

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

سید امین رضویه (کاشناس ارشد)

احمد صداقت* (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۳)
دوری ۲ - ۳۰، شماره ۲/۲، ص. ۲۹-۳۱

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 داده های بادی، شامل سرعت و جهت باد در ارتفاع های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه در طول سال انجام گرفته است. دانستن «توزیع فراوانی سرعت باد» عاملی بسیار مهم برای ارزیابی بادخیزی یک منطقه است. برای این منظور، در این تحقیق از تابع توزیع ویبول که در مطالعات بادی پرکاربرد است بهره گرفته ایم. میانگین سرعت باد و چگالی توان متوسط ماهیانه در سه ایستگاه و ارتفاع های مختلف بررسی شده نشان می دهد که ایستگاه خاش و نصرت آباد برای نصب گسترده ی توربین بادی مناسب نیستند، اما برای استفاده ی محلی از انرژی باد برای به کارگیری سیستم های الکتریکی و مکانیکی بسیار مناسب اند. ایستگاه لوتک نیز از پتانسیل بسیار بالایی برای نصب مزرعه ی بادی برخوردار است.

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

۱. مقدمه

۱.۱. تاریخچه ی استفاده از انرژی باد

بشر از زمان های بسیار دور به شیوه های مختلف از انرژی باد بهره گرفته است. ایرانیان از نخستین کسانی بودند (از حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد مسیح) که برای آردکردن غلات از آسیاب های بادی استفاده کردند، و امروزه نیز آثار آن در نواحی خواف و تایباد در شرق کشور، به چشم می خورد. همچنین مصریان باستان از نیروی باد برای راندن کشتی های خود روی رودخانه ی نیل استفاده کردند. بعدها با نصب بادبان به یک محور مرکزی که با استفاده از نیروی باد تولید نیروی چرخشی می کرد، بشر توانست به نیروی لازم برای آبکشی به منظور آبیاری، آردکردن غلات و سرانجام اره کردن چوب دست یابد. در قرن هفدهم میلادی، مردم هلند طرح پایه آسیاب های بادی را بهبود دادند و همین امر این کشور را در زمره ی غنی ترین و صنعتی ترین کشورهای اروپا قرار داد. از آسیاب های بادی در برخی از کشورها به منظور آسیاب گندم و ذرت، پمپ کردن آب، و نیز قطع درختان استفاده شده است.^[۱]

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 سیستم های کاربردی» امکان بالقوه ی فنی نهایی باد در جهان را برابر 26000 TWh در سال تخمین زد. با در نظر گرفتن محدودیت های اقتصادی می توان پذیرفت که ۳۳ درصد

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۵/۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۵/۲۶، پذیرش ۱۳۹۲/۶/۴.

razavieh@outlook.com
sedaghat@cc.iut.ac.ir

این مقدار انرژی (یعنی مقدار 9000 TWh) قابل وصول است -- معادل نیروگاهی به قدرت 1 TW که میزان 24×365 ساعت در سال کار می کند. از نقشه ی جهانی باد تخمین زده می شود که ۲۷ درصد مساحت خشکی های کره زمین (تقریباً $10^6 \text{ km}^2 \times 10^7$) در معرض وزش باد، با سرعت متوسط سالانه بیش از $5/1$ متر بر ثانیه یا $18/3$ کیلومتر بر ساعت در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین قرار دارد.^[۲] در جدول ۱ مساحت خشکی های زمین که در معرض وزش باد با سرعت های مختلف بیش از $5/1$ متر بر ثانیه قرار دارند ارائه شده است.

۳.۱. مزایای استفاده از انرژی باد

مهم ترین مزایای بهره برداری از انرژی باد عبارت است از:

۱. عدم نیاز توربین های بادی به سوخت، و در نتیجه کاهش میزان مصرف سوخت های فسیلی؛
۲. رایگان بودن انرژی باد؛
۳. توانایی تأمین بخشی از تقاضای انرژی برق؛
۴. کاهش نسبی قیمت انرژی حاصل از باد در بلندمدت؛
۵. تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار انرژی؛
۶. قدرت مانور زیاد برای بهره برداری در هر ظرفیت و اندازه (از چندوات تا چندین مگاوات)؛
۷. عدم نیاز به آب؛

جدول ۱. مساحت خشکی های زمین که در معرض وزش باد با سرعت های بیش از ۵/۱ متر بر ثانیه قرار دارند.^[۱]

منطقه	کل سطح خشکی (km ^۲)	مساحت مطلوب جهت نصب توربین بادی (km ^۲)
آمریکای شمالی	۱۹۳۳۹	۷۸۷۶
آمریکای لاتین	۱۸۴۸۲	۳۳۱۰
اروپای غربی	۴۷۴۲	۱۹۶۸
اروپای شرقی	۲۳۰۴۷	۶۷۸۳
خاورمیانه و شمال آفریقا	۸۱۴۲	۲۵۶۶
آفریقای زیر صحر	۷۲۵۵	۲۲۰۹
اقیانوس آرام	۲۱۳۵۴	۴۱۸۸
چین	۹۵۹۷	۱۰۵۶
آسیای مرکزی و جنوبی	۴۲۹۹	۲۴۳
جمع	۱۰۶۶۶۰	۲۹۱۴۳

انرژی باد در سایت های مطالعه شده حدود ۶۵۰۰ مگاوات است و بیشتر نقاط دارای پتانسیل در مناطق شرق کشور واقع شده اند.^[۳]

امروزه استان سیستان و بلوچستان به عنوان یکی از خشک ترین مناطق ایران برشمرده می شود. در این استان میزان بارندگی از شرق به غرب افزایش می یابد و در نواحی ساحلی میزان رطوبت نسبی بسیار بالاست. این استان از جهات مختلف در معرض بادهای موسمی و فصلی است؛ اهم این جریانات بادی عبارتند از: باد ۱۲۰ روزه سیستان (لوار)، باد قوس، باد هفتم (گاوکش)، باد نم یا باد جنوب، باد هوشاک، بادهای مرطوب و موسمی اقیانوس هند، باد شمال یا گوریچ، و باد غربی یا گرد.^[۴] در شکل های 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.

