



بررسی و تحلیل آماری پتانسیل انرژی باد در استان بوشهر جهت نصب توربین باد

صادق مطهر، احمد صداقت و علی اکبر رجبی

دانه استفاده کرده است [4]، فعالیت‌هایی در راستای تولید توان از منابع بادی در حال انجام است. در ایران، ظرفیت تولید 10 هزار مگاوات برق از نیروگاه‌های بادی پیش‌بینی شده است که در حال حاضر نیروگاه بادی منجیل با ظرفیت 70 مگاوات و نیروگاه بادی بینالود با ظرفیت 28 مگاوات برق تولید می‌کند [5]. طبق گزارش سازمان جهانی انرژی باد [6]، 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 با تولید 20 هزار تا 10 هزار مگاوات در رده‌های نخست قرار 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 [5]. رحیم زاده و جهانگیری [7] با استفاده از روش‌های آماری و اطلاعات هواشناسی سرعت و چگالی انرژی باد را در چند ایستگاه هواشناسی کشور بررسی نمودند. گندمکار و همکاران [8] تغییرات سالانه و روزانه سرعت باد در منطقه سیستان را جهت تولید برق بادی مورد مطالعه قرار دادند. عامری و همکاران [9]، پیشرفت‌های اخیر در توسعه انرژی باد در کشور را با اشاره‌ای به تهیه 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 [10] 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 [11] 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 [12]، یک برآورد آماری از توابع توزیع سرعت و جهت باد

چکیده - پتانسیل باد، برای تولید انرژی پاک، در بسیاری از نقاط ایران قابل توجه است. در این مقاله، یک تحلیل آماری روی داده‌های بادی ایستگاه بردخون در استان بوشهر انجام شده است. ابتدا سرعت باد در ارتفاع 40، 30 و 10 متری در ماه‌های مختلف مطالعه شده است. این ایستگاه دارای میانگین سرعت به ترتیب 5/83، 5/36 و 4/50 متر بر ثانیه در ارتفاع‌های یاد شده است. همچنین گلباد بیشترین جهت وزش باد و تغییرات شدت آشفته‌گی 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 سه توربین باد متفاوت در حالت واقعی انرژی که سالانه از این سایت حاصل می‌شود، برآورد شده است.

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

1- مقدمه

سال در سال 2008 مصرف انرژی جهان معادل 474 اگزاژول ($4.74 \times 10^{20} J$) بوده که 80 تا 90 درصد انرژی مصرفی جهان از منابع فسیلی حاصل شده است [1]، این در حالیست که پتانسیل انرژی باد به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی حدود 15 برابر مصرف انرژی جهان است [2]. 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 [3]. در ایران، به عنوان اولین تمدنی که 900 سال قبل از میلاد از انرژی باد برای پمپ آب و خرد کردن

صادق مطهر، دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک
Email: smotahar@me.iut.ac.ir

احمد صداقت، استاد یار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک
Email: sedaghat@cc.iut.ac.ir

علی اکبر رجبی، دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک
Email: rajabi@cc.iut.ac.ir

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

که در آن U نمایانگر سرعت و $\int_c^\infty p(U) dU = 1$. یکی از این توابع، صحت آن با اندازه‌گیری در نقاط مختلف 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 [13,4]:

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

برای تعیین c و k از روابط تجربی زیر استفاده می‌شود [14,4]:

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

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

2-3 چگالی توان

چگالی توان باد (توان باد بر واحد سطح) به دانسیته هوا (در شرایط استاندارد سطح دریا $r = 1.225 \text{ kg/m}^3$) 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:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} r \int_0^\infty U^3 p(U) dU \quad (5)$$

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

$$\frac{\bar{E}}{A} = \left(\frac{\bar{P}}{A}\right) (N\Delta t) \quad (6)$$

نسبت $K_e = \frac{\bar{U}^3}{(\bar{U})^3}$ بعنوان ضریب الگوی انرژی تعریف شده که برابر توان 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:

$$\bar{P}_w = \int_0^\infty P_w(U) p(U) dU \quad (7)$$

انتگرال فوق با استفاده از روش‌های عددی قابل محاسبه است. از روش دوزنقه در حل انتگرال فوق داریم [13]:

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 بردخون [5] بندر دیر در استان بوشهر، 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 سه توربین باد Enercon 500kW، Vestas V27-225kW و Nordtank 600kW که نمودارهای عملکرد آنها در سرعت‌های مختلف موجود است محاسبه شده است.

