

بررسی پتانسیل انرژی باد حداده در استان سمنان جهت احداث نیروگاه برق بادی

سید مجتبی میرحسینی، احمد صداقت

شدند. در آن زمان، هنوز نمی‌شد از تأسیسات انرژی بادی سخن گفت. توان این توربین‌ها چیزی بین ۱۰ تا ۲۵ کیلو وات بود. اما توربین‌های بادی امروزه، ۲۰۰ برابر راندمان آن روزها را دارند. امروزه توربین‌های بادی دوش به دوش نیروگاه‌های اتمی و حتی بیش از آنها انرژی تولید می‌کنند. به این ترتیب پروژه‌ای که بیست و سه سال پیش به سخره گرفته می‌شد، امروزه به یکی از پر درآمد ترین بخش‌ها در صنعت جهان تبدیل شده است. امروزه انرژی بادی به یک فعالیت اقتصادی بین‌المللی تبدیل شده است و با نرخ سریعیتر از دیگر انواع انرژی رشد می‌نماید. این در حالی است که پیش بینی می‌شود طی 20 سال آینده تقاضای جهانی انرژی با نرخ خیره کننده‌ای افزایش یافته و میزان تقاضا در سال 2030، 50٪ درصد بیش از تقاضای فعلی آن باشد. یکی از دلایل و الزامات توسعه برق بادی، مقابله با تغییرات جهانی آب و هوا است که به شدت جهان را تهدید می‌کند. براساس پیش‌بینی تغییرات آب و هوا (IPCC) درجه حرارت جهان بطور متوسط در طی صد سال آینده، 5.8 درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت که این خود می‌تواند پدیده‌هایی مانند وقوع سیل و خشکسالی و نوسانات شدید آب و هوایی را به همراه داشته باشد. به همین جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به عنوان یک ضرورت جهانی شناخته شده است. در حال حاضر، انرژی باد با رشد متوسط سالانه بیش از 26 درصد از سال 1990 به بعد، بالاترین میزان رشد را در بین منابع مختلف انرژی داشته است [1].

در سال 2008 مصرف انرژی جهان معادل 474 هگزاژول ($4.74 \times 10^{20} J$) بوده که 80 تا 90 درصد انرژی مصرفی جهان از منابع فسیلی حاصل شده است [2]، این در حالیست که پتانسیل انرژی باد به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی حدود 15 برابر مصرف انرژی جهان است [3]. امروزه، استفاده از این منبع انرژی با نرخ رشد فزاینده‌ای در حال افزایش است. بر اساس آمارهای منتشر شده از سوی انجمن انرژی باد اروپا، در سال 2008، حدود 43 درصد از تجهیزات نصب شده جدید جهت تولید انرژی در اروپا مربوط به انرژی باد بوده است [4]. در ایران، به عنوان اولین تمدنی که 900 سال قبل از میلاد از انرژی باد برای پمپ آب و آسیاب کردن دانه‌هایی مثل گندم استفاده کرده است [5]، فعالیت‌هایی

چکیده

بهره برداری از انرژی باد جهت تولید برق با استفاده از توربین‌های بادی، از جمله کاربردهای سبز تولید انرژی و مورد علاقه جامعه کنونی بشر است. همچنین از عمده کاربردهای دیگر انرژی باد، بهره برداری به منظور پمپاژ آب در نواحی مختلف جهت کشاورزی، دامپروری، آبیاری مراتع و جنگل‌ها و به طور کلی هر جا که استفاده از انرژی باد و وجود منابع آب زیرزمینی در عمق مطلوب و باد کافی تضمین شده باشد. این عمل با استفاده از پمپ توربین‌های بادی میسر می‌باشد. مسأله انتخاب جایگاه برای توربین‌های بادی مولد برق به دلیل حجم سرمایه‌گذاری بالا نسبت به پمپ توربین‌های بادی، با دقت بیشتری صورت می‌گیرد. در این مقاله، یک تحلیل آماری روی داده‌های بادی ایستگاه حداده در استان سمنان انجام شده است. ابتدا سرعت باد در ارتفاع 30، 40 و 10 متری در ماههای مختلف مطالعه شده است. این ایستگاه دارای میانگین سرعت به ترتیب 5/857، 5/466 و 4/674 متر بر ثانیه در ارتفاع‌های یاد شده است. همچنین گلباد جهت وزش باد و تغییرات شدت آشفنگی باد بررسی گردیده است. با تخمین پتانسیل انرژی باد توسط تابع توزیع احتمال ویبول برای دوره مورد بررسی، چگالی توان باد بدست آورده شده و با انتخاب چند توربین باد متفاوت در حالت واقعی انرژی که سالانه از این سایت حاصل می‌شود، برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی- انرژی باد، ایستگاه حداده، توربین باد، توزیع ویبول، چگالی توان.

1- مقدمه

بیست و یک سال پیش در ماه اگوست سال ۱۹۸۷، در ساحل دریای شمالی آلمان در ایالت اشلسویگ- هولشتاین ۳۲ توربین بادی با نوازش‌های باد شروع به چرخیدن کردند. به این ترتیب نخستین مجتمع توربین‌های بادی تولید کننده‌ی انرژی وارد شبکه

سید مجتبی میرحسینی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

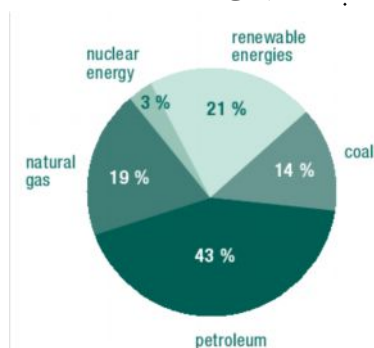
Email: m.mirhosseini@me.iut.ac.ir

دکتر احمد صداقت، استاد یار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

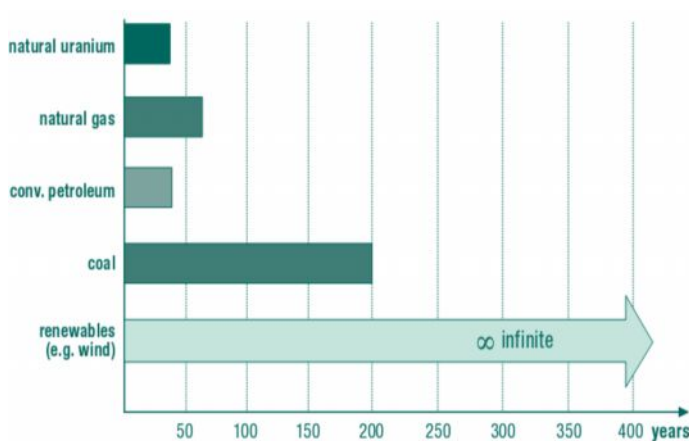
Email: sedaghat@cc.iut.ac.ir

نقشه صفر اطلس بادی کشور بیان نمودند. آنها با یک مطالعه نرم افزاری توسط ECOWIND و با استفاده از داده‌های آماری باد، منحنی عملکرد توربین باد و پارامترهای اقتصادی تخمین مناسبی برای قیمت تمام شده برق پیدا کردند که بررسی‌های آنها حاکی از اقتصادی بودن برق تولیدی در نیروگاه بادی منجیل و بینالود است. همچنین پتانسیل انرژی باد در منطقه منجیل توسط مصطفایی پور و ابرقوئی [11] بررسی شد که این منطقه به عنوان یکی از مناطق بادخیز جهان معرفی شده است. اخیراً یک مطالعه امکان سنجی نصب توربین باد توسط مصطفایی پور [12] برای چند شهر استان یزد انجام شده است. وی بر اساس داده‌های آماری 13 ساله از 11 ایستگاه پتانسیل انرژی باد از نظر سرعت و جهت را مورد بررسی قرار داده است. کیهانی و همکاران [13]، یک برآورد آماری از توابع توزیع سرعت و جهت باد براساس داده‌های 11 ساله باد در تهران، انجام دادند که مطالعه آنها نشان داد که سایت مورد بررسی برای تولید توان در مقیاس بزرگ مناسب نیست.

