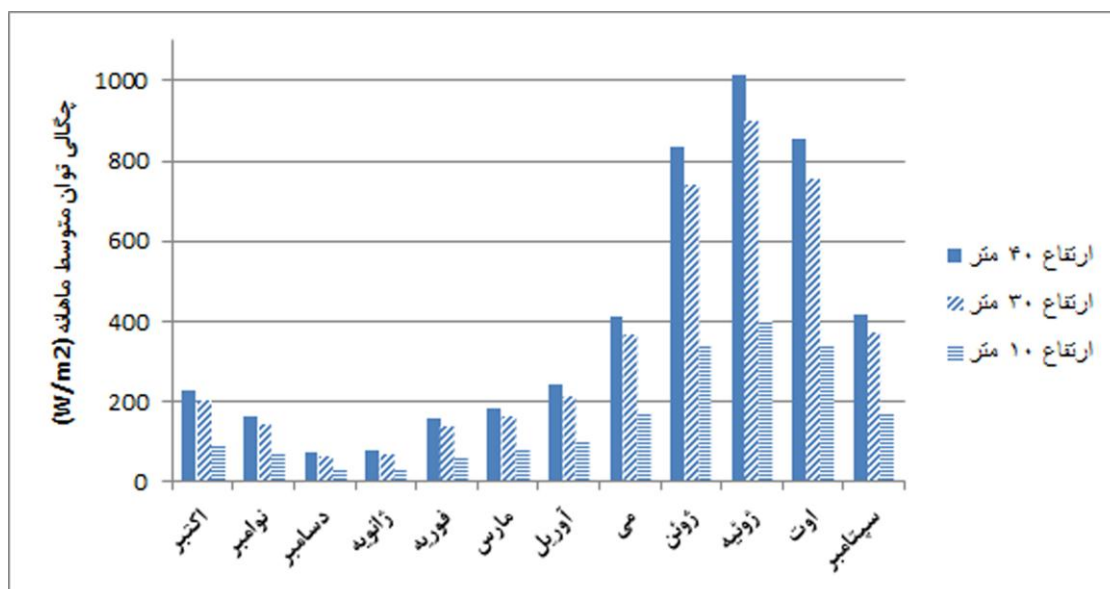
$$WPD = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \rho A U_i^3}{N} \quad (11)$$

که در این فرمول  $i$  بیانگر فواصل ده دقیقه‌ای ثبت سرعت باد و  $N$  بیانگر تعداد کل داده‌های ثبت شده است.

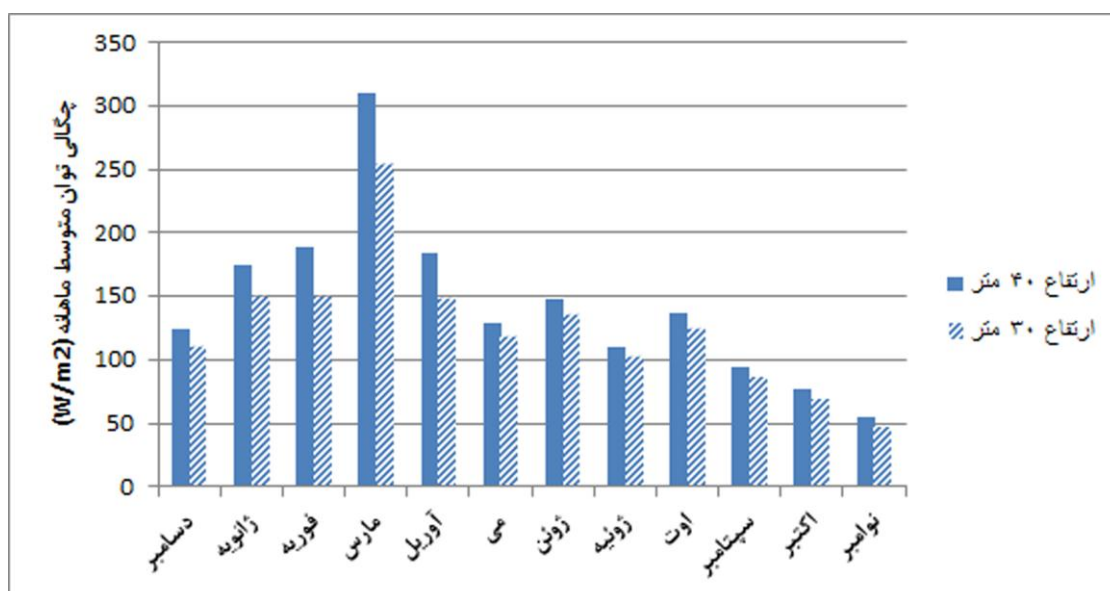
در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ متوسط چگالی توان ماهانه برای ارتفاعات مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل ۱۷: تغییرات چگالی توان متوسط ماهانه ( $W/m^2$ ) - ایستگاه خاش