2- ایستگاه مورد مطالعه

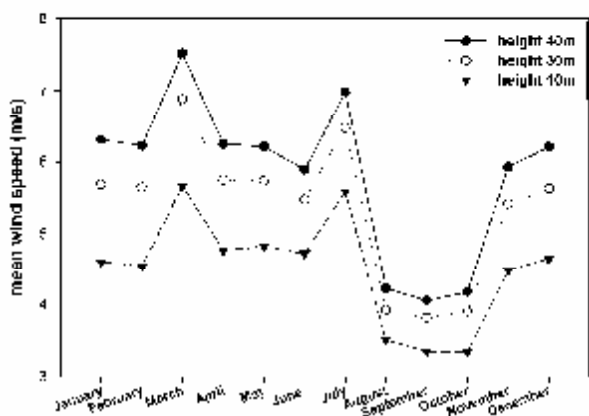
استان بوشهر با مساحتی در حدود 27653 کیلومتر مربع در جنوب باختری ایران و در حاشیه خلیج فارس قرار دارد. از استانهای مجاور آن می‌توان به خوزستان، کهگیلویه و بویر احمد، فارس و هرمزگان اشاره کرد. مرکز استان شهرستان بوشهر است که تا تهران 1330 کیلومتر فاصله دارد. استان بوشهر به لحاظ قرار گیری در نوار ساحلی خلیج فارس، دارای آب و هوای استان گرم و مرطوب است ولی به سمت شمال از رطوبت هوا کاسته می‌شود. باد معروف شمال، بادی است که از شمال غرب جریان داشته و سواحل خلیج فارس را از اواسط بهمن تا اوایل آبان تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. منشأ دیگر بادهای بوشهر تبادل هوای گرم و خنک از خشکی و دریا است. وزش باد در بوشهر تأثیر خاصی روی معماری بناهای آن نیز داشته است. همچنین به دلیل قرار گرفتن بزرگترین سایت صنعتی کشور در پارس جنوبی و مصرف بالای انرژی در آن توسعه منابع جدید انرژی مورد توجه است. سایت مورد مطالعه در بخش بردخون از بندر دیر، در طول جغرافیایی 51/49 و عرض جغرافیایی 27/98 [5] در ارتفاع 4 متری از سطح دریا واقع شده است. 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.

3- تحلیل آماری داده‌های بادی

1-3 توزیع ویبول (Weibull distribution)

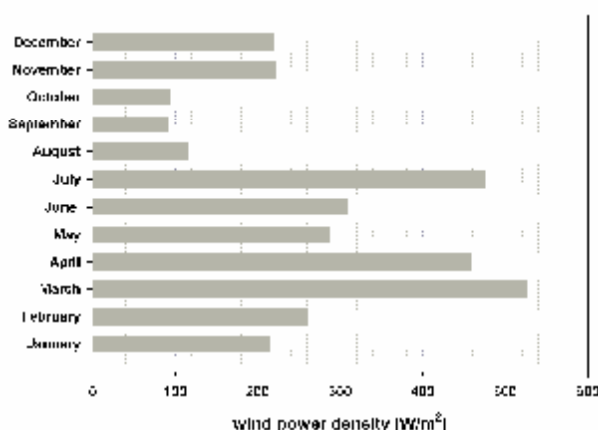
برای تعیین پتانسیل انرژی باد در یک سایت مورد نظر و تخمین انرژی خروجی از این سایت از روش‌های آماری استفاده می‌شود. اگر سری زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده در یک ارتفاع خاص موجود باشد می‌توان تابع توزیع چگالی احتمال سرعت را بصورت زیر نوشت [4]:

4.5m/s ضعیف، 4.5-5.4m/s مرزی، 5.4-6.7m/s خوب تا خیلی خوب و برای سرعت‌های بالاتر از 6.7m/s عالی ارزیابی می‌شود [11]. 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. شکل (1) توزیع ماهیانه سرعت متوسط باد از 1 ژانویه 2007 تا 31 دسامبر 2007 در سه ارتفاع مختلف نشان داده شده است.