در این مقاله، پتانسیل انرژی باد در ایستگاه حداده [6] دامغان در استان سمنان، در 12 ماه متوالی مورد بررسی قرار گرفته است. پتانسیل انرژی باد در این ایستگاه با استفاده از تابع توزیع احتمال ویبول برآورد شده است. همچنین پتانسیل تولید توان، توسط شش توربین باد که نمودارهای عملکرد آنها در سرعت‌های مختلف موجود است محاسبه شده است.



شکل 1 - مصرف انرژی در دنیا [14]



شکل 2- عمر ذخایر انرژی فسیلی در مقایسه با انرژی های تجدید پذیر [14]

در راستای تولید توان از منابع بادی در حال انجام است. در حال حاضر نیز نیروگاه بادی منجیل با ظرفیت 70 مگاوات و نیروگاه بادی سیاهپوش قزوین با ظرفیت 100 مگاوات و نیروگاه بادی بینالود با ظرفیت 28 مگاوات برق تولید می‌کند [6]. طبق گزارش سازمان جهانی انرژی باد [7]، ایران با 23/3٪ رشد، در رده سی و پنجم تولید برق بادی جهان در سال 2008 قرار داشته است. آمریکا، آلمان، اسپانیا، چین و هند و دانمارک با تولید 20 هزار تا 10 هزار مگاوات در رده‌های نخست قرار دارند. کشورهای دیگری نظیر ایتالیا، انگلستان، هلند، ژاپن و پرتغال نیز ظرفیت نصب شده بادی خوبی دارند. در زمینه بررسی منابع انرژی باد در ایران جهت تولید برق کارهای متعددی تاکنون انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تهیه اطلس باد کشور توسط سازمان انرژی‌های نو اشاره کرد [6]. با توجه به این که جریان های هوا به طور پیوسته تحت تأثیر جریان های مناطق مجاور خود قرار می گیرند، پیش بینی جریان های هوا برای یک دوره بلندمدت با مشکل همراه می باشد. از آنجایی که هوا، دارای ویسکوزیته پائینی می باشد و تحت تأثیر توپوگرافی و ناهمواری های زمین، جریان هوا به شدت آشفته شده و دارای تغییرات کوتاه مدت می باشد، به منظور پیش بینی این تغییرات، مدل های مختلف استفاده می گردد. این مدل ها عمدتاً بر پایه حل عددی معادلات حاکم و تصحیح نتایج حاصل از اندازه گیری ها، می باشند. در پروژه تهیه اطلس باد از نرم افزار آلمان توسعه داده شده به منظور مدلسازی میدان باد در کشور مورد استفاده قرار گرفت. پروژه های مختلف دیگری نیز در زمینه تهیه اطلس باد انجام گرفته شده است که به طور مثال، پروژه اطلس باد در ارمنستان می باشد که با استفاده از مدل های MASS و TrueWind به منظور شبیه سازی میدان باد در این کشور به کارگرفته شده است و در پایان هفت منطقه که دارای پتانسیل خوب در این کشور می باشد تعیین شده است [6]. همچنین تحقیقات دیگری نیز با عنوان بررسی پتانسیل باد سیاهپوش در استان قزوین جهت احداث نیروگاه برق بادی توسط مرکز توسعه انرژی های نو، سازمان انرژی اتمی ایران انجام شد. در این مقاله پتانسیل سنجی باد منطقه سیاهپوش با استفاده از توزیع ویبول و نرم افزارهای معتبر و شناخته شده در جهان Windpro و WASP انجام شد.

رحیم زاده و جهانگیری [8]، با استفاده از روش‌های آماری و اطلاعات هواشناسی سرعت و چگالی انرژی باد را در چند ایستگاه هواشناسی کشور بررسی نمودند. گندمکار و همکاران [9]، تغییرات سالانه و روزانه سرعت باد در منطقه سیستان را جهت تولید برق بادی مورد مطالعه قرار دادند. عامری و همکاران [10]، پیشرفت‌های اخیر در توسعه انرژی باد در کشور را با اشاره‌ای به تهیه

سمت جنوب غربی است. باد معروف این منطقه باد دامغان یا باد شمال است که در بهار از شمال به شرق و در تابستان از شمال به جنوب می وزد.

شهرستان دامغان از نظر وزش باد بهترین موقعیت را در این استان دارا می باشد. دامغان با وسعت 12110.312 کیلومتر مربع از طرف شمال به خط الراس و به کوههای البرز، از شرق به شهرستان شاهرود، از جنوب به دشت کویر مرکزی ایران و از غرب به شهرستان سمنان منتهی می شود. دامغان در طول جغرافیایی بین 53 درجه و 15 دقیقه و 55 درجه و 20 دقیقه و عرض جغرافیایی بین 34 درجه و 45 دقیقه و 36 درجه و 58 دقیقه قرار دارد. ارتفاع شهر از سطح دریا حدود 1170 متر می باشد [15].

سایت مورد مطالعه در روستای حداده شهرستان دامغان واقع است. روستای حداده در 36 کیلومتری شرقی شهر دامغان و 21 کیلومتری غربی شهر شاهرود و در جنوب رشته کوه البرز واقع است و روستاهای همجوار آن در ضلع غربی روستاهای کلاته ملا و مومن آباد و عبدا... آباد و در ضلع شرقی آن روستاهای قلعه حاجی و مراد آباد و راهنجان و دهملا و در ضلع شمالی آن جاده تهران مشهد و ضلع جنوبی آن خط راه آهن و کویر مرکزی ایران می باشد [16].

اطلاعات سرعت و جهت باد از تاریخ 2007/1/1 تا 2007/10/11 (1385/10/11) تا 2007/12/31 (1386/10/10)، در فواصل زمانی 10 دقیقه برای هر داده برداری، استفاده شده است. یک دکل هواشناسی به ارتفاع 40 متر توسط سازمان انرژی های نو ایران، وزارت نیرو، در یک مختصات مناسب در حداده نصب شده است. دیتالاگر استفاده شده دارای سه عدد سنسور سرعت در ارتفاع 10 و 30 و 40 و دو سنسور جهت در ارتفاع 30 و 37.5 متر می باشد.

3- تحلیل آماری داده های بادی

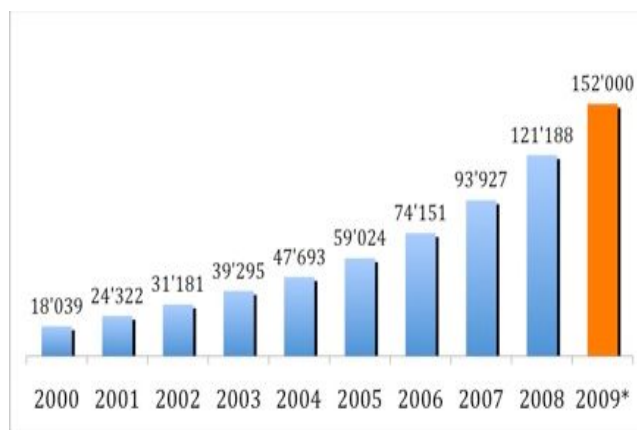
3-1 توزیع ویبول (Weibull distribution)

برای تعیین پتانسیل انرژی باد در یک سایت مورد نظر و تخمین انرژی خروجی از این سایت از روش های آماری استفاده می شود. اگر سری زمانی داده های اندازه گیری شده در یک ارتفاع خاص موجود باشد می توان تابع توزیع چگالی احتمال سرعت را بصورت زیر نوشت [5]:

$$p(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} p(U) dU \quad (1)$$

که در آن U نمایانگر سرعت و $\int_0^{\infty} p(U) dU = 1$

یکی از این توابع، که صحت آن با اندازه گیری در نقاط مختلف



شکل 3 - پتانسیل انرژی باد در دنیا [7]