شکل ۱۸: تغییرات چگالی توان متوسط ماهانه ( $W/m^2$ ) - ایستگاه لوتک



شکل ۱۹: تغییرات چگالی توان متوسط ماهانه ( $W/m^2$ ) - ایستگاه نصرت آباد

نمودار چندین رنگ خاص را نشان می‌دهد که محدوده سرعت باد را نشان می‌دهد. خطوط بلندتر جهت باد غالب را نشان می‌دهد.<sup>[۱۶]</sup> در شکل‌های زیر گلباد بر اساس زمان (فراوانی) وزش در ارتفاع ۳۰ متری نشان داده شده است.

### ۴.۳. گلباد

گلباد<sup>۱۲</sup> نموداری است که توزیع جهت باد را به همراه سرعت در منطقه نشان می‌دهد. نمودار گلباد یکی از ابزارهای معمول برای بیان اطلاعات بدست آمده از بادسنج‌ها می‌باشد (سرعت و جهت باد). نمودار نشان داده شده معمول‌ترین شکل گلباد است که شامل دوایر متحدالمرکز با ۱۶ فاصله زاویه‌ای مساوی می‌باشد و طول شعاع متناسب با فراوانی باد می‌باشد. راهنمای

به جهت جنوب غربی، در ایستگاه لوتک به جهت شمال و در ایستگاه نصرت آباد به جهت شرق می‌باشد.

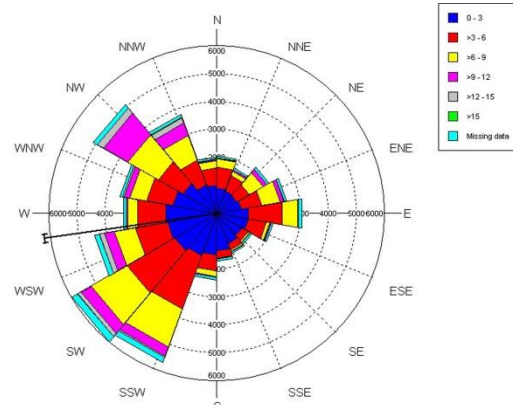
#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق داده‌های بادی در سه ایستگاه خاش، لوتک و نصرت آباد در استان سیستان و بلوچستان ارزیابی شده است و نتایج زیر به دست آمده است  
 ✓ در تابع توزیع ویبول متوسط سالیانه ضریب شکل  $k$  بین  $1/3$  و  $1/82$  و متوسط سالیانه ضریب مقیاس بین  $4/42$  و  $6/67$  می‌باشد. با توجه به معیارهای ارزیابی، روش گرافیکی نتایج بهتری را نسبت به روش جستوس ارایه می‌دهد. بیشترین میزان خطای  $RMSE$  در لوتک و ارتفاع ۱۰ متر با مقدار  $2/15\%$  رخ داده است.

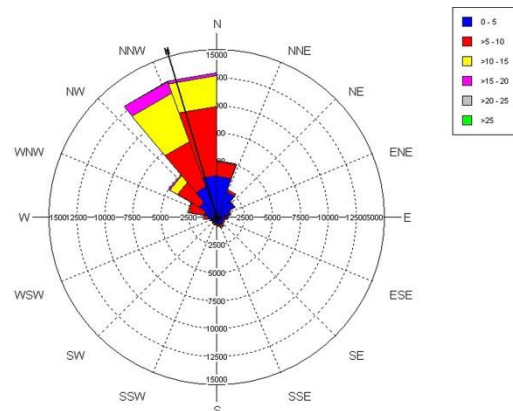
✓ در ایستگاه خاش متوسط سالیانه سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر  $3/80$  متر بر ثانیه، در ارتفاع ۳۰ متر  $4/32$  متر بر ثانیه و در ارتفاع ۴۰ متر  $4/57$  متر بر ثانیه و در ایستگاه لوتک متوسط سالیانه سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر  $4/56$  متر بر ثانیه، در ارتفاع ۳۰ متر  $6/28$  متر بر ثانیه و در ارتفاع ۴۰ متر  $6/54$  متر بر ثانیه است. در ایستگاه نصرت‌آباد متوسط سالیانه سرعت باد در ارتفاع ۳۰ متر  $4/82$  متر بر ثانیه و در ارتفاع ۴۰ متر  $5/00$  متر بر ثانیه می‌باشد.