شکل 1- توزیع ماهیانه سرعت متوسط

همانطور که از شکل (1) پیداست، سرعت ماهیانه بین 3.34m/s و 7.52m/s تغییر می‌کند. بیشترین سرعت مربوط به ماه مارس 2007 (فروردین) و کمترین سرعت در ماه اکتبر 2007 (مهر) اتفاق می‌افتد. شکل (2) چگالی انرژی باد ماهیانه در ارتفاع 40متری را نشان می‌دهد.



شکل 2- چگالی انرژی باد ماهیانه در ارتفاع 40 متر

بیشترین چگالی انرژی ماهیانه مربوط به ماه‌های جولای تا مارس و کمترین آن مربوط به ماه اکتبر تا آگوست است.

$$\overline{P_w} = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{2} (U_{i+1} - U_i) (p(U_{i+1})P_w(U_{i+1}) + p(U_i)P_w(U_i)) \quad (8)$$

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 [13]. وجود آشفتگی در جریان باد نه تنها از توان آن می‌کاهد، بلکه باعث ایجاد پدیده خستگی در توربین باد می‌شود [13]. یکی از معیارهای اندازه‌گیری آشفتگی، شدت آشفتگی است که بصورت انحراف معیار استاندارد سرعت باد به سرعت متوسط تعریف می‌شود:

$$TI = \frac{S_U}{U} \quad (9)$$

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

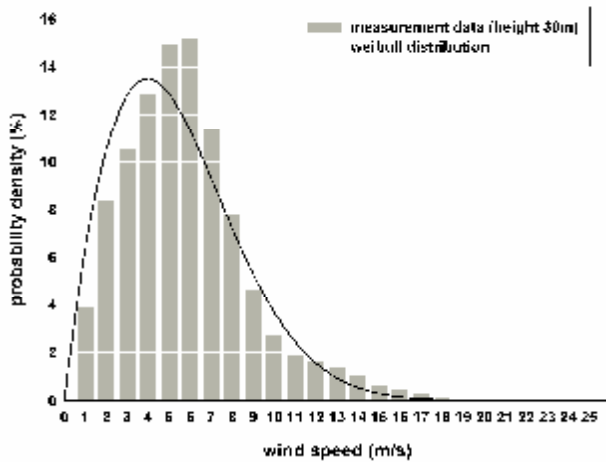
4- نتایج

تعداد داده‌های سرعت باد 52559 مورد با فاصله زمانی 10 دقیقه است که تحلیل روی آن انجام شده است. متوسط دمای ایستگاه 27.12°C و متوسط رطوبت نسبی آن 46.25% بوده است. اندازه‌گیری‌ها در ارتفاع‌های 40، 30 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.

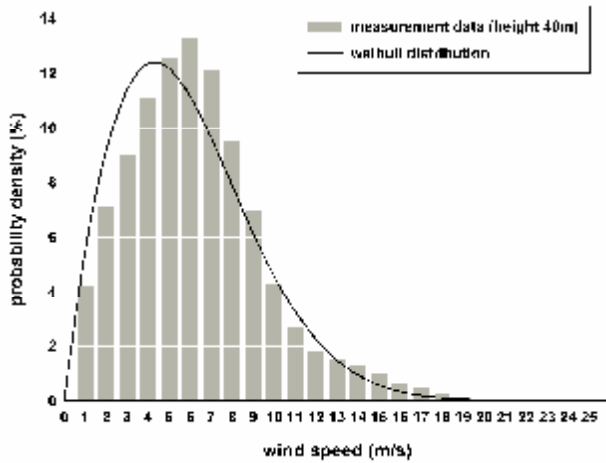
جدول 1- محاسبه پارامترهای مربوط به سرعت و توان باد