2- ایستگاه مورد مطالعه

استان سمنان با مساحتی در حدود 95815 کیلومتر مربع حدود 5,6% از مساحت کشور را به خود اختصاص داده است و از این حیث ششمین استان کشور بوده و بین 34 درجه و 40 دقیقه تا 37 درجه و 10 دقیقه عرض شمالی و 51 درجه و 59 دقیقه تا 57 درجه و 4 دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. استان سمنان دارای 5 شهرستان به نام های دامغان، سمنان، شاهرود، گرمسار و مهدی شهر می باشد. این استان از جانب شمال به استان های خراسان شمالی، گلستان و مازندران، از جنوب به استان های یزد و اصفهان، از مشرق به استان خراسان رضوی و از مغرب به استان های تهران و قم محدود است. مرکز استان شهرستان سمنان است که تا تهران 228 کیلومتر فاصله دارد. این استان در دامنه های جنوبی سلسله جبال البرز واقع شده و ارتفاعات به گونه ای است که به تدریج از شمال به سمت جنوب از میزان ارتفاع کاسته شده و به دشت کویر منتهی می گردد. به دلیل مجاورت با کویر و کوهستان همیشه با مراکز مختلف فشار یعنی فرابار و فروبار در مناطق استان روبرو هستیم که در نهایت موجب پیدایش بادهای محلی و بادهای غالب غربی و کویری می گردد. به طور کلی بادهای غالب منطقه سمنان، از سمت شمال غرب به جنوب شرق می وزد که اصطلاحاً به تورانه معروف می باشد. از دیگر بادهای منطقه بادهای شهریاری، کویر و باد خراسان است که به ترتیب از سمت غرب، سمت جنوب و از سمت شرق به غرب در فصل های مختلف سال می وزد. در منطقه گرمسار بادهای غالب از شمال غرب به جنوب شرق در جریان است و بادهای شهریاری از سمت غرب به جنوب غربی، باد سمنان از شرق به شمال شرقی و باد کویر از جنوب به شمال در فصول گرم سال در جریان است. در منطقه شاهرود نیز جهت باد های غالب، از شمال شرقی به

کل در دسترس باد به توانی که از مکعب کردن سرعت متوسط حاصل می‌شود، است.

برای تخمین توان کلی که از نصب یک توربین باد می‌توان در یک سایت بدست آورد، \bar{P}_w ، با داشتن تابع توزیع چگالی احتمال سرعت باد، $p(U)$ ، و نمودار توان توربین، $P_w(U)$ ، داریم:

(9)

$$\bar{P}_w = \int_0^{\infty} P_w(U) p(U) dU$$

انتگرال فوق با استفاده از روش‌های عددی قابل محاسبه است. از روش ذوزنقه در حل انتگرال فوق داریم [17]:

(10)

$$\bar{P}_w = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{2} (U_{i+1} - U_i) (p(U_{i+1}) P_w(U_{i+1}) + p(U_i) P_w(U_i))$$

3-3 شدت آشفتگی (Turbulence Intensity)

آشفتگی در باد به دلیل هدر رفتن انرژی جنبشی باد و تبدیل آن به انرژی گرمایی بر اثر تشکیل و نابودی گردابه‌های کوچک، رخ می‌دهد. آشفتگی باد ممکن است در زمان طولانی ثابت باشد اما در بازه‌های زمانی کوچک بسیار متغیر است. معمولاً آشفتگی جریان بدلیل زبری سطح (درختان، ساختمانها و ...) و ارتفاع بالای سطح بوجود می‌آید [17]. وجود آشفتگی در جریان باد نه تنها از توان آن می‌کاهد، بلکه باعث ایجاد پدیده خستگی در توربین باد می‌شود [17]. یکی از معیارهای اندازه‌گیری آشفتگی، شدت آشفتگی است که بصورت انحراف معیار استاندارد سرعت باد به سرعت متوسط تعریف می‌شود:

(11)

$$TI = \frac{\sigma_U}{U}$$

که در رابطه (9)، انحراف معیار استاندارد و سرعت متوسط روی یک بازه زمانی معمولاً 10 دقیقه محاسبه می‌شود [4].

4- نتایج

تعداد داده‌های سرعت باد 52559 مورد با فاصله زمانی 10 دقیقه است که تحلیل روی آن انجام شده است. متوسط دمای ایستگاه $17.38^\circ C$ و متوسط رطوبت نسبی آن 45.55% بوده است. اندازه‌گیری‌ها در ارتفاع‌های 30، 40 و 10 متری انجام شده است. در جدول (1) پارامترهای مربوط به سرعت و توان باد که از تحلیل آماری در سه ارتفاع یاد شده بدست آمده آورده شده است.

جهان ثابت شده است، تابع توزیع چگالی احتمال ویبول است که نیازمند دو پارامتر k (ضریب شکل) و c (ضریب مقیاس) است:

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

همچنین تابع توزیع انباشتگی (cumulative distribution function) که برای تخمین زمانی که سرعت باد در یک بازه خاص قرار می‌گیرد به صورت زیر است [5]:

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

ما برای تعیین k و c از روابط تحلیلی یا نیمه تجربی جاستاس (Justus, 1978) استفاده نمودیم [5 و 18]:

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^{-1.086}, \quad \frac{c}{U} = \frac{k^{2.6674}}{0.184 + 0.816k^{2.73855}} \quad (4)$$

که در آن σ_U ، انحراف معیار استاندارد و \bar{U} ، سرعت متوسط داده‌ها است.

همچنین می‌توان از فرمول‌های زیر، پس از به دست آوردن k از معادله 4 استفاده نمود [5]:

$$\frac{c}{U} = \frac{1}{\Gamma(1+1/k)} \quad (5)$$

که البته این فرمول نیاز به استفاده از تابع گاما دارد.

فرمول نیمه تجربی لایسن (Lysen, 1983) نیز به صورت زیر می‌باشد [5]:

$$\frac{c}{U} = (0.568 + 0.433/k)^{1/k} \quad (6)$$

2-3 چگالی توان

چگالی توان باد (توان باد بر واحد سطح) به دانسیته هوا (در شرایط استاندارد سطح دریا $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$) و توان سوم سرعت باد بستگی دارد. توان باد علاوه بر این به مساحت جاروب شده توسط روتور توربین باد (قطر روتور) وابسته است. چگالی توان متوسط به صورت زیر تعریف می‌شود:

(7)

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_c^\infty U^3 p(U) dU$$

همچنین چگالی انرژی باد در یک بازه زمانی داده شده عبارتست از:

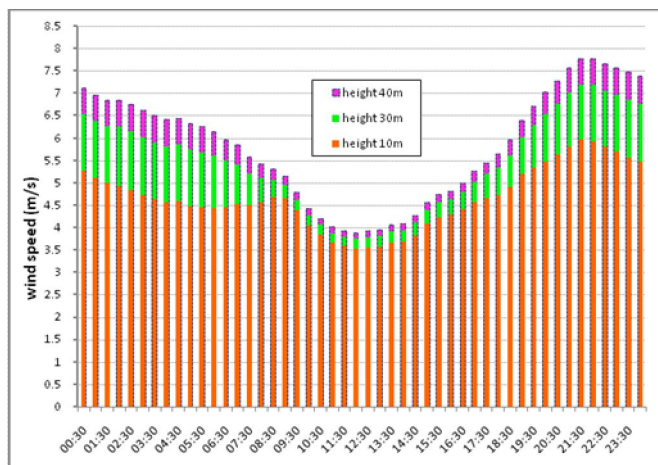
(8)

$$\frac{\bar{E}}{A} = \left(\frac{\bar{P}}{A}\right) (N\Delta t)$$

نسبت $K_e = \frac{\bar{U}^3}{(\bar{U})^3} = \frac{\Gamma(1+3/k)}{\Gamma^3(1+1/k)}$ بعنوان ضریب