۸. عدم نیاز به زمین زیاد برای نصب؛

۹. ایجاد اشتغال؛

۱۰. نداشتن آلودگی زیست محیطی.^[۲]

۴.۱. آینده ی انرژی باد در ایران

بازار تأمین انرژی یک بازار رقابتی است که در آن تولید برق در نیروگاه های بادی، در مقایسه با نیروگاه های سوخت های فسیلی، کاربران را با امتیازات نوینی مواجه ساخته است. از جمله امتیازات نیروگاه های بادی این است که در طول مدت زمان عمر خود، سال های زیادی بدون نیاز به هزینه ی سوخت به تولید انرژی می پردازد، در حالی که هزینه ی دیگر منابع تولید انرژی در طول این سال ها افزایش خواهد یافت.

فعالیت گسترده ی بسیاری از کشورهای جهان برای تولید الکتریسیته از انرژی باد، سرمشقی است برای دیگر کشورها، که در این زمینه در نقطه ی شروع یک راه طولانی اند. بسیاری از منابع اقتصادی در حال رشد در منطقه ی آسیا واقع شده است؛ از طرفی اقتصاد رو به رشد کشورهای آسیایی از جمله ایران، بیش از پیش ضرورت تولید الکتریسیته در این کشورها را مطرح، و تولید الکتریسیته از منابع غیر فسیلی را ضروری می سازد. افزون بر این موارد، نبود شبکه ی برق سراسری در بسیاری از بخش های روستایی در کشورهای آسیایی نیز مهر تأییدی است بر نیاز به سیستم های تولید الکتریسیته از انرژی باد. پس در خصوص دورنمای آینده ی اقتصادی استفاده از انرژی باد در ایران باید گفت استفاده از این انرژی موجب صرفه جویی فرآورده های نفتی به عنوان سوخت می شود.

صرفه جویی حاصله در وهله ی اول موجب حفظ فرآورده های نفتی می شود و از این طریق امکان صادرات و مهم تر از آن تبدیل این فرآورده ها به مشقات بسیار زیاد پتروشیمی با ارزش افزوده ی بالا فراهم می شود. در وهله ی دوم تولید الکتریسیته از این انرژی، فاقد هرگونه آلودگی زیست محیطی است و همین عامل کمک شایانی به حفظ طبیعت سالم محیط زیست بشر می کند و در نتیجه مسیر برای نیل به توسعه ی پایدار اقتصادی، اجتماعی فراهم می شود. استفاده از انرژی باد در ایران علاوه بر عمران و آبادانی موجب ایجاد مشاغل جدید شده و بالاخره با بومی سازی فناوری انرژی باد اقتصاد کشور رشد بیشتری می یابد.

در پروژه ی تعیین پتانسیل باد ایران، ۲۶ منطقه ی کشور شامل ۴۵ سایت مورد مطالعه قرار گرفت که براساس نتایج این پروژه، ایران کشوری با باد متوسط است ولی برخی از مناطق آن دارای باد مناسب و مداوم برای تولید برق است. توان بالقوه ی

۲. روش‌های تحلیل داده‌های بادی منطقه

۲.۱.۲. تابع توزیع سرعت باد^۱

دانستن توزیع فراوانی سرعت باد عاملی بسیار مهم برای ارزیابی پتانسیل انرژی باد در مناطق بادخیز است. اگر توزیع سرعت باد در هر منطقه‌ی بادی مشخص باشد، توان باد و امکان‌سنجی اقتصادی سایت به‌راحتی قابل محاسبه است. اطلاعات بادی به دست آمده دامنه‌ی گسترده دارد و بنابراین، در تحلیل انرژی باد در اختیار داشتن تنها چند پارامتر کلیدی برای توضیح دامنه‌ی وسیع داده‌های بادی کافی است.^[۵] ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش برای روند اشاره شده استفاده از تابع توزیع است. برای مدل کردن منحنی سرعت باد از توابع ریاضی زیادی می‌توان استفاده کرد. در مطالعات توان باد، معمولاً از توابع چگالی احتمال ویبول^۲ و رایلی^۳ استفاده می‌شود. در این مطالعه فقط از تابع ویبول استفاده شده است زیرا رایلی تنها زیرمجموعه‌ی از آن است.

در تعیین تابع چگالی احتمال ویبول محاسبه‌ی دو ضریب ضرورت می‌یابد: ضریب بی‌بعد شکل^۴ و ضریب مقیاس^۵. تمامی این ضرایب تابعی از σ_U و $\Gamma(x)$ هستند که σ_U انحراف معیار است و با استفاده از رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است:

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

که در آن N تعداد داده‌های ثبت شده و $\bar{U}$ نیز متوسط سرعت باد است که توسط رابطه‌ی ۲ قابل محاسبه است:

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

$\Gamma(x)$ نیز تابع گاما^۶ است که چنین تعریف می‌شود:

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

در نهایت، تابع چگالی احتمال ویبول توسط رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

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

اساساً ضریب شکل (c) نشان می‌دهد که یک منطقه تا چه حد بادخیز است، در حالی که ضریب مقیاس (k) نشان می‌دهد که تابع توزیع سرعت باد تا چه اندازه به صورت قله‌ی است؛ این بدان معناست که هر اندازه سرعت باد به یک مقدار خاص نزدیک‌تر باشد مقدار k بزرگ‌تر می‌شود. بررسی کارهای انجام شده نشان می‌دهد که ضریب شکل در توزیع ویبول در بیشتر مناطق بادخیز دنیا بین ۱/۲ تا ۲/۷۵ است.^[۱۶-۱۴]

برای محاسبه‌ی مقادیر k و c راه حل ثابتی وجود ندارد و به روش‌های مختلف می‌توان این ضرایب را با استفاده از σ_U و $\Gamma(x)$ محاسبه کرد.