	40 m	30 m	10 m
Mean wind speed (m/s)	5.83	5.36	4.50
Standard deviation	3.313	3.042	4.506
Max. 10min Average Wind Speed	23.2	22	19.7
Gust wind speed	33 (11/4/2007 23:50)	31.1 (11/4/2007 23:50)	28.2 (15/3/2007 11:00)
Weibull Distribution constants	k=1.848 c=6.568	k=1.850 c=6.037	k=1.737 c=5.058
Energy pattern factor	2.12	2.15	2.37

پتانسیل انرژی باد نصب توربین بادی در سرعت متوسط کمتر از

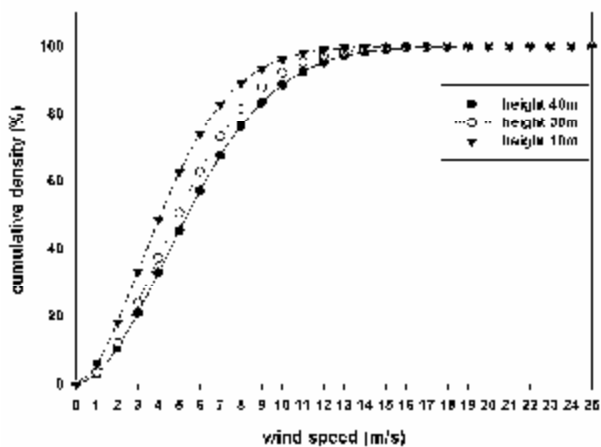


شکل 5- نمودار میله‌ای فرکانس و توزیع ویبول (ارتفاع 30 متر)



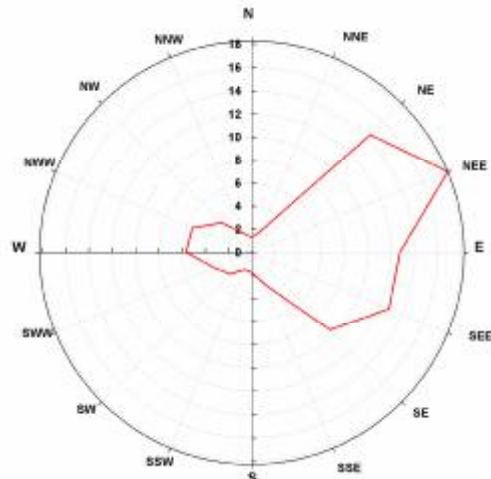
شکل 6- نمودار میله‌ای فرکانس و توزیع ویبول (ارتفاع 40 متر)

در شکل (7) 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.



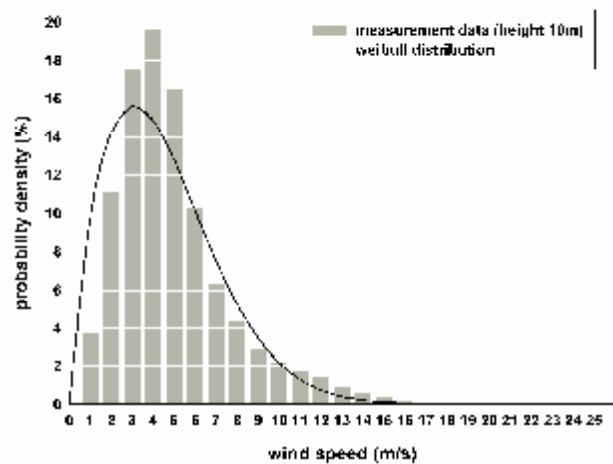
شکل 7- تابع توزیع انباشتی سرعت در ارتفاعهای مورد نظر

گلباد (windrose) نموداری است که توزیع جهت باد را نشان می‌دهد. در شکل (3) گلباد بر اساس زمان (فرکانس) وزش در ارتفاع 30 متری نشان داده شده است. همانطور که از این شکل پیداست بیشترین فرکانس وزش باد در زاویه بین شمال شرقی و جنوب شرقی رخ داده است.