شکل انرژی تعریف شده که برابر توان

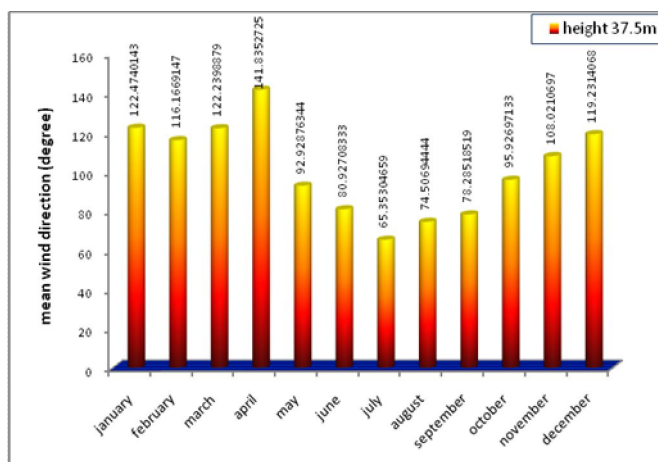
همانطور که از شکل (4) پیداست، سرعت ماهیانه در ارتفاع 40 متر بین 3.361m/s و 9.016m/s و در ارتفاع 30 متر بین 3.09m/s و 8.49m/s و در ارتفاع 10 متر بین 2.44m/s و 7.6m/s تغییر می‌کند. بیشترین سرعت مربوط به ماه جولای 2007 (تیر) و کمترین سرعت در ماه ژانویه 2007 (دی) اتفاق می‌افتد. سرعت متوسط در اغلب ماه‌ها از سرعت راه اندازی اکثر توربین‌های موجود بالاتر است و در طول سال توربین‌ها در حال چرخش و تولید خواهند بود که ویژگی مطلوبی برای یک مزرعه بادی می‌باشد.



شکل 5- متوسط سرعت باد در ساعات مختلف روز در سال 2007

در شکل فوق میانگین گیری یکساله از سرعت باد هر نیم ساعت یک بار انجام گرفته است. بدین ترتیب از نمودار فوق می‌توان ساعاتی از روز که در کل سال و به طور میانگین وزش باد خوبی دارد را مشاهده نمود.

در شکل (6) نیز جهت غالب باد ماهیانه در دو ارتفاع 30 و 37.5 متر نشان داده شده است. محدودیت وزش باد در یک جهت، مزیت عمده ای برای نیروگاه می‌باشد.



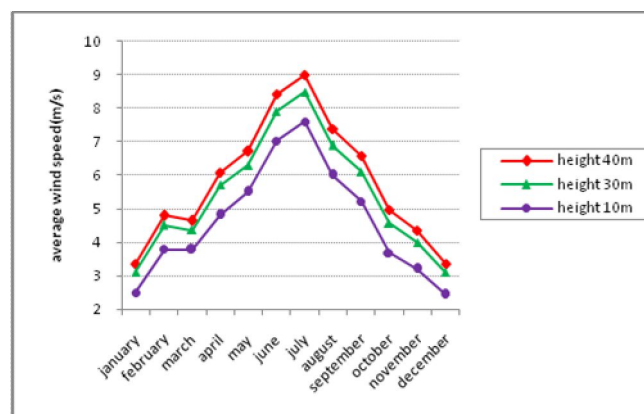
شکل 6-1- جهت باد متوسط ماهیانه در ارتفاع 37.5 متر

*****	40 m	30 m	10 m
Mean wind speed (m/s)	5.857	5.466	4.674
Standard deviation	3.82	3.54	3.12
Max.10min Average Wind Speed	19.1	18.1	16.6
Gust wind speed	24 /4/11 2007	23.9 2007/4/11 22:00	22.8 2007/5/16 17:30
	2007/4/30 22:00	2007/4/30 22:00	2007/8/4 21:30
	2007/6/23 13:50		
Weibull Distribution constants	k=1.567 c=6.5224	k=1.575 c=6.0897	k=1.524 c=5.1897
Energy pattern factor	2.1615	2.17	2.3364

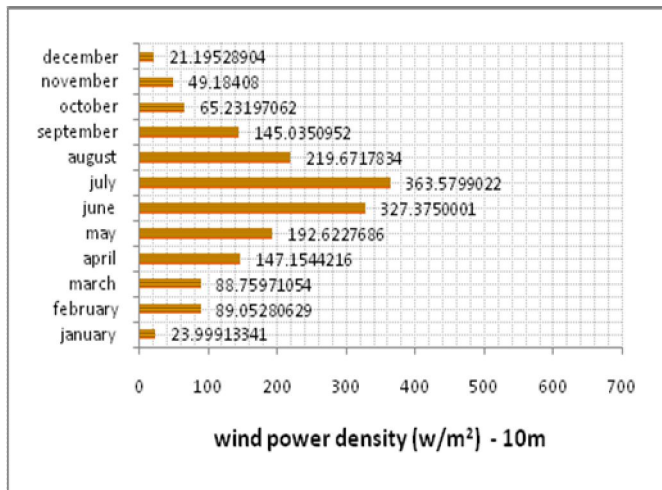
جدول 1- محاسبه پارامترهای مربوط به سرعت و توان باد

پتانسیل انرژی باد نصب توربین بادی در سرعت متوسط کمتر از 4.5m/s ضعیف، $4.5-5.4\text{m/s}$ مرزی، $5.4-6.7\text{m/s}$ خوب تا خیلی خوب و برای سرعت‌های بالاتر از 6.7m/s عالی ارزیابی می‌شود [12]. در سایت مورد مطالعه در ارتفاع 40 و 30 متر پتانسیل خوبی برای نصب توربین باد وجود دارد و در ارتفاع 10 متری برای نصب توربین ضعیف است. در ردیف چهارم جدول سرعت تندباد (Gust wind speed) آورده شده است که برابر بیشترین سرعتی است که در بازه زمانی داده شده ثبت شده است.

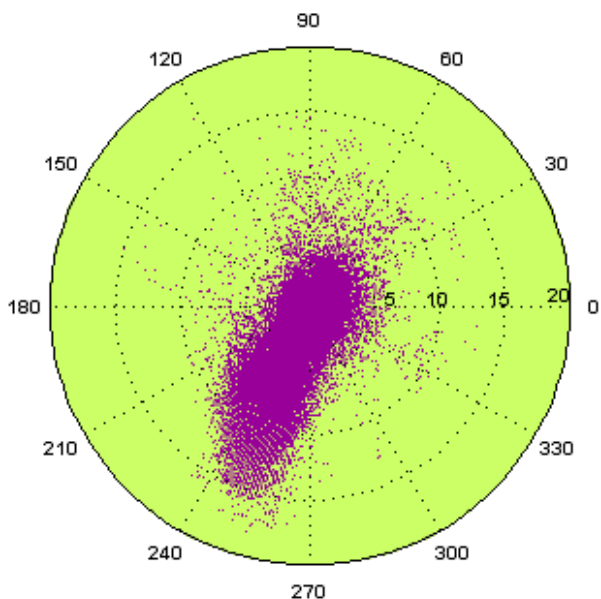
در شکل (4) توزیع سرعت متوسط ماهیانه باد از 1 ژانویه 2007 تا 31 دسامبر 2007 در سه ارتفاع مختلف نشان داده شده است.