۲.۱.۲.۲. روش نیمه‌تجربی جستوس^۷

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

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

۲.۱.۲. روش گرافیکی^۸

مقادیر ضریب شکل (k) و ضریب مقیاس (c) با برازش منحنی بین داده‌های بادی قابل محاسبه است. در تحقیق حاضر این کار توسط نرم‌افزار متلب^۹ انجام شده است. تابع ویبول با دو متغیر ضریب شکل و ضریب مقیاس به نرم‌افزار داده شده و این دو متغیر چنان تعیین می‌شوند که میانگین ریشه با مجذور خطا (RMSE)^{۱۰}، پارامتری که در بخش ارزیابی توزیع ویبول شرح خواهیم داد) بین تابع و مقادیر واقعی کمینه شود.

تابع توزیع ویبول نسبت به توابع توزیع دیگر دارای مزایایی است. مهم‌ترین این مزایا عبارت‌اند از: ۱. انعطاف‌پذیری؛ ۲. وابستگی به تنها دو پارامتر؛ ۳. سادگی محاسبه‌ی پارامترها؛ ۴. هنگامی که پارامترها تخمین زده شدند تابع ویبول به خوبی میان داده‌ها برازش می‌شود.^[۱۵]

اشکال اساسی تابع توزیع ویبول برای سرعت‌های صفر یا خیلی کم این است که احتمال وزش باد با سرعت‌های مذکور را به‌دقت نشان نمی‌دهد. برای تعیین پتانسیل نصب توربین‌های تجاری، ارائه‌ی احتمال وزش باد در این سرعت‌ها غیرضروری است؛ زیرا این توربین‌ها در سرعت‌هایی خیلی بیشتر از سرعت‌های باد آرام شروع به کار می‌کنند و بنابراین اثرات احتمالات در سرعت‌های پایین قابل چشم‌پوشی است (سرعت شروع عملکرد توربین‌های تجاری بین ۲/۵ تا ۳/۵ متر بر ثانیه است).^[۹] همچنین از آنجا که انرژی باد با مکعب سرعت رابطه دارد در سرعت‌های باد نزدیک صفر، توان باد بسیار کم و قابل اغماض 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 منطقه‌ی خاش، لوتک و نصرت‌آباد است. اطلاعات یادشده توسط سازمان انرژی‌های نو جمهوری اسلامی ایران^[۱۷] برای فاصله‌ی 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 که تابع تا چه اندازه در برازش داده‌های اندازه‌گیری شده کارایی دارد. متأسفانه روش‌های استاندارد خاصی برای ارزیابی برازش وجود ندارد و این کار به روش‌های متفاوتی انجام می‌شود. در تحقیق حاضر از روش میانگین ریشه با مجذور خطا (RMSE) که یکی از روش‌های معروف است استفاده شده است. پارامتر RMSE میزان انحراف بین مقادیر مشاهده‌ی و مقادیر پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. این پارامتر باید تا حد امکان نزدیک صفر باشد و مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود (N تعداد کل نتایج مشاهده شده است):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (۷)$$

روش دیگر برای ارزیابی تابع ویبول استفاده از پارامتر R^2 است. این پارامتر باید تا حد امکان نزدیک ۱ باشد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{(y_i - \bar{y})^2} \quad (۸)$$

y_i مقدار واقعی، x_i مقادیر محاسبه شده توسط رابطه‌ی ارائه شده برای همان مقدار y_i ، و $\bar{y}$ متوسط مقادیر y_i است.

جدول ۲. مقایسه‌ی ضرایب و بیول محاسبه‌شده به 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	R^2	ضریب شکل	ضریب مقیاس	RMSE	R^2
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
نصرت‌آباد	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

۳. نتایج

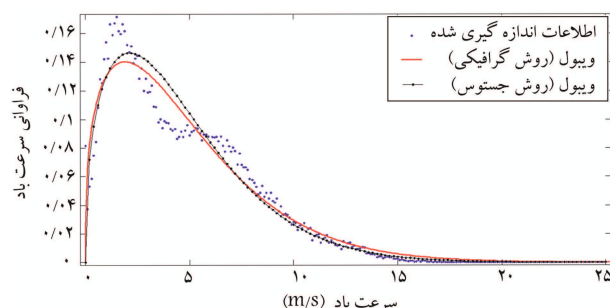
۳.۱. نتایج توزیع و بیول

در جدول ۲ ضرایب و بیول برای ایستگاه‌های خاش، لوتک و نصرت‌آباد در سه ارتفاع مختلف ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود متوسط سالیانه‌ی ضریب شکل (k) بین ۱٫۳ و ۱٫۸۲، و متوسط سالیانه‌ی ضریب مقیاس (c) بین ۴٫۴۲ و ۶٫۶۷ است. 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 σ_{II} در تمامی ارتفاع‌ها در نصرت‌آباد رخ می‌دهد و این نشان می‌دهد سرعت‌های باد ثبت‌شده به میانگین سرعت باد در آن منطقه نزدیک است.