✓ چگالی توان متوسط سالیانه در ایستگاه خاش ۸۶ وات بر مترمربع در ارتفاع ۱۰ متر، ۱۱۴ وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متر و ۱۳۲ وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متر است. همچنین چگالی توان متوسط سالیانه در ایستگاه نصرت آباد ۱۲۵ وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متر و ۱۴۴ وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متر است. در ایستگاه لوتک چگالی توان متوسط سالیانه ۱۵۷ وات بر مترمربع در ارتفاع ۱۰ متر، ۳۴۴ وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متر و ۳۸۸ وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متر است

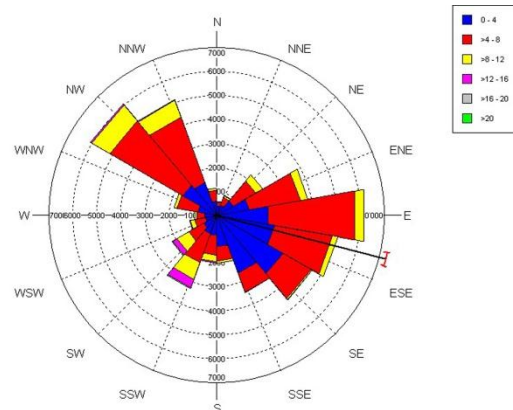
✓ در ایستگاه خاش باد غالب به جهت جنوب غربی، در ایستگاه لوتک به جهت شمال و در ایستگاه نصرت آباد به جهت مشرق می‌باشد



شکل ۲۰: گلباد براساس فراوانی وزش باد در ارتفاع ۳۰ متر در ایستگاه خاش



شکل ۲۱: گلباد براساس فراوانی وزش باد در ارتفاع ۳۰ متر در ایستگاه لوتک



شکل ۲۲: گلباد براساس فراوانی وزش باد در ارتفاع ۳۰ متر در ایستگاه نصرت آباد

در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ گلباد بر اساس اطلاعات سالیانه سرعت و جهت باد رسم شده است. همانطور که از شکل‌ها مشخص است در ایستگاه خاش باد غالب

a power generation source in the capital of Iran”, Tehran, Energy, 35(1), pp. 188-201 (2010).

[10] Akdağ, SA., and Dinler, A., “A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications”. Energy Conversion and Management, 50(7), pp. 1761-1766 (2009).

[11] Fyrippis, I., Axaopoulos, PJ. et al, “Wind energy potential assessment in Naxos Island”. Greece. Applied Energy, 87(2), pp. 577-586 (2010).

[12] Ucar, A. and Balo, F., “Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey”. Applied Energy, 86(10), pp. 1864-1872 (2009).

[13] Jowder, F., “Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain”. Applied Energy, 86(4), pp. 538-545 (2009).

[14] Eskin, N., Artar, H. et al, “Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey”, J Renew Sustain Energy Rev, 12(3), pp. 839-851 (2008).

[15] Carta, JA., Ramírez, P. et al, “A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis”. J Renew Sustain Energy Rev, 13(5), pp. 933-955 (2009).

[16] Mirhosseini, M., Sharifi, F. et al, “Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran”. J Renew Sustain Energy Rev, 15, pp. 449-459 (2011).

[17] Renewable Energy Organization of Iran, <http://www.sun.org.ir/>

[18] Rehman, sh., Al-Abadi, N, “Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia”. Renew Energy, 32, pp. 738-749 (2007).

✓ طبق نتایج ایستگاه لوتک دارای پتانسیل بالایی برای نصب مزرعه بادی است درحالیکه خاش و نصرت آباد برای نصب گسترده توربین بادی مناسب نیستند اما برای استفاده محلی از انرژی باد برای به کارگیری سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی بسیار مناسبند.

#### منابع

[1]Saghafi, M., “Modern Renewable Energies”, Tehran University Press (2003).

[2]<http://www.re-energy.ca>

[3]Rahimzadeh, F. and Jahangiri, Z., “How to Identify Suitable Wind Farming Location in Iran”, 3rd Conference on Energy Conservation in Building, Tehran, Iran, (2004).

[4][http://en.wikipedia.org/wiki/Sistan\\_and\\_Baluchestan\\_Province](http://en.wikipedia.org/wiki/Sistan_and_Baluchestan_Province)

[5]James, F. Manwell, Jon G. McGowan, Anthony, L. Rogers, “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application”, John Wiley & Sons, p.11 (2009).

[6]Togrul, IT. and Ertekin, C. A, “Statistical Investigation on the Wind Energy Potential of Turkey's Geographical Regions”, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 33(15), pp. 1399-1421 (2011).

[7]Akdağ, SA., Bagiorgas, HS. et al., “Use of two-component Weibull mixtures in the analysis of wind speed in the Eastern Mediterranean”. Applied Energy, 87(8), pp. 2566-2573 (2010).

[8]Zhou, J., Erdem, E. et al, “Comprehensive evaluation of wind speed distribution models: A case study for North Dakota sites”, Energy Conversion and Management, 51(7), pp. 1449-1458 (2010).

[9]Keyhani, A., Ghasemi, M. et al, “An assessment of wind energy potential as