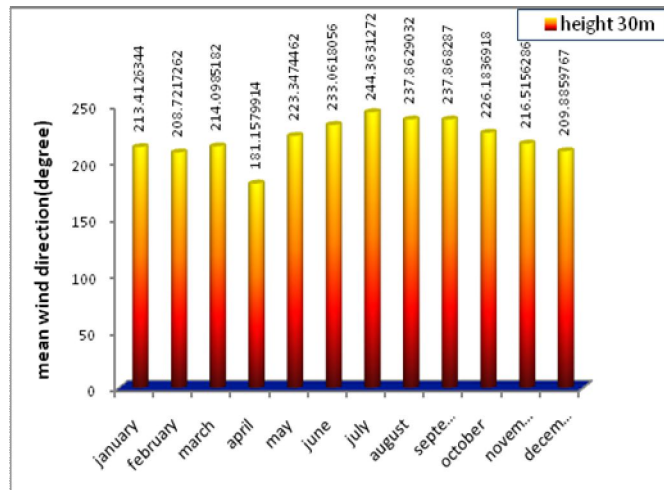
شکل 4- توزیع ماهیانه سرعت متوسط



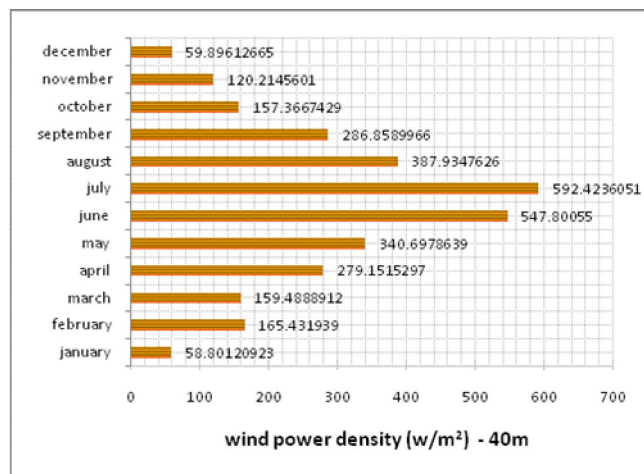
شکل 7-3- چگالی توان باد ماهیانه در ارتفاع 10 متر
 بیشترین چگالی توان ماهیانه در هر یک از نمودارهای چگالی
 توان، مربوط به ماه‌های آوریل تا سپتامبر است.
 گلباد (windrose) نموداری است که توزیع جهت باد را نشان
 می‌دهد. در گلباد شکل (8)، توزیع اندازه سرعت باد در جهات
 مختلف در ارتفاع 30 متری نشان داده شده است. شعاع گلباد
 مذکور نمایانگر سرعت می‌باشد. همانطور که به وضوح مشاهده می
 شود تراکم باد در زاویه حدوداً 240 درجه به چشم می‌خورد.



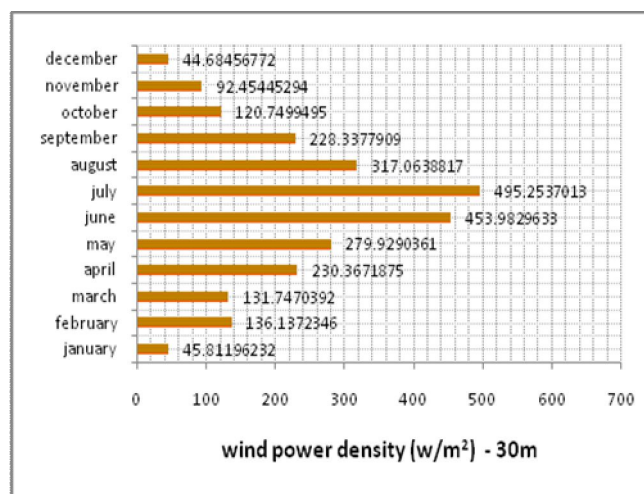
شکل 8- گلباد در ارتفاع 30 متری
 در نمودار گلباد بعدی، شکل (9)، فراوانی وزش باد در زوایای
 مختلف در ارتفاع 30 متری نشان داده شده است. همانطور که از
 این شکل پیداست، جهت بیشترین فرکانس وزش باد را می‌توان
 مشاهده نمود.



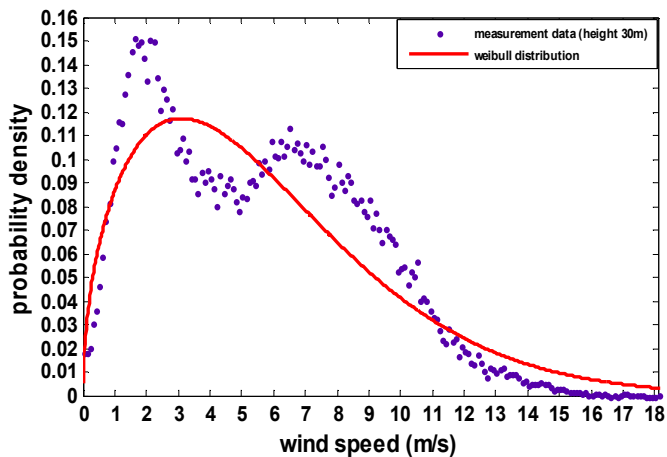
شکل 6-2- جهت باد متوسط ماهیانه در ارتفاع 30 متر
 با توجه به نمودارهای فوق، متوسط جهت باد در سال 2007
 در ارتفاع 37.5 متر، برابر 98.23 درجه و در ارتفاع 30 متر،
 223.17 درجه می‌باشد.
 شکل (7) چگالی توان باد ماهیانه در ارتفاع 40 و 30 و 10 متری
 را نشان می‌دهد.



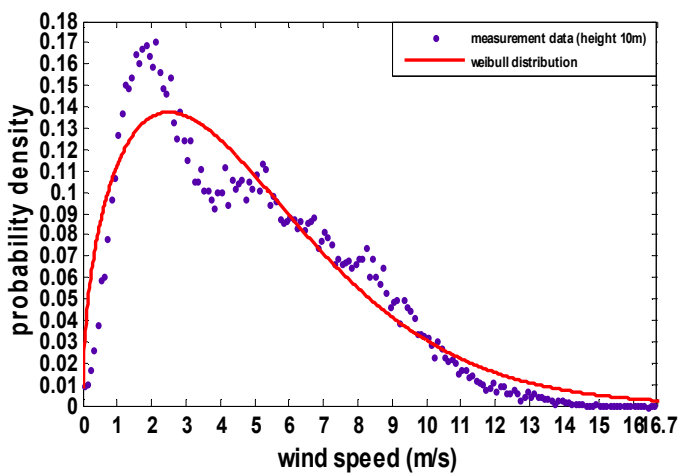
شکل 7-1- چگالی توان باد ماهیانه در ارتفاع 40 متر



شکل 7-2- چگالی توان باد ماهیانه در ارتفاع 30 متر

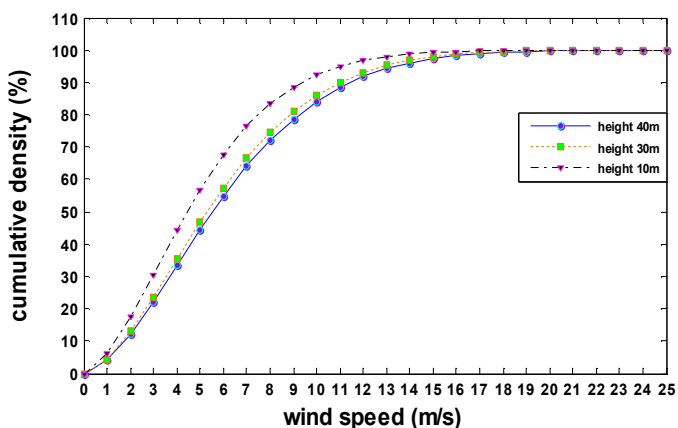


شکل 11- فرکانس نرمالیزه و توزیع ویبول (ارتفاع 30 متر)