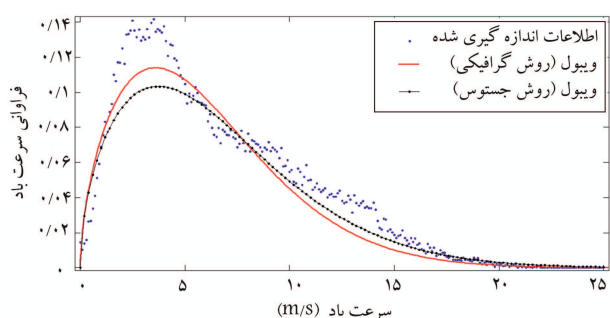
با توجه به معیارهای ارزیابی، نتایج حاصل از روش گرافیکی در مقایسه با روش جستوس بهتر است. بیشترین میزان خطای RMSE در لوتک و ارتفاع ۱۰ متر با مقدار ۲٫۱۵ درصد رخ داده است. در شکل‌های ۳ تا ۵ چگالی توزیع واقعی سرعت باد و نیز چگالی توزیع و بیول با استفاده از دو روش گرافیکی و جستوس برای سه ایستگاه خاش، لوتک و نصرت‌آباد در ارتفاع ۴۰ متری نشان داده شده است. لوتک در سرعت‌های بالا فراوانی بیشتری دارد.

۳.۲. بررسی متوسط ماهیانه‌ی سرعت باد

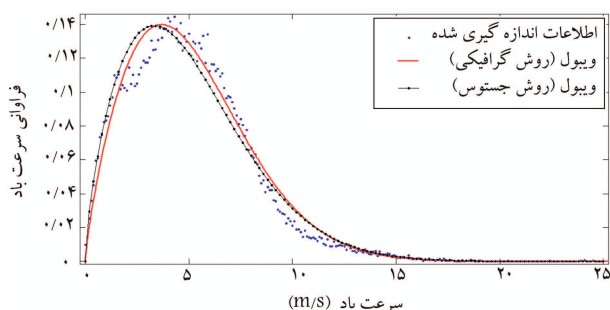
در شکل‌های ۶ تا ۸ سرعت متوسط ماهیانه برای سه ایستگاه در ارتفاع‌های مختلف آورده شده است. چنان‌که نتایج آشکار می‌سازد در ایستگاه خاش، باد با سرعت بیشتری در ماه‌های مارس و فوریه می‌وزد، در حالی که در ایستگاه لوتک ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت بادخیزترین ماه‌هاست و در ایستگاه نصرت‌آباد ماه مارس دارای بیشترین سرعت باد است. همچنین در ایستگاه خاش (جدول ۲) متوسط سالیانه‌ی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری برابر ۳٫۸۰ متر بر ثانیه، در ارتفاع ۳۰ متری برابر ۴٫۳۲ متر بر ثانیه، و در ارتفاع ۴۰ متری برابر ۴٫۵۷ متر بر ثانیه است. در ایستگاه لوتک متوسط سالیانه‌ی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری برابر ۴٫۵۶ متر بر ثانیه، در ارتفاع ۳۰ متری برابر ۶٫۲۸ متر بر ثانیه، و در ارتفاع ۴۰ متری برابر ۶٫۵۴ متر بر ثانیه است. در ایستگاه نصرت‌آباد متوسط سالیانه‌ی سرعت باد در ارتفاع ۳۰ متری برابر ۴٫۸۲ متر بر ثانیه، و در ارتفاع ۴۰ متری برابر ۵٫۰۰ متر بر ثانیه است. به‌طور استاندارد بادهای با سرعت کم‌تر از ۰٫۲ متر بر ثانیه را باد آرام می‌گویند. براین اساس در طول سال درصد باد آرام در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر در ایستگاه خاش



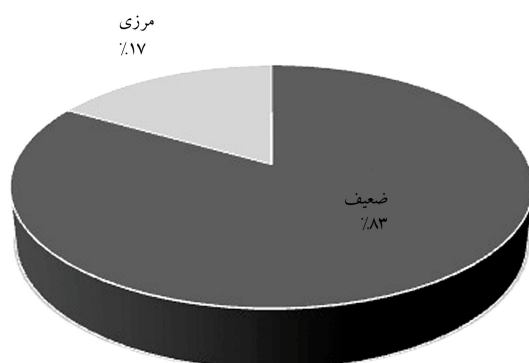
شکل ۳. مقایسه‌ی چگالی احتمال واقعی و چگالی احتمال توزیع و بیول برای ایستگاه خاش در دوره‌ی آماری، ارتفاع ۴۰ متر.



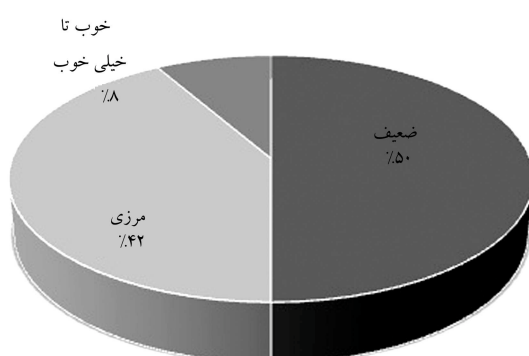
شکل ۴. مقایسه چگالی احتمال واقعی و چگالی احتمال توزیع و بیول برای ایستگاه لوتک در دوره‌ی آماری، ارتفاع ۴۰ متر.