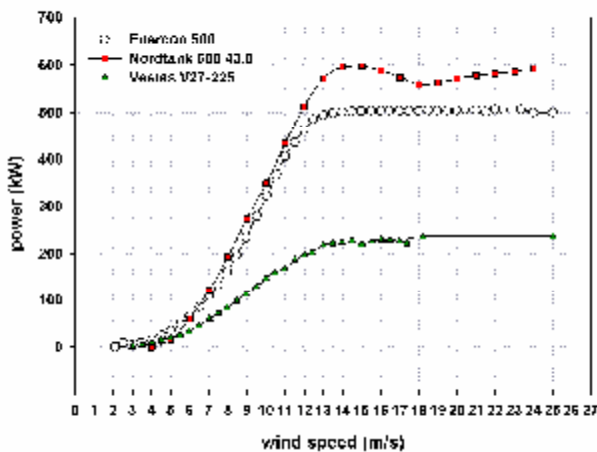
شکل 3- گلباد براساس فرکانس وزش باد در 30 متری

در شکل (4)، (5) و (6) توزیع ویبول سرعت در ایستگاه داده شده در سه ارتفاع نشان داده شده است. ضرایب شکل و مقیاس توزیع ویبول در جدول (1) آورده شده است. ترسیم‌های ویبول با سرعت‌های اندازه‌گیری شده در هر ارتفاع که به صورت نرمالیزه شده توسط نمودار میله‌ای نشان داده شده، سازگاری خوبی دارد.



شکل 4- نمودار میله‌ای فرکانس و توزیع ویبول (ارتفاع 10 متر)

با داشتن تابع توزیع ویبول برای یک سایت بادی و داشتن منحنی توان برای یک توربین باد، توان متوسط توربین باد را می توان حساب کرد. منحنی عملکرد سه توربین باد Enercon 500kW، Vestas V27-225kW و Nordtank 600kW بر حسب سرعت باد [15,16,17] در شکل (11) آورده شده است. این سه توربین بادی با توجه به ارتفاع برجی که روی آن نصب می شوند انتخاب شده اند. این ارتفاع بابر ارتفاعی است که تحلیل آماری روی داده های باد انجام شده است.



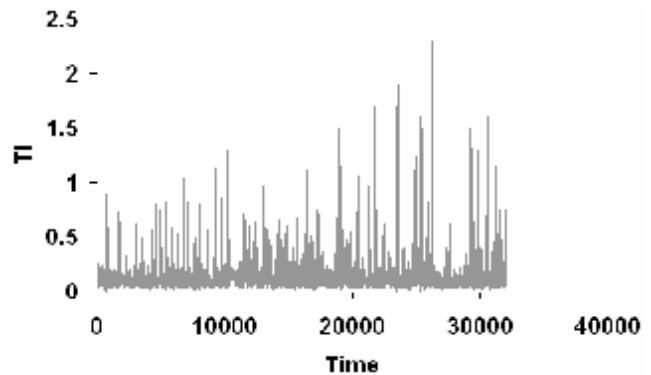
شکل 11- منحنی عملکرد توربین باد [17, 16, 15]

مشخصات این سه توربین باد، که توسط سه شرکت سازنده مختلف ارائه شده اند، به ترتیب عبارتند از:

- 1- Enercon 500kW: tower (40m), Diameter (40m), control: pitch
- 2- Nordtank 600kW 43.0: tower (40m), Diameter (43m), control: stall
- 3- Vestas V27 225kW, tower (28m), Diameter (27m), control: pitch

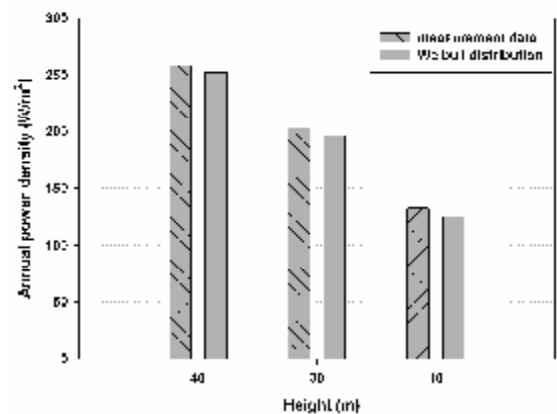
از منحنی عملکرد دو توربین 1 و 2 در ارتفاع 40 متری و از توربین 3 در ارتفاع 30 متری استفاده شده است. شکل (12) انرژی سالیانه تولید شده توسط این سه توربین باد در ایستگاه بردخون را نشان می دهد.