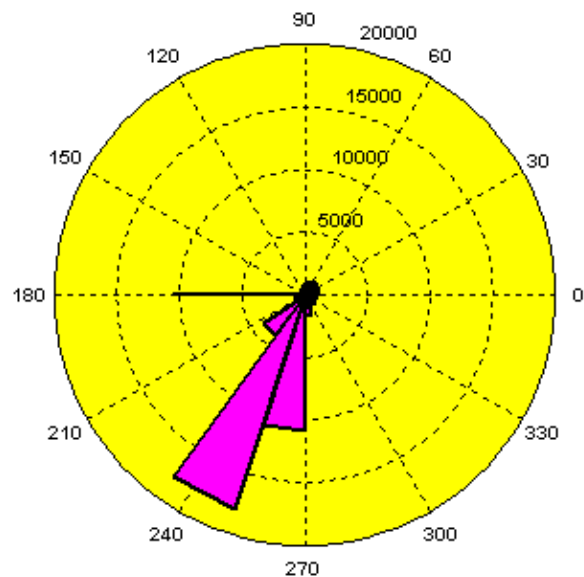


شکل 12- فرکانس نرمالیزه و توزیع ویبول (ارتفاع 10 متر)

در شکل (13) تابع توزیع انباشتی سرعت آورده شده است. این تابع کسر زمانی را نشان می‌دهد که سرعت باد کوچکتر یا مساوی یک سرعت داده شده است. این تابع برای سه ارتفاع رسم شده است.

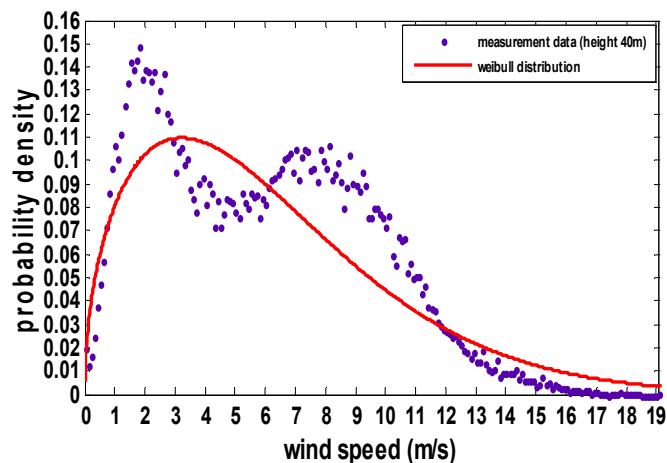


شکل 13- تابع توزیع انباشتی سرعت در ارتفاعهای مورد نظر

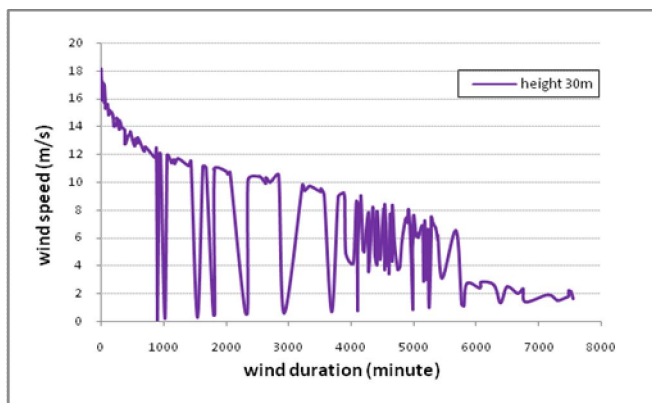


شکل 9- گلباد براساس فرکانس وزش باد در 30 متری

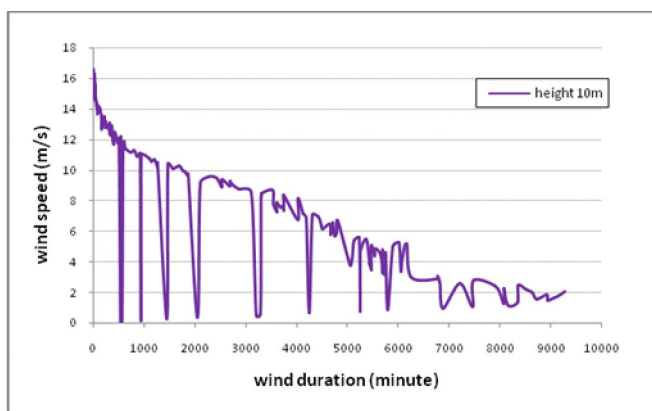
در شکل (10)، (11) و (12) توزیع ویبول سرعت در ایستگاه داده شده در سه ارتفاع نشان داده شده است. منحنی ویبول بهترین نمودار برای بررسی رفتار فرکانسی باد است. ضرایب شکل و مقیاس توزیع ویبول در جدول (1) آورده شده است. همانطور که از منحنی های ویبول پیداست گستردگی منحنی به سمت سرعت های بالاست و این امر نشانگر آن است که انرژی تولیدی سایت مطلوب خواهد بود و منطقه ویژگی یک سایت مطلوب را داراست.



شکل 10- فرکانس نرمالیزه و توزیع ویبول (ارتفاع 40 متر)

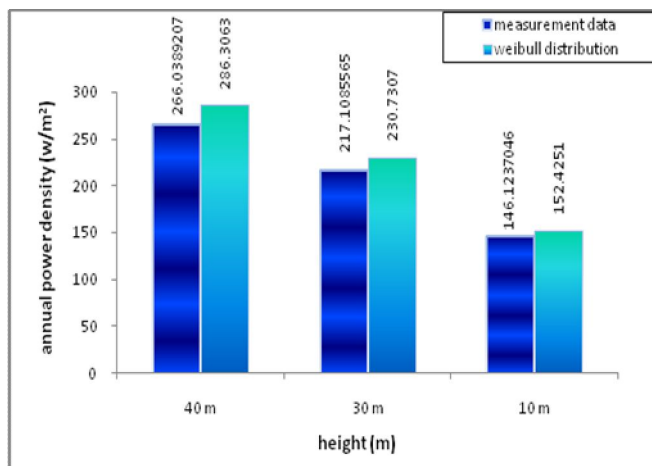


شکل 15-2- ماندگاری باد در سرعت های وزش در ارتفاع 30 متری



شکل 15-3- ماندگاری باد در سرعت های وزش در ارتفاع 10 متری

چگالی توان سالانه باد، در شکل (16) نشان داده شده است.

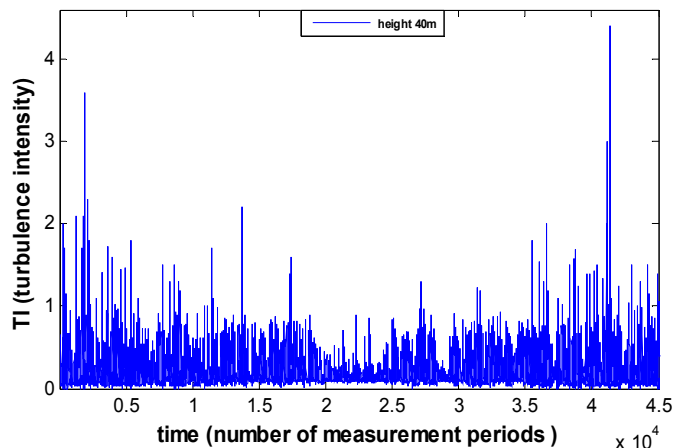


شکل 16- چگالی توان سالانه باد

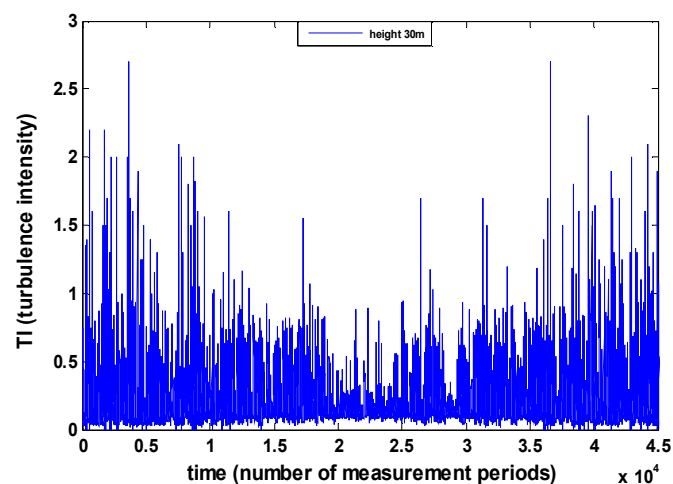
همانطور که از این نمودار پیداست، چگالی توان باد که از داده های اندازه گیری بدست آمده با چگالی توانی که از توزیع ویبول بدست آمده مقایسه شده است.