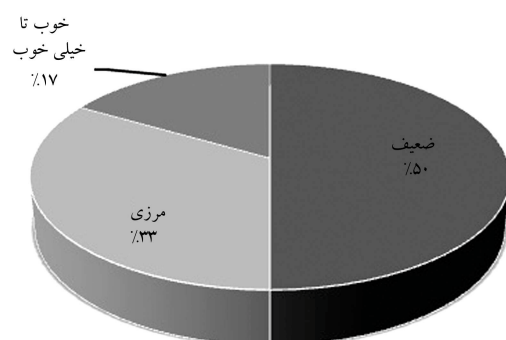
شکل ۵. مقایسه چگالی احتمال واقعی و چگالی احتمال توزیع و بیول برای ایستگاه نصرت‌آباد در دوره‌ی آماری، ارتفاع ۴۰ متر.



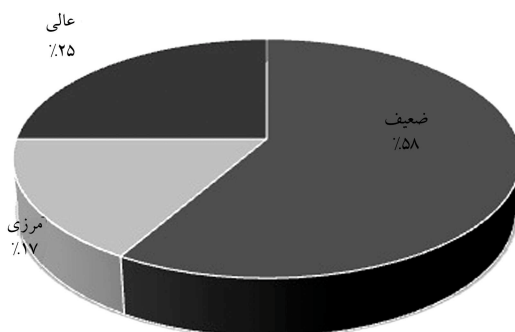
شکل ۹. ارزیابی بادخیزی ایستگاه خاش در ارتفاع ۱۰ متر.



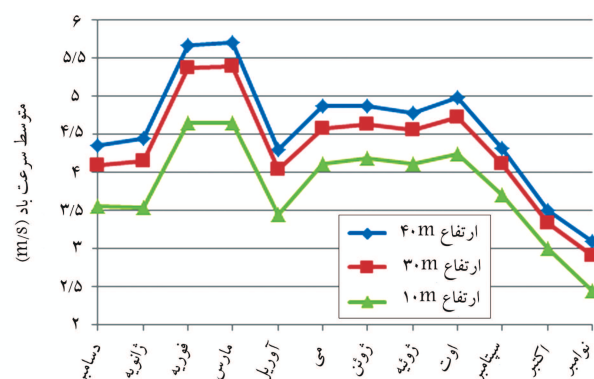
شکل ۱۰. ارزیابی بادخیزی ایستگاه خاش در ارتفاع ۳۰ متر.



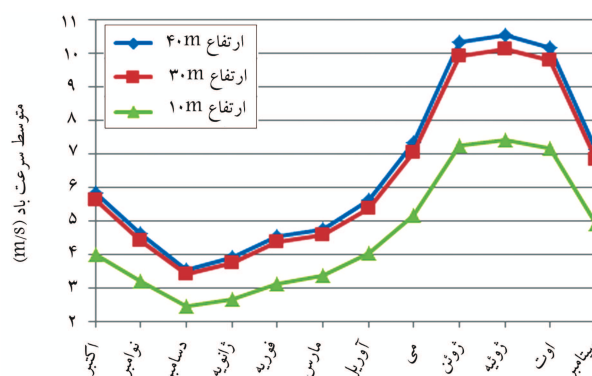
شکل ۱۱. ارزیابی بادخیزی ایستگاه خاش در ارتفاع ۴۰ متر.



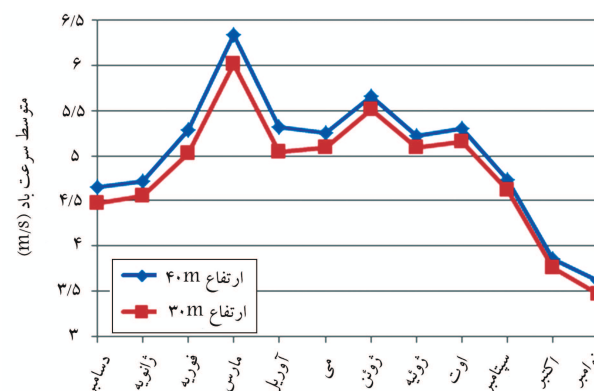
شکل ۱۲. ارزیابی بادخیزی ایستگاه لوتک در ارتفاع ۱۰ متر.



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.

به ترتیب برابر ۰/۸۴٪، ۰/۹٪ و ۱/۷٪؛ و در ایستگاه لوتک به ترتیب برابر ۰/۴۲٪، ۰/۳۴٪ و ۰/۳۴٪ است. همچنین در ایستگاه نصرت آباد درصد باد آرام به ترتیب ۰/۹٪ و ۰/۵۱٪ در ارتفاع های ۳۰ و ۴۰ متر است.

پتانسیل انرژی باد برای نصب توربین بادی در سرعت متوسط کم تر از ۴/۵ متر بر ثانیه ضعیف، ۴/۵ تا ۵/۴ متر بر ثانیه مرزی، ۵/۴ تا ۶/۷ متر بر ثانیه خوب تا خیلی خوب، و برای سرعت های بالاتر از ۶/۷ متر بر ثانیه عالی ارزیابی می شود. [۵]

در شکل های ۹ تا ۱۶ میزان بادخیزی سه ایستگاه خاش، لوتک و نصرت آباد در

ارتفاع‌های مختلف براساس معیار ذکر شده طبقه‌بندی شده است. چنان که نتایج بیان می‌دارند ایستگاه لوک در پتانسیل مناسب‌تری برای نصب توربین بادی است.