شدت آشفته گی بر حسب زمان در شکل (8) نشان داده شده است. متوسط شدت آشفته گی، همانطور که از شکل هم پیداست، حدود 0/16 است که بیشترین مقدار آن تا 2/5 هم می رسد.



شکل 8- شدت آشفته گی

چگالی توان سالانه باد در شکل (9) نشان داده شده است.



شکل 9- چگالی توان سالانه باد

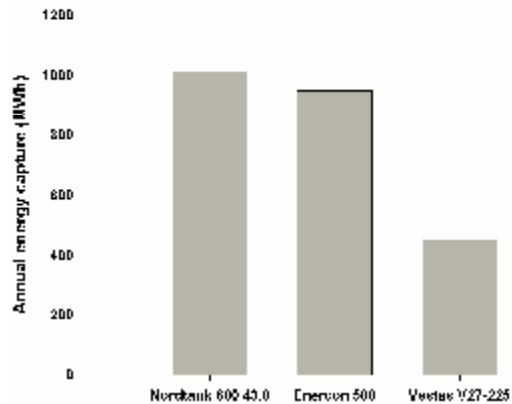
همانطور که از این نمودار پیداست، چگالی توان باد که از داده های اندازه گیری بدست آمده با چگالی توانی که از توزیع ویبول بدست آمده مقایسه شده است.

در شکل (10) 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 کمتر است.



شکل 10- چگالی انرژی سالانه باد

- [4] James F. Manwell, Jon G. McGowan, Anthony L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons, p.11, 2002.
- [5] سازمان انرژی‌های نو ایران <http://www.suna.org.ir/>
- [6] World Wind Energy Association (WWEA), www.windea.org/
- [7] 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
- [8] 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 95-104، 1386
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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
- [13] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins and Ervin Bossanyi, *WIND ENERGY HANDBOOK*, John Wiley & Sons, 2001.
- [14] 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.
- [15] TheVirtual Websites for Wind Power Technology Worldwide, www.windturbinewarehouse.com/
- [16] Windturbines Reference Pages, <http://www.windturbines.ca/>
- [17] ENERCON Windblatt, <http://www.enercon.de/>



شکل 12- انرژی سالانه تولید شده توسط توربین های باد

همانگونه که از شکل (12) پیداست انرژی تولید شده توسط یک توربین تا حدود 1000MWh هم می‌رسد که رقم قابل توجهی است. با احداث یک مزرعه توربین باد می‌توان برق بیشتری از انرژی باد این منطقه تولید کرد. 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.

5- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل آماری پتانسیل انرژی باد با رسم توابع توزیع ویبول برای سرعت در ارتفاع 10، 30 و 40 متری در ایستگاه بردخون انجام شد. با توجه به وجود صنایع مختلف در استان بوشهر، این سایت از موقعیت مناسبی برای نصب توربین باد در ارتفاعهای بالا برخوردار است. نمودارهای چگالی توان باد و چگالی انرژی باد نیز این مطلب را تأیید می‌کنند. همچنین ماههایی از سال با بیشترین سرعت باد و بیشترین چگالی توان تعیین شدند. با انتخاب سه توربین باد که توسط سه سازنده مختلف ارائه شده‌اند و با استفاده از منحنی عملکرد و توزیع ویبول برای ایستگاه، مقدار انرژی تولیدی سالیانه توسط این سه توربین باد بدست آمد و می‌تواند پیشنهادی برای نصب در آینده باشد. همچنین به دلیل ساحلی بودن این ایستگاه، با بررسی جوانب مختلف فنی و اقتصادی، می‌توان امکان نصب توربین‌های فراساحلی را هم در این منطقه بررسی نمود.

6- مراجع

- [1] International Energy Agency (IEA), www.iea.org/
- [2] American Wind Energy Association (AWEA), www.awea.org/
- [3] Global Wind Energy Council (GWEC), <http://www.gwec.net/>