در شکل (17) چگالی انرژی تولیدی توسط باد، بطور سالانه بر واحد سطح، برای سه ارتفاع رسم شده است. انرژی بدست آمده از توزیع ویبول اندکی از مقدار اندازه گیری شده بیشتر است.

شدت آشفتگی برحسب زمان در شکل (14) نشان داده شده است. متوسط شدت آشفتگی، همانطور که از شکل هم پیداست، در ارتفاع 40 متری حدود 0.174 است که بیشترین مقدار آن تا 4.4 هم می رسد. همچنین برای ارتفاع 30 متری نیز مقدار متوسط آن حدود 0.182 و بیشترین مقدار آن 2.7 است.

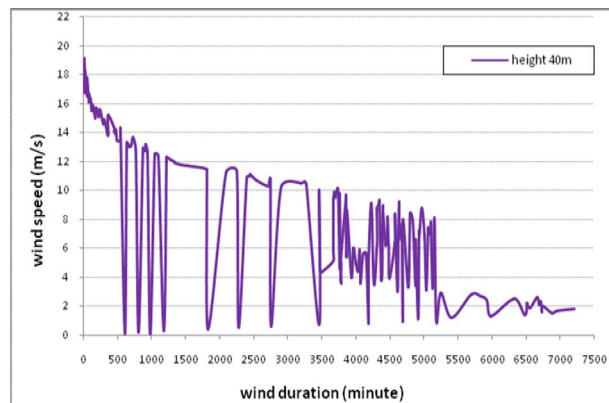


شکل 14-1- شدت آشفتگی در ارتفاع 40 متری



شکل 14-2- شدت آشفتگی در ارتفاع 30 متری

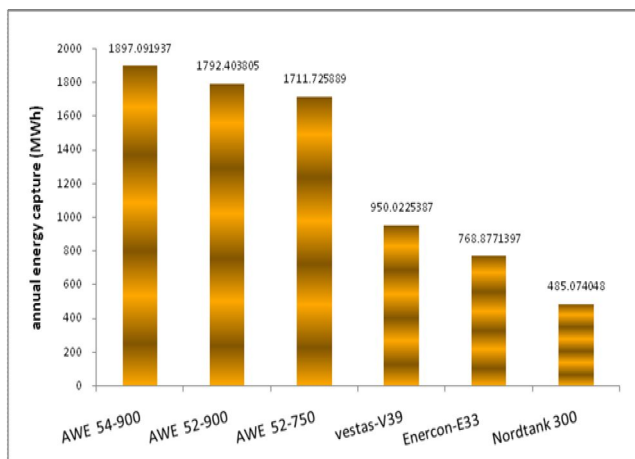
نمودار شکل (15) نمودار ماندگاری باد است. این نمودار تعداد دقایقی که باد در سال 2007 با هر سرعتی می وزد را به ما نشان می دهد.



شکل 15-1- ماندگاری باد در سرعت های وزش در ارتفاع 40 متری

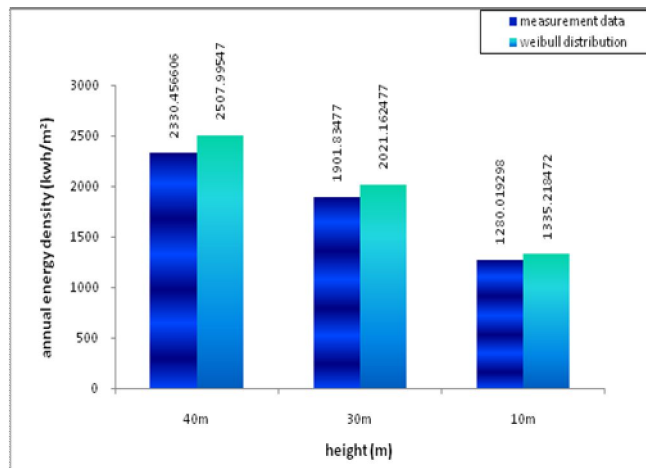
- 4- AWE52-900kw: tower(40m), Rotor diameter (52m), control: pitch
- 5- AWE54-900kw: tower(40m), Rotor diameter (54m), control: pitch
- 6- Nordtank300kW: tower (31m), Rotor diameter (31m), control: stall

از منحنی عملکرد پنج توربین اول در ارتفاع 40 متری و از توربین ششم در ارتفاع 30 متری استفاده شده است. شکل (12) انرژی سالیانه تولید شده توسط این شش توربین باد در ایستگاه حداده را نشان می‌دهد.



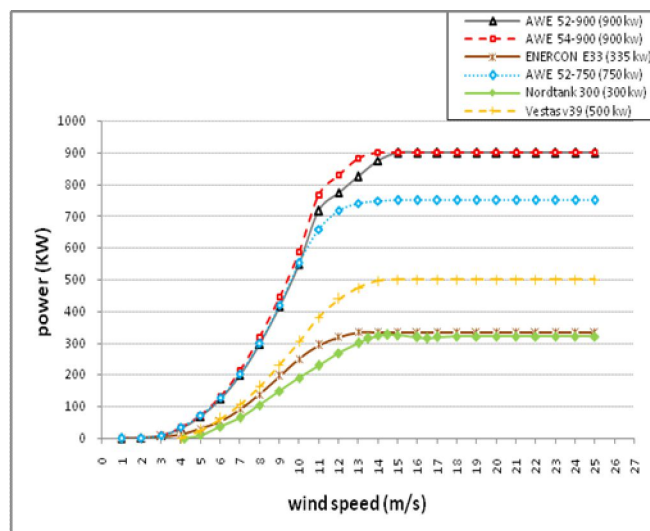
شکل 19- انرژی سالیانه تولید شده توسط توربین‌های باد

همانگونه که از شکل (19) پیداست انرژی تولید شده توسط یک توربین تا حدود 2000MWh هم می‌رسد که رقم قابل توجهی است. با احداث یک مزرعه توربین باد می‌توان برق بیشتری از انرژی باد این منطقه تولید کرد. تعداد توربین‌های بادی که یک مجتمع نیروگاهی را تشکیل می‌دهند، در عمل متفاوت است و در استحصال جریان برق از توربین‌های بادی، مسائل متعدد از جمله کیفیت برق علاوه بر کمیت آن نیز برای مهندسی برق که با این موضوعات سر و کار دارند اهمیت دارد. برق تولیدی می‌بایست با کیفیت قابل قبول وارد شبکه شود و در دراز مدت بازدهی خوبی داشته باشد. از دیگر مسائل، فاصله بهینه بین توربین‌های نصب شده و نحوه آرایش آنها می‌باشد تا از زمین و باد موجود منطقه حداکثر استفاده شده و در حوالی نیروگاه آلودگی صوتی ایجاد نشود. بنابراین پارامترهایی از جمله محدودیت مکانی و ظرفیت درخواست الکتریسته و از طرف دیگر برآوردهای اقتصادی می‌تواند در انتخاب توربین مورد نظر و تعداد توربین‌هایی که باید در مزرعه بکار برد مفید واقع شود. چنانچه از نظر زمین موجود و در دسترس محدودیتی وجود داشته باشد، بهتر است از توربین‌هایی با ظرفیت بالا استفاده نموده و فواصل آنها را به حد محاسبه شده و معقولی از یکدیگر انتخاب نماییم. در ضمن براساس یک قاعده تجربی فاصله میان توربین‌های بادی در مزارع باد در صورتی که در جهت باد