۳.۳. بررسی تغییرات چگالی توان متوسط ماهیانه

محاسبه‌ی چگالی توان باد برای تعیین پتانسیل یک منطقه به‌منظور نصب توربین بادی بسیار مهم است زیرا مشخص می‌کند آن منطقه چه مقدار انرژی بر واحد زمان و واحد مساحت جاروشده^{۱۱} توسط پره‌های توربین برای تبدیل به الکتریسیته فراهم می‌کند.^[۱۱] چنان که در بسیاری از منابع آمده، توان باد با مکعب سرعت رابطه دارد و چنین بیان می‌شود:

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

در این رابطه ρ چگالی هوا در ارتفاع سطح دریا و دمای $15^\circ C$ ، $\bar{U}^3$ متوسط مکعب سرعت باد، و A مساحت جاروشده است. چگالی هوا ثابت نیست و تابعی از درجه حرارت و فشار است که این عوامل با ارتفاع تغییر می‌کند. بنابراین برای تعیین پتانسیل باد در منطقه‌ی با ارتفاع Z از سطح دریا باید چگالی هوا در آن منطقه را محاسبه کرد:^[۱۲]

$$\rho = \frac{\rho_0 T_0}{T} \left(1 - \frac{\Gamma Z}{T_0}\right)^{\frac{\gamma}{\Gamma}}$$

که در آن $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ شتاب ثقل، $R = 9.81 \text{ J/K.kg}$ ثابت هوا، T دما برحسب کلوین، $T_0 = 288 \text{ K}$ ($15 + 273$)، $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ چگالی هوا در سطح دریا و Γ تغییرات دمای عمودی است که معمولاً برابر 6.5 K/km در نظر گرفته می‌شود. ارتفاع از سطح دریا و متوسط دمای سالیانه‌ی ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است.

با استفاده از معادله‌ی ۱۰ متوسط سالیانه‌ی چگالی هوا برای ایستگاه خاش برابر 1.13 kg/m^3 ، برای ایستگاه لوک برابر 1.125 kg/m^3 و برای ایستگاه نصرت‌آباد معادل 1.048 kg/m^3 برآورد شده است. بنابراین چگالی توان باد یک ویژگی برتر نسبت به سرعت باد است. چگالی متوسط توان باد بر مبنای سرعت چنین بیان می‌شود:^[۱۸]

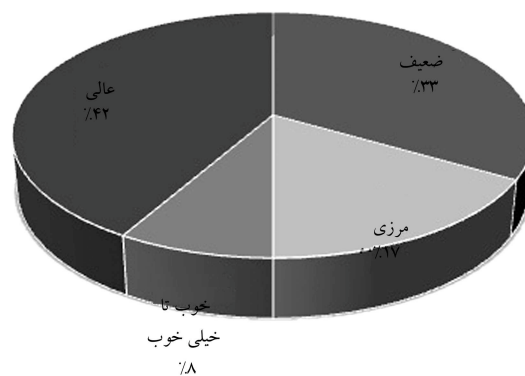
$$WPD = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \rho A U_i^3}{N} \quad (11)$$

i بیان‌گر فواصل ۱۰ دقیقه‌ی ثبت سرعت باد و N بیان‌گر تعداد کل داده‌های ثبت شده است.

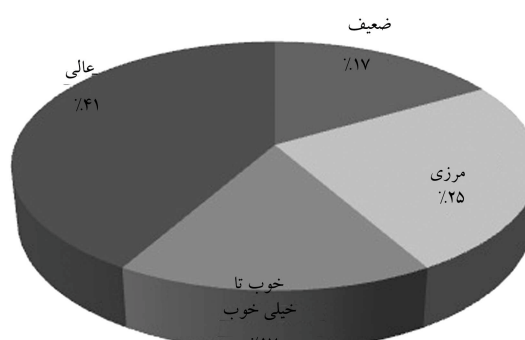
در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ متوسط چگالی توان ماهانه برای ارتفاعات مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. چگالی توان متوسط سالیانه در

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

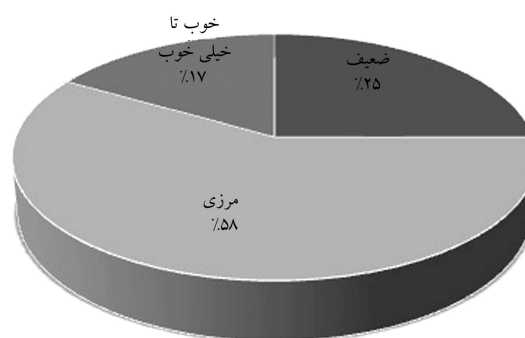
ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	دمای متوسط سالیانه (سانتی‌گراد)
خاش	۱۴۰۹	۲۰٫۸
لوک	۴۶۵	۲۳٫۶
نصرت‌آباد	۱۱۰۵	۲۱٫۸



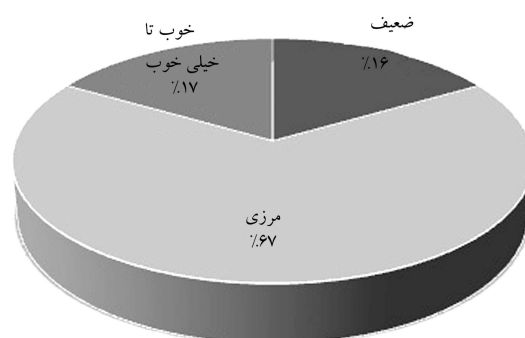
شکل ۱۳. ارزیابی بادخیزی ایستگاه لوک در ارتفاع ۳۰ متر.



شکل ۱۴. ارزیابی بادخیزی ایستگاه لوک در ارتفاع ۴۰ متر.



شکل ۱۵. ارزیابی بادخیزی ایستگاه نصرت‌آباد در ارتفاع ۳۰ متر.

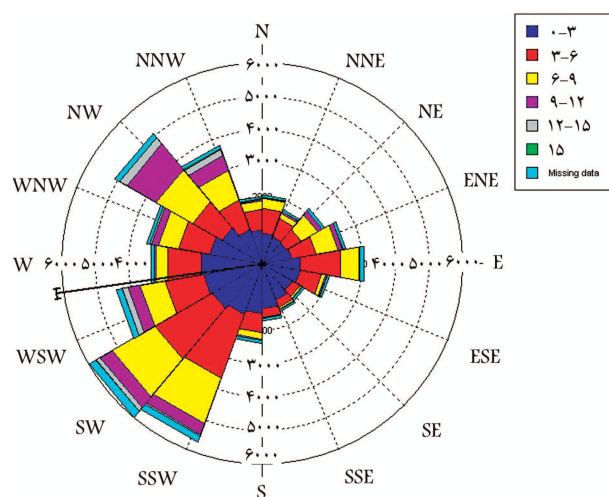


شکل ۱۶. ارزیابی بادخیزی ایستگاه نصرت‌آباد در ارتفاع ۴۰ متر.

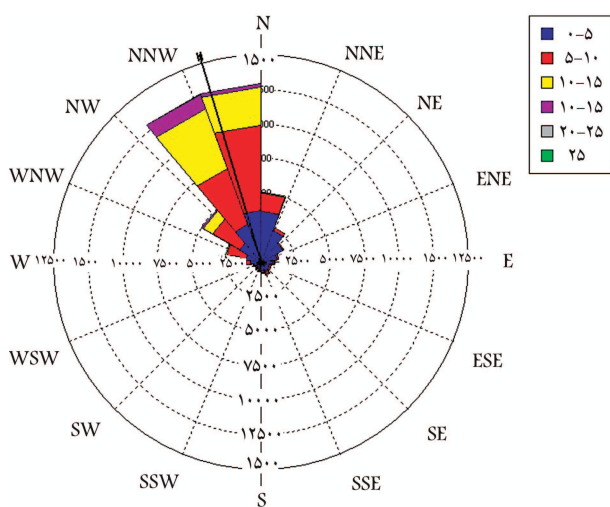
۴.۳. گلباد ۱۲

گلباد نموداری است که توزیع جهت باد را به همراه سرعت در منطقه نشان می‌دهد. نمودار گلباد یکی از ابزارهای معمول برای بیان اطلاعات به دست آمده از بادسنج‌هاست (سرعت و جهت باد). نمودار نشان داده شده معمول‌ترین شکل گلباد است که شامل دایره متحدالمرکز با ۱۶ فاصله زاویه‌ی مساوی است و طول شعاع متناسب با فراوانی باد است. راهنمای نمودار چندین رنگ خاص را نشان می‌دهد که بیان‌گر محدوده‌ی سرعت باد است؛ خطوط بلندتر جهت باد غالب را نشان می‌دهد.^[۱۶] در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ گلباد براساس زمان (فراوانی) وزش و اطلاعات سالیانه‌ی سرعت و جهت باد در ارتفاع ۳۰ متری نشان داده شده است.

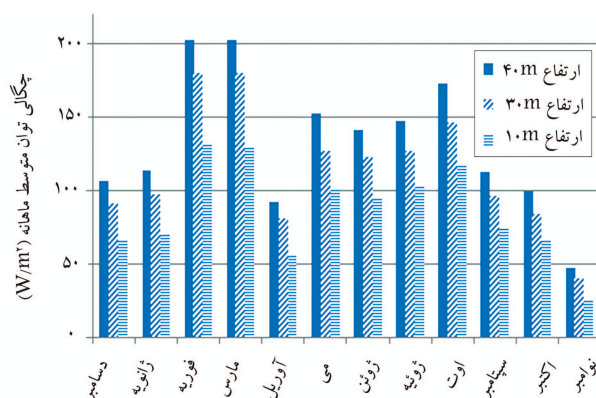
چنان‌که مشاهده می‌شود جهت (راستای) غالب باد در ایستگاه خاش به سمت جنوب غربی، در ایستگاه لوتک به سمت شمال و در ایستگاه نصرت‌آباد به سمت شرق است.



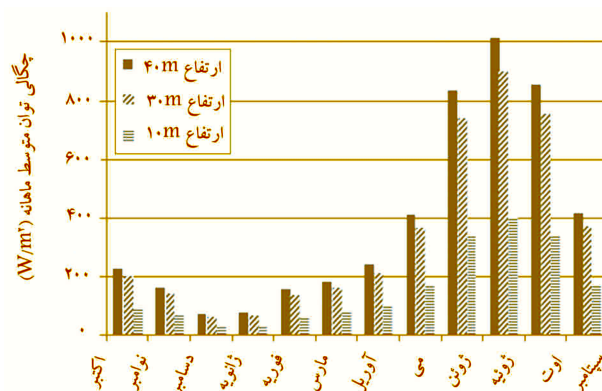
شکل ۲۰. گلباد براساس فراوانی وزش باد در ارتفاع ۳۰ متری در ایستگاه خاش.



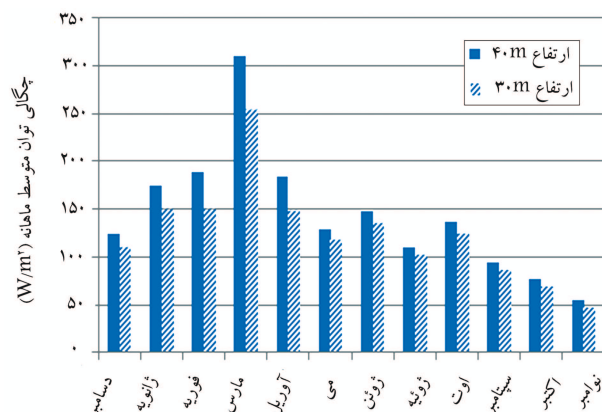
شکل ۲۱. گلباد براساس فراوانی وزش باد در ارتفاع ۳۰ متری در ایستگاه لوتک.