شکل (17)- چگالی انرژی سالانه باد

با داشتن تابع توزیع ویبول برای یک سایت بادی و داشتن منحنی توان برای یک توربین باد، توان متوسط توربین باد را می‌توان حساب کرد. منحنی عملکرد 6 توربین باد Enercon E33(330kw), VestasV39-500kw, Nordtank 300kw, AWE 52-900kw, AWE 54-900kw بر حسب سرعت باد، [19, 20, 21, 22, 24] در شکل (18) آورده شده است. این 6 توربین بادی با توجه به ارتفاع برجی که روی آن نصب می‌شوند، انتخاب شده‌اند. در واقع توربین‌هایی را انتخاب نمودیم که محاسبات آماری ما در منطقه حداده در آن ارتفاع بوده است.



شکل 18- منحنی عملکرد توربین باد [19, 20, 21, 22, 23, 24]

مشخصات این 6 توربین باد، که توسط چهار شرکت سازنده مختلف ارائه شده‌اند، به ترتیب عبارتند از:

- 1- Enercon E33-330kW: tower (37m-50m), Rotor diameter (33.4m), control: pitch
- 2- Vestas V39-500 kW: tower(40.5m), Rotor diameter (39m), control: pitch
- 3- AWE52-750kw: tower(40m), Rotor diameter (52m), control: pitch

[8] فاطمه رحیم زاده و زهره جهانگیری، "مکان یابی مناسب برای استفاده از انرژی باد در کشور"، سومین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران، سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، 1382

[9] امیر گندمکار، محمد رضا کاویانی و سید ابوالفضل مسعودیان، "بررسی انرژی باد در منطقه سیستان به منظور تولید برق بادی"، مجله پژوهشی دانشگاه اصفهان (علوم انسانی)، جلد 27، شماره 6، صص 104-95، 1382

[10] Mohammad Ameri, Mehdi Ghadiri and Mehdi Hosseini, "Recent Advances in the Implementation of Wind Energy in Iran", *The 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)*, Bangkok, Thailand, November 2006.

[11] Ali Mostafaiepour and Hossein Abarghoeei, "Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 6, pp. 1758-1766, 2008.

[12] Ali Mostafaiepour, "Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp.93-111, 2010.

[13] A. Keyhani, M. Ghasemi-Varnamkhasia, M. Khanalia, and R. Abbaszadeh, "An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran", *Energy*, Vol. 35, No.1, pp. 188-201, 2010

[14] <http://www.renewable-energy-sources.com>

[15] اداره کل هواشناسی استان سمنان <http://www.semnanmet.ir>

[16] www.roostanews.ir

[17] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins and Ervin Bossanyi, *WIND ENERGY HANDBOOK*, John Wiley & Sons, 2001.

[18] Anastasios Balouktsis, Dimitrios Chassapis and Thodoris D. Karapantsios, "A nomogram method for estimating the energy produced by wind turbine generators", *Solar Energy*, Vol. 72, No.3, pp. 251-259, 2002.

[19] The Virtual Websites for Wind Power Technology Worldwide, www.windturbinewarehouse.com/

[20] Windturbines Reference Pages, <http://www.windturbines.ca/>

[21] ENERCON Windblatt, <http://www.enercon.de/>

[22] <http://www.worldwidewindturbines.com/en/>

[23] Americas Wind Energy (AWE), <http://www.awewind.com/>

[24] Wind energy market, <http://www.wind-energy-market.com/en/>

غالب باشند، بین 5 الی 9 برابر قطر روتور و اگر عمود بر جهت باد غالب باشند، بین 3 الی 5 برابر قطر روتور است.

5- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، تحلیل آماری پتانسیل انرژی باد با رسم توابع توزیع ویبول برای سرعت ها در ارتفاع 10، 30 و 40 متری در ایستگاه حداده انجام شد. رژیم جریان باد منطقه از نظر اندازه سرعت و جهت مطلوب است. چگالی توان متوسط باد منطقه در ارتفاع 30 متر حدود 230 وات بر مترمربع و در ارتفاع 40 متر حدود 286 وات بر متر مربع به دست آمد. این مقدار تعیین کننده وضعیت سایت از نظر مناسب بودن برای احداث نیروگاه برق بادی خواهد بود. برای رسیدن به این هدف از جدول کلاس بندی سایت های بادی که توسط دپارتمان انرژی آمریکا (U.S. Department of Energy) منتشر شده، استفاده شده است. اما به علت اینکه در این کلاس بندی ارتفاع 40 متر منظور نشده، با توجه به داده های ارتفاع 30 متر مشاهده می گردد که سایت حداده در بالاترین حد از کلاس 2 قرار می گیرد و نتیجه اینکه این سایت دارای پتانسیل بادی خوبی برای تولید برق و احداث نیروگاه برق بادی می باشد.

Wind power class	10 m (33 ft)		30 m (98 ft)		50 m (164 ft)	
	Power Density W/m ²	Speed m/s (mph)	Power Density W/m ²	Speed m/s (mph)	Power Density W/m ²	Speed m/s (mph)
1	0-100	0-4.4 (0-9.8)	0-160	0-5.1 (0-11.4)	0-200	0-5.6 (0-12.5)
2	100-150	4.4-5.1 (9.8-11.5)	160-240	5.1-5.8 (11.4-13.2)	200-300	5.6-6.4 (12.5-14.3)
3	150-200	5.1-5.6 (11.5-12.5)	240-320	5.8-6.5 (13.2-14.6)	300-400	6.4-7.0 (14.3-15.7)
4	200-250	5.6-6.0 (12.5-13.4)	320-400	6.5-7.0 (14.6-15.7)	400-500	7.0-7.5 (15.7-16.8)
5	250-300	6.0-6.4 (13.4-14.3)	400-480	7.0-7.4 (15.7-16.6)	500-600	7.5-8.0 (16.8-17.8)
6	300-400	6.4-7.0 (14.3-15.7)	480-640	7.4-8.2 (16.6-18.3)	600-800	8.0-8.8 (17.8-19.7)
7	400-1000	7.0-9.4 (15.7-21.1)	640-1600	8.2-11.0 (18.3-24.7)	800-2000	8.8-11.9 (19.7-26.6)

همچنین ماههایی از سال با بیشترین سرعت باد و بیشترین چگالی توان تعیین شدند. با انتخاب شش توربین باد که توسط چهار سازنده مختلف ارائه شده اند و با استفاده از منحنی عملکرد و توزیع ویبول برای ایستگاه، مقدار انرژی تولیدی سالیانه توسط این توربین های باد بدست آمد و می تواند پیشنهادی برای نصب در آینده باشد.

6- مراجع

- [1] سایت وزارت نیرو <http://www.moe.org.ir>
- [2] International Energy Agency (IEA), www.iea.org/
- [3] American Wind Energy Association (AWEA), www.awea.org/
- [4] Global Wind Energy Council (GWEC), <http://www.gwec.net/>
- [5] James F. Manwell, Jon G. McGowan, Anthony L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons, p.11, 2002.
- [6] سازمان انرژی های نو ایران <http://www.suna.org.ir/>
- [7] World Wind Energy Association (WWEA), www.wwindea.org/