شکل ۱۷. تغییرات متوسط ماهانه‌ی چگالی توان (W/m^2)، ایستگاه خاش.

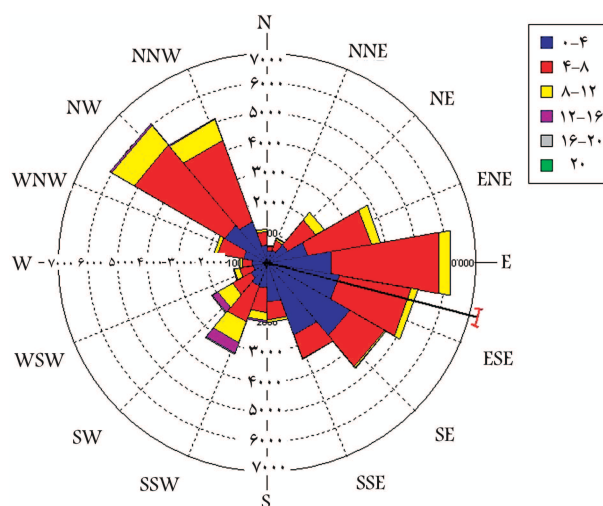


شکل ۱۸. تغییرات متوسط ماهانه‌ی چگالی توان (W/m^2)، ایستگاه لوتک.



شکل ۱۹. تغییرات متوسط ماهانه‌ی چگالی توان (W/m^2)، ایستگاه نصرت‌آباد.

ایستگاه خاش برابر ۸۶ وات بر مترمربع در ارتفاع ۱۰ متری، ۱۱۴ وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متری، و ۱۳۲ وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متری است. همچنین متوسط سالیانه‌ی چگالی توان در ایستگاه نصرت‌آباد برابر ۱۲۵ وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متری، و ۱۴۴ وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متری است. در ایستگاه لوتک متوسط سالیانه‌ی چگالی توان برابر ۱۵۷ وات بر مترمربع در ارتفاع ۱۰ متری، ۳۴۴ وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متری و ۳۸۸ وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متری است.



شکل ۲۲. گلیاد براساس فراوانی وزش باد در ارتفاع ۳۰ متری در ایستگاه نصرت آباد.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق داده های بادی در سه ایستگاه خاش، لوتک و نصرت آباد در استان سیستان و بلوچستان ارزیابی و نتایج آن به شرح زیر ارائه شده 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 $6/67$ است. با توجه به معیارهای ارزیابی، روش گرافیکی در مقایسه با روش جستوس به نتایج بهتری می انجامد.

بیشترین میزان خطای RMSE در لوتک و ارتفاع ۱۰ متری با مقدار $2/15$ درصد رخ داده است.

- در ایستگاه خاش متوسط سالیانه سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری برابر $3/8$ متر بر ثانیه، در ارتفاع ۳۰ متری برابر $4/32$ متر بر ثانیه، و در ارتفاع ۴۰ متری برابر $4/57$ متر بر ثانیه است. در ایستگاه لوتک متوسط سالیانه سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری برابر $4/56$ متر بر ثانیه، در ارتفاع ۳۰ متری برابر $6/28$ متر بر ثانیه، و در ارتفاع ۴۰ متری برابر $6/54$ متر بر ثانیه است. در ایستگاه نصرت آباد متوسط سالیانه سرعت باد در ارتفاع ۳۰ متری برابر $4/82$ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۴۰ متری برابر $5/0$ متر بر ثانیه است.

- متوسط سالیانه چگالی توان در ایستگاه خاش 86 وات بر مترمربع در ارتفاع ۱۰ متری، 114 وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متری، و 132 وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متری است. همچنین متوسط سالیانه چگالی توان در ایستگاه نصرت آباد 125 وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متری و 144 وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متری است. در ایستگاه لوتک متوسط سالیانه چگالی توان 157 وات بر مترمربع در ارتفاع ۱۰ متری، 344 وات بر مترمربع در ارتفاع ۳۰ متری و 388 وات بر مترمربع در ارتفاع ۴۰ متری است.

- در ایستگاه خاش باد غالب در راستای جنوب غربی، در ایستگاه لوتک در راستای شمال و در ایستگاه نصرت آباد در راستای مشرق است.

- طبق نتایج حاصله، ایستگاه لوتک از پتانسیل بالایی برای نصب مزرعه بادی برخوردار است. این در حالی است که خاش و نصرت آباد برای نصب گسترده توربین بادی مناسب نیستند اگرچه برای استفاده محلی از انرژی باد برای به کارگیری سیستم های الکتریکی و مکانیکی بسیار مناسب اند.

پانوشتها

1. wind speed distribution function
2. Weibull
3. Rayleigh
4. shape factor
5. scale factor
6. Gamma function
7. Justus
8. graphical method
9. MATLAB
10. root mean square error (RMSE)
11. swept area
12. wind rose

منابع (References)

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.
5. James, F., Manwell, J.G., McGowan, A. and Rogers, L., *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons, pp. 11 (2009).
6. Togrul, I.T. 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, S.A., Bagiorgas, H.S. and 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. and 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. and etal. "An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran", *Tehran, Energy*, **35**(1), pp. 188-201 (2010).
10. Akdağ, S.A. 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, P.J. and etal. "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. and etal. "Wind energy potential of G¹oeadaçk Island in Turkey", *J Renew Sustain Energy Rev*, **12**(3), pp. 839-851 (2008).
15. Carta, J.A., Ramirez, P. and etal. "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. and etal. "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.suna.org.ir/>
18. Rehman, Sh. and Al-Abbadi, N. "Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia", *Renew Energy*, **32**, pp. 738-749 (